

Trabajo Fin de Grado

Diseño de enjambres UAV para la instrucción de
oficiales tácticos en la Defensa Aérea

Francisco José Culiañez Alcolea

Director académico: D. Javier del Valle Melendo

Director militar: Cap. D. Francisco Torreblanca Gallardo

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2025



Agradecimientos

Me gustaría utilizar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo de este grado. A los innumerables compañeros y amigos que me han ayudado con las asignaturas.

Me gustaría agradecer al Regimiento de Artillería Antiaérea nº74 por darme la oportunidad de realizar las prácticas en su unidad y, sobre todo, en la importante ayuda que he recibido en la elaboración de este trabajo.

Agradecer a todo el personal de tropa, suboficiales y oficiales del Regimiento por la acogida, y la siempre disposición a ayudar en todo lo que pudiesen en el Trabajo de Fin de Grado. Dar las gracias a la Unidad de Reparaciones, a la primera y a la tercera Batería del RAAA 74, lugar donde realicé las prácticas durante 6 semanas, donde aprendí de manera excepcional y añadiendo información de valor para mi formación como militar y mi futuro empleo de teniente. Destacar mi agradecimiento a mi tutor militar, el Capitán D. Francisco Torreblanca Gallardo, ya que, sin su ayuda, este trabajo no hubiera sido posible. Gracias a todo el tiempo que me dedicó transfiriéndome sus conocimientos.

Agradecer a mi tutor civil D. Javier del Valle Melendo por las correcciones realizadas para la mejor elaboración de este trabajo y por todo el tiempo que ha dedicado a las distintas correcciones del trabajo, y aportar más información del mismo.

También mencionar la importante labor de mi familia, que siempre está presente dándome su apoyo en todo momento, cada día.



RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño e implementación de enjambres de vehículos aéreos no tripulados (UAV) como herramienta formativa para la instrucción de oficiales tácticos en Defensa Aérea. En un contexto de evolución tecnológica constante, los enjambres de drones se posicionan como un recurso emergente de gran valor tanto en el ámbito operativo como en el formativo, a pesar de encontrarse aún en fases de desarrollo avanzado solo en un número limitado de países.

El problema identificado es la creciente complejidad de las amenazas aéreas modernas, caracterizadas por el uso de múltiples vectores simultáneos y de bajo coste, frente a las cuales las unidades de defensa aérea españolas deben estar preparadas. El propósito del trabajo es analizar y proponer un modelo de instrucción que, mediante el empleo de enjambres UAV, permita mejorar los procesos de detección, identificación, seguimiento y neutralización de amenazas múltiples, fomentando así la toma de decisiones en escenarios dinámicos y de alta presión.

La metodología empleada se ha basado en el análisis doctrinal de la Defensa Aérea y de la logística de mantenimiento en escalones, la revisión de literatura científica y técnica sobre enjambres UAV, así como la propuesta de escenarios de simulación realista que integran tácticas modernas como ataques de saturación, vuelo en formación y empleo de drones FPV. Además, se ha considerado un análisis de riesgos vinculados al uso de estas tecnologías y la viabilidad de su integración en programas de instrucción ya existentes.

Los resultados del estudio muestran que la utilización de enjambres UAV en el ámbito formativo ofrece un alto potencial para replicar amenazas contemporáneas de forma segura, repetible y a un coste relativamente bajo. Asimismo, se identifican beneficios adicionales como el fomento de la cultura de innovación dentro del Ejército de Tierra y la oportunidad de establecer sinergias con la industria tecnológica nacional para el desarrollo de sistemas adaptados a las necesidades específicas de la defensa aérea.

Como conclusión, el trabajo confirma que la propuesta responde a los objetivos planteados: aporta una vía realista para modernizar la instrucción táctica de oficiales, incrementar la preparación frente a amenazas emergentes y reforzar la cooperación entre el ámbito militar y el industrial en España.

PALABRAS CLAVE

UAV, enjambres, instrucción táctica, defensa aérea, innovación militar.



ABSTRACT

This study addresses the design and implementation of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms as a training tool for the instruction of tactical air defense officers. In a context of constant technological evolution, drone swarms emerge as a valuable resource in both operational and training domains, despite still being in advanced development stages in only a limited number of countries.

The problem identified lies in the growing complexity of modern aerial threats, characterized by the use of multiple simultaneous and low-cost vectors, against which Spanish air defense units must be prepared. The purpose of this research is to analyze and propose a training model that, through the employment of UAV swarms, enhances detection, identification, tracking, and neutralization processes of multiple threats, thereby improving decision-making in dynamic and high-pressure scenarios.

The methodology is based on a doctrinal analysis of air defense and echeloned maintenance logistics, a review of scientific and technical literature on UAV swarms, and the proposal of realistic simulation scenarios that integrate modern tactics such as saturation attacks, formation flying, and the use of FPV drones. Additionally, the study considers a risk analysis related to the employment of these technologies and their feasibility for integration into existing training programs.

The results indicate that the use of UAV swarms in training presents significant potential for replicating contemporary threats in a safe, repeatable, and relatively low-cost manner. Additional benefits include fostering a culture of innovation within the Spanish Army and creating opportunities for synergies with the national technology industry to develop systems tailored to the specific needs of air defense.

In conclusion, the study confirms that the proposal meets the stated objectives: it provides a realistic approach to modernizing tactical officer training, enhances preparedness against emerging threats, and strengthens cooperation between the military and the industrial sector in Spain.

KEYWORDS

UAV, swarms, tactical training, air defense, military innovation.



ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	IX
DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Capacidades de los enjambres UAV en la actualidad.....	1
1.2. Puntos a tratar en la memoria	2
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	3
2.1. Objetivos y alcance.....	3
2.2. Metodología	4
2.3. Herramientas utilizadas	5
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. Antecedentes	6
3.2. Proyectos futuros	6
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	8
4.1. Componentes principales de un UAV.....	8
4.2. Empleo previsto de los UAV	10
4.2.1. Empleo general.....	10
4.2.2. Enjambres UAV en operaciones de Defensa Aérea	10
4.2.3. Necesidades en la instrucción de la Defensa Aérea.....	11
4.3. La inteligencia Artificial	12
4.3.1. Definición	12
4.3.2. Uso de la IA en drones	12
4.4. Obtención del UAV	13
4.5. Aplicación de enjambres UAV en la instrucción táctica.....	18
4.5.1. Simulación de amenazas de escenarios realistas	18
4.5.2. Herramientas y plataformas de entrenamiento	20
4.5.3. Evaluación de la toma de decisiones y desempeño	23
4.5.4. Integración en ejercicios y maniobras militares.....	29
4.6. Enjambres UAV	34



4.6.1.	Elementos de un enjambre UAV	34
4.6.2.	COMAO	35
4.6.3.	Mantenimiento	36
4.6.4.	Ventajas e inconvenientes de los enjambres UAV.....	37
4.6.5.	Introducción en una unidad de Artillería Antiaérea	39
4.6.6.	Análisis DAFO	40
4.7.	Formación de Pilotos	41
4.8.	Impacto social y ético.....	42
4.9.	Impacto psicológico	43
4.10.	Conflicto legal.....	43
5.	CONCLUSIONES	44
5.1.	Principales hallazgos	44
5.2.	Propuestas de mejora y líneas futuras de investigación	45
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
	ANEXOS	55
	ANEXO I TIPOS DE DRONES	56
	ANEXO II MEDIOS C-UAS EN ESPAÑA	60
	ANEXO III ENCUESTAS	64
	ANEXO IV ENTREVISTAS.....	69
	ANEXO V ORGANIGRAMA RAAA-74.....	74
	ANEXO VI ANÁLISIS DE RIESGOS	75
	ANEXO VII CASA DE LA CALIDAD	79
	ANEXO VIII ANÁLISIS “MAKE OR BUY”	81
	ANEXO IX STAKEHOLDERS	82
	ANEXO X REALIZACIÓN DE PIEZAS POR IMPRESIÓN 3D.....	84
	ANEXO XI PERMISOS DE VUELO DE UAV EN DIFERENTES EJERCICIOS	85



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico actualizado en 2023 que muestra los países que actualmente operan drones de combate. Fuente: [1]	1
Figura 2: Diagrama de Gantt del proyecto. Fuente: Elaboración Propia a partir de Canva [60] ..	4
Figura 3: Proyecto " Next Generation Small RPAS (NGSR)". Fuente: [7]	7
Figura 4: Partes de un Dron. Fuente [2].....	9
Figura 5: Tipos de aprendizaje automático: supervisado, no supervisado y refuerzo. Fuente: [14]	12
Figura 6: Sala de Impresión 3D del RAAA-74. Fuente: Elaboración propia	14
Figura 7: DARPA OFFSET Program. Fuente: [22]	15
Figura 8: UAV Navigation LISS. Fuente: [23].....	15
Figura 9: Humming-Prop v2. Fuente: [24]	15
Figura 10: Gráfico de Líneas. Fuente: Elaboración Propia	16
Figura 11: Descripción general de la estructura jerárquica del enjambre de UAV. Fuente [53].	35
Figura 12: Ejemplo de COMAO. Fuente: [54]	36
Figura 13: Diagrama de Ishikawa o de pez. Fuente: Elaboración Propia mediante [73]	39
Figura 14: Encuesta sobre encuadramiento de los enjambres UAV en unidades AAA. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]	39
Figura 15: Resultados en gráfica de barras de la encuesta sobre el encuadramiento de los enjambres UAV en unidades AAA. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]	40
Figura 16: Análisis DAFO. Fuente: Elaboración Propia a partir de [60]	40
Figura 17: Sistema Cervus III. Fuente: [78]	60
Figura 18: Sistema Crow. Fuente: [79]	61
Figura 19: Sistema EnforceAir 2. Fuente: [80]	61
Figura 20: Sistema Fusiles anti drones RF C-RPAS. Fuente: [81]	62
Figura 21: Imagen creada con IA del Sistema Adevox. Fuente: Perplexity	62
Figura 22: Sistema Guardian 2.0. Fuente: [83]	63
Figura 23: Encuesta sobre la necesidad de incorporar los enjambres UAV a las unidades. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]	64
Figura 24: Respuesta encuesta sobre la necesidad de incorporar los enjambres UAV a las unidades.	64



Figura 25: Encuesta sobre la mejor opción de elaboración de drones. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]	65
Figura 26: Respuesta encuesta sobre la mejor opción de elaboración de drones.....	65
Figura 27: Encuesta sobre diferentes usos de los drones. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58].....	66
Figura 28: Respuesta encuesta sobre diferentes usos de los drones	66
Figura 29: Encuesta sobre la utilidad de UAV en la instrucción. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]	66
Figura 30: Resultado encuesta sobre la utilidad de UAV en la instrucción	67
Figura 31: Encuesta sobre el valor añadido al implementar el enjambre. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58].....	67
Figura 32: Resultado encuesta sobre el valor añadido al implementar el enjambre	68
Figura 33: Organigrama RAAA 74. Fuente: Propia.....	74
Figura 34: Organigrama GAAA I/74 y GAAA II/74. Fuente: Propia	74
Figura 35: Ejemplo de parte de un dron realizado en SolidWorks. Fuente: [71]	84
Figura 36: Restricciones de vuelo para UAV en el área de Madrid. Fuente: ENAIRE [140]	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características específicas del DARPA OFFSET Program, UAV Navigation LISS y HUMMING-PROP V2. Fuente: [19] / [20] / [21].....	15
Tabla 2: Resumen Simulaciones. Fuente: Elaboración propia	20
Tabla 3: Clasificación UAV según NATO. Fuente: [74]	59
Tabla 4: Análisis de riesgos. Fuente: Elaboración Propia	78
Tabla 5: Casa de la Calidad. Fuente: Elaboración propia	79
Tabla 6: Casa de la Calidad. Fuente: Elaboración propia	80
Tabla 7: Análisis Cualitativo y de Costes “Make or Buy”. Fuente: Elaboración Propia	81
Tabla 8: Análisis “Make or Buy”. Fuente: Elaboración Propia	81
Tabla 9: Stakeholders del proyecto. Fuente: Elaboración Propia	83



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

3D	3 Dimensiones
AAA	Artillería Antiaérea
AAR	After Action Review
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AEO	Agrupación de Especialidades Operativas
AET	Agrupación de Especialidades Técnicas
AIP	Aeronautical Information Publication
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BOE	Boletín Oficial del Estado
BLOS	Beyond Line of Sight
BRILOG	Brigada Logística
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
C2	Mando y Control
C4I	Mando, Control, Comunicaciones, Computadoras e Inteligencia
CECAF	Centro de Cartografía y Fotografía Aérea
CIO	Centro de Inteligencia y Operaciones
CMT	Campo de Maniobras y Tiro
COMAO	Composite Air Operations
C-UAS	Counter Unmanned Aerial System
DAFO/SWOT	Debilidades, Amenazas, Fortalezas, Oportunidades
DEW	Directed Energy Weapons
EEUU	Estados Unidos
EMAN	Escalón de Mantenimiento
ESC	Controladores Electrónicos de Velocidad
EW	Electronic War
FDC	Fire Director Centre
FPV	First Person View
GAAA	Grupo de Artillería Antiaérea
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HAWK	Homing All the Way Killer
Hz	Hercios
I+D	Investigación y Desarrollo
IA	Inteligencia Artificial



IBM	International Business Machines
IMU	Unidad de Medición Inercial
IR	Infrarrojo
ISM	Industrial, Scientist, Medical
ISR	Intelligence, Surveillance, Reconnaissance
IVAS	Integrated Visual Aumentation System
LCAAT	Low-Cost Attriatable Aircraft Technology
LOCUST	Low-Cost UAC Swarming Technology
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
LVC	Live Virtual Constructive
MALE	Mando de Apoyo Logístico del Ejército
MESH	Red en malla
M-LIDS	Mobile low, slow, unmanned aircraft integrated defense system
NASAMS	Norwegian Advanced Surface-to-Air Missile System
NGSR	Next Generation Slamm RPAS
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OODA	Observación, Orientación, Decisión y Acción
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PALET	Plan de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra
PATRIOT	Phased Array Tracking Radar to Intercept On Target
PCAAA	Post Command Anti-Aircraft Artillery
PCMASACOM	Parque y Centro de Mantenimiento de Sistemas Antiaéreos, de Costa y Misiles
PESCO	Permanent Structure Cooperation
PIB	Producto Interior Bruto
PLM	Plana Mayor
PLMM	Plana Mayor de Mando
RA	Realidad Aumentada
RAAA	Regimiento de Artillería Antiaérea
RF	Radiofrecuencia
RPAS	Remote Piloted Aereal System
RTL	Return To Launch
RVF	Zona Restringida al Vuelo Fotográfico
RWS	Radar Warning System
SCR	Sistemas de Control Remoto



Francisco José Culiñez Alcolea

SEAD	Supression of Enemy Air Defense
SIM	Subscriber Identity Module
SIMNET	Simulator Networking
TADS	Tactical Debriefing System
TTCI	Time to Clasify
TTD	Time to Detect
TTDec	Time to Decision
TTE _x	Time to Execution
UAS	Unmanned Aereal System
UE	Unión Europea
UREP	Unidad de Reparaciones
VSHORAD	Very Short-Range Air Defense
VTOL	Vertical Take-Off and Landing



DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Se utilizó inteligencia artificial para la redacción y reformulación de determinados apartados del trabajo, así como para mejorar la coherencia y la precisión del lenguaje empleado. El modelo empleado fue ChatGPT-5, desarrollado por OpenAI. Con el fin de preservar la seguridad de la información, únicamente se introdujeron fragmentos del propio texto del TFG y contenidos de carácter general, evitando el uso de datos sensibles o personales.

En el desarrollo del TFG también se recurrió a herramientas de IA para la ampliación de la búsqueda bibliográfica y la obtención de datos técnicos relacionados con enjambres UAV, logística militar y doctrinas de Defensa Aérea. En este caso, la herramienta utilizada fue Perplexity AI, que permitió contrastar y complementar la información obtenida en fuentes académicas y profesionales. Para garantizar la integridad de la investigación, las consultas se limitaron a aspectos conceptuales y técnicos, sin incluir datos confidenciales del proyecto.

El uso de estas herramientas de inteligencia artificial se ha realizado de forma responsable, crítica y complementaria, de modo que las decisiones finales sobre la redacción, la interpretación de resultados y la elaboración de conclusiones corresponden exclusivamente al autor del trabajo. Se empleó un modelo de IA, Microsoft Copilot, para realizar correcciones gramaticales y mejorar la claridad del lenguaje en el documento final del TFG. Los datos ingresados fueron exclusivamente partes del texto del trabajo, sin incluir información confidencial o personal, asegurando así la integridad de la información.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Capacidades de los enjambres UAV en la actualidad

El Ejército de Tierra español se encuentra en pleno proceso de modernización para responder a las demandas del nuevo entorno estratégico, caracterizado por la asimetría de los conflictos, el auge de la guerra tecnológica y la aparición de nuevas amenazas. En este escenario, los UAS se han consolidado como una herramienta clave tanto en el combate como en la formación de las Fuerzas Armadas.

El aumento del uso de drones tácticos, suicidas y enjambres coordinados en conflictos recientes, como el enfrentamiento entre Rusia y Ucrania, la escalada de tensiones entre Irán e Israel, o las operaciones sostenidas en la Franja de Gaza, han puesto de manifiesto la necesidad urgente de adaptar las doctrinas de la Defensa Aérea a esta nueva forma de guerra, donde la saturación del espacio aéreo mediante sistemas no tripulados es ya una realidad.

En particular, la guerra de Ucrania ha supuesto un punto de inflexión en el empleo de drones: tanto Rusia como Ucrania han desplegado miles de UAVs con fines de reconocimiento, ataque o interferencia electrónica. Esta guerra ha demostrado la eficacia táctica de los enjambres y la necesidad de sistemas de defensa capaces de detectarlos, clasificarlos y neutralizarlos de forma coordinada. Asimismo, en el conflicto entre Israel y Hamás, el uso de drones de corto alcance y UAV suicidas ha sido empleado para saturar sistemas de defensa aérea como la Cúpula de Hierro¹, provocando importantes desafíos operativos (Ver Figura 1).

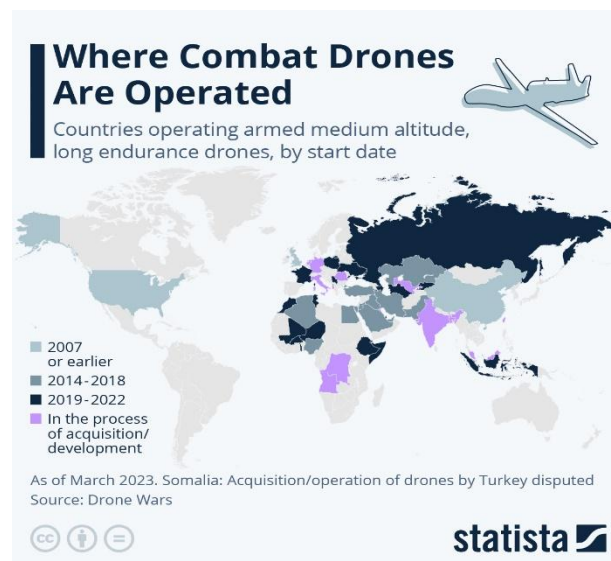


Figura 1: Gráfico actualizado en 2023 que muestra los países que actualmente operan drones de combate. Fuente: [1]

Estas nuevas formas de combate no son solo amenazas externas, sino también oportunidades formativas. La capacidad de simular ataques múltiples mediante enjambres UAV abre la puerta a un modelo de instrucción más dinámico, realista y eficaz para las unidades encargadas de la defensa aérea. A través de estos sistemas, es posible replicar situaciones

¹ Cúpula de Hierro: sistema de defensa aérea desarrollado por Israel para interceptar y destruir cohetes y proyectiles de corto alcance en vuelo, mediante radares y misiles interceptores guiados, ofreciendo una protección eficaz frente a amenazas de saturación en zonas pobladas o estratégicas.



tácticas complejas en tiempo real, evaluando la reacción, decisión y coordinación de los oficiales que se enfrentan a escenarios altamente volátiles.

En España, aunque el esfuerzo presupuestario en Defensa ha comenzado a aumentar con la previsión de alcanzar el 2% del PIB en los próximos años, el ritmo de adopción de nuevas tecnologías aún se encuentra por detrás de países como Turquía, Israel o Irán, donde la producción y el uso táctico de UAS ha alcanzado una madurez operativa muy significativa. Pese a ello, unidades del Ejército español como el Regimiento de Artillería Antiaérea nº71 (RAAA 71) están impulsando la integración de estos sistemas en los programas de formación y simulación, alineando su instrucción con las exigencias del combate moderno.

Este trabajo se enmarca en esa línea de modernización y tiene como objetivo diseñar un sistema de enjambre UAV orientado a la instrucción táctica de oficiales en la Defensa Aérea, permitiendo reproducir de una manera realista situaciones de saturación aérea, operaciones conjuntas o respuestas ante amenazas autónomas. Con ello, se pretende dotar al Ejército de Tierra de una herramienta de entrenamiento avanzada, versátil, de bajo coste relativo y alineada con los desafíos presentes y futuros del campo de batalla contemporáneo.

1.2. Puntos a tratar en la memoria

A lo largo del desarrollo de esta memoria, se abordarán diversos aspectos clave con el objetivo de cumplir los fines establecidos en el proyecto:

1) Sobre los UAVs

- Estudio y comparativa entre distintas opciones de obtención de UAV: desde modelos comerciales hasta drones de fabricación propia mediante un diseño personalizado o impresión 3D.
- Análisis técnico de los componentes fundamentales de un UAV: estructura, sensores, software...

2) Sobre los enjambres de UAVs

- Análisis funcional de las características necesarias para que un dron opere como parte de un enjambre.
- Estudio de casos y proyectos internacionales relevantes en el desarrollo de enjambres UAV y su posible aplicación en el contexto español.
- Evaluación de ventajas, desventajas y potencial doctrinal del uso de enjambres UAV en unidades de artillería antiaérea y Defensa Aérea del Ejército de Tierra.
- Propuesta de un programa básico de instrucción táctica para oficiales en el manejo de enjambres UAV como herramienta de entrenamiento y simulación.

3) Otros aspectos clave

- Estudio del impacto social, psicológico y ético de los enjambres UAV tanto en población civil como en personal militar, con especial atención al uso de inteligencia artificial en sistemas autónomos.
- Análisis de riesgos operacionales y de seguridad que implica la integración de enjambres UAV en escenarios de defensa aérea.
- Valoración de la percepción del personal militar sobre la viabilidad del proyecto, recogida a través de encuestas a miembros de unidades especializadas como el RAAA 74.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. Objetivos y alcance

Objetivo general

Analizar la viabilidad y el potencial del uso de enjambres de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la instrucción de oficiales en la defensa aérea del Ejército de Tierra, evaluando sus beneficios, limitaciones y posibilidades de integración en escenarios tácticos.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio técnico sobre las ventajas e inconvenientes del empleo de enjambres UAV en unidades de Defensa Aérea.
- Analizar las alternativas de creación, fabricación y adquisición de UAV, valorando el uso de modelos comerciales frente al diseño y desarrollo propio en términos de coste, funcionalidad y adaptabilidad.
- Determinar los elementos técnicos y operativos necesarios para que un UAV pueda integrarse y operar eficazmente dentro de un enjambre.
- Elaborar un informe sobre el papel de la inteligencia artificial en el funcionamiento actual y futuro de enjambres de drones, considerando su autonomía, aplicaciones militares y perspectivas de evolución.

El presente trabajo se centra en el análisis conceptual y técnico de los enjambres UAV como herramienta formativa, quedando delimitado por las siguientes condiciones:

- Hipótesis de partida: se considera que la renovación e innovación del material militar debe incorporar tecnologías emergentes como los UAV, aunque bajo limitaciones presupuestarias y de acceso a tecnología sensible.
- Restricciones: el estudio está condicionado por las limitaciones económicas propias de la defensa, que dificultan la fabricación o adquisición de UAV a gran escala, así como por la naturaleza clasificada de algunos desarrollos avanzados de enjambres UAV en el ámbito internacional.
- Exclusiones: no se abordan el proceso detallado de obtención de piezas ni la construcción completa de enjambres de drones; tampoco se analiza la posible modificación futura de los diseños propuestos ni la coordinación del vuelo de UAV con el espacio aéreo civil, al quedar fuera del marco temporal y presupuestario del trabajo.



2.2. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos marcados, se han ido completando las siguientes fases, las cuales permiten el correcto desarrollo del proyecto (Ver Figura 2).



Figura 2: Diagrama de Gantt del proyecto. Fuente: Elaboración Propia a partir de Canva [60]

En primer lugar, se llevó a cabo un estudio preliminar sobre los diferentes tipos de enjambres UAV y su aplicación tanto dentro del ámbito civil como en el militar, con el objetivo de adquirir una visión general amplia que sirviera de orientación general para el desarrollo del trabajo. Además, se realizó un análisis introductorio de las principales características que pueden presentar los UAV en función de su tipología y uso.

De igual modo, se incorporó un estudio específico de las características propias de los enjambres de drones con el fin de comprender su comportamiento colectivo. Finalmente, se efectuó un estudio detallado de las partes que componen un UAV, lo que permitió adquirir un conocimiento sólido sobre su funcionamiento individual y, en consecuencia, sobre su integración en aplicaciones colectivas de enjambre.

Durante el desarrollo de estas fases, se llevaron a cabo prácticas en el Regimiento de Artillería Antiaérea n.º 74 (RAAA 74), ubicado en la localidad de San Roque (Cádiz) (Ver Anexo V: Organigrama del RAAA 74). Además, se realizaron entrevistas con personal de la unidad, tanto de la Agrupación de Especialidades Técnicas (AET), electrónicos, telecomunicaciones y mecánicos como de la Agrupación de Especialidades Operativas (AEO), (Ver Anexo IV: Entrevistas) con el objetivo de recoger la experiencia y la visión de profesionales que operan en entornos donde el uso de UAV y enjambres podría resultar especialmente útil. Además, las encuestas realizadas (Ver Anexo III: Encuestas) reflejaron una elevada percepción de la necesidad de incorporar enjambres UAV en las unidades de Defensa Aérea para ensayar nuevas tácticas de defensa anti-dron.

En una fase posterior, se contactó con empresas especializadas en UAV, que aportaron información relevante sobre el mercado actual de sistemas anti-enjambre y sobre las capacidades y limitaciones de diferentes modelos de drones empleados en escenarios reales. Estos datos resultaron especialmente útiles para diseñar contenidos orientados a la instrucción del personal.

La memoria final del Trabajo de Fin de Grado integró los resultados de todas las fases anteriores, orientando sus conclusiones a mejorar la preparación de las unidades antiaéreas frente a este tipo de amenazas, reforzando la doctrina de instrucción y proporcionando



herramientas para la toma de decisiones en ejercicios de adiestramiento y, consecuentemente en escenarios reales.

2.3. Herramientas utilizadas

Con el objetivo de lograr una mayor precisión y coherencia en el desarrollo de este trabajo, se emplearon diversas herramientas de análisis y planificación, que permitieron abordar cada fase del proyecto de manera estructurada y obtener conclusiones fundamentadas sobre la implementación de enjambres UAV en la instrucción táctica de la Defensa Aérea.

En primer lugar, para valorar la viabilidad del uso de enjambres UAV dentro de una unidad de Artillería Antiaérea, se elaboró un análisis DAFO (SWOT) (Figura 16). Esta herramienta facilitó la identificación de fortalezas y oportunidades del proyecto, así como de las posibles amenazas y debilidades asociadas a su desarrollo y posterior implementación. Su uso permitió obtener una visión estratégica global de la propuesta, sirviendo de base para las decisiones tomadas en fases posteriores.

La planificación temporal del proyecto se representó mediante un diagrama de Gantt, es una herramienta esencial para organizar de forma cronológica las tareas y fases del trabajo para una mayor distribución de las tareas y objetivos en plazos determinados. Este diagrama permitió asignar plazos específicos a cada actividad, garantizando una secuencia lógica y evitando solapamientos o retrasos en el desarrollo de la memoria (Ver Figura 2).

En el ámbito de la recopilación de información, se desarrollaron, por un lado, encuestas y se hicieron diversas entrevistas dirigidas tanto a personal militar de la unidad como a civiles interesados en el tema (Ver Anexo III: Encuestas y Anexo IV: Entrevistas). Con ello, se obtuvo una visión más completa sobre la percepción profesional del uso de enjambres UAV en escenarios de instrucción y sobre la aceptación social y profesional de este tipo de tecnología aplicada a la defensa aérea.

Posteriormente, para la evaluación de alternativas de obtención del UAV, se elaboró un análisis “Make or Buy” (Ver Anexo VIII: Make or Buy), que permitió comparar la fabricación propia de drones frente a la adquisición de modelos civiles disponibles en el mercado. Como herramienta complementaria, se utilizó una Casa de la Calidad (Ver Anexo VII: Casa de la Calidad), donde se ponderaron los requisitos técnicos y operativos necesarios, permitiendo determinar qué opción ofrecía una mayor adecuación a las necesidades de la unidad militar.

Con el fin de prever posibles errores y fallos durante la ejecución o uso de los enjambres UAV, se empleó un diagrama de Ishikawa o diagrama de pez (Ver Figura 13), herramienta fundamental para identificar causas potenciales de problemas en la operatividad de los drones. A partir de este análisis se diseñó un plan de riesgos (Ver Anexo VI: Análisis de Riesgos), en el que se evaluaron las amenazas, sus probables causas y medidas de mitigación.

El estudio incluyó también una búsqueda de empresas interesadas en el desarrollo de enjambres UAV, permitiendo conocer las posibles colaboraciones del sector privado y su impacto en el futuro del proyecto (Ver Anexo IX: Stakeholders).

Finalmente, se hizo uso de diversas herramientas digitales y de búsqueda de información especializada, incluyendo el soporte de ChatGPT o Perplexity como asistente para la redacción, síntesis y estructuración de ideas, empleándolo únicamente como complemento y contrastando toda la información obtenida con fuentes fiables y documentación técnica específica.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

Los conflictos armados han evolucionado radicalmente en las últimas décadas. Si bien en el pasado las guerras se caracterizaban por enfrentamientos convencionales entre ejércitos regulares, hoy día predominan los escenarios asimétricos, la guerra híbrida y el empleo de tecnología de última generación como elemento decisivo en el campo de batalla. Conflictos como el de Ucrania, la guerra civil en Siria o las tensiones en Oriente Medio han evidenciado que el dominio del espacio aéreo y la superioridad tecnológica son factores determinantes para alcanzar los objetivos estratégicos.

En este nuevo panorama, el uso de sistemas no tripulados, conocidos como UAV, ha adquirido una importancia creciente. Al comienzo estos dispositivos se limitaban a la mera observación del campo de batalla, pero con el tiempo los drones han evolucionado hasta convertirse en herramientas versátiles con capacidades de reconocimiento, ataque, guerra electrónica o apoyo logístico. El desarrollo de enjambres UAV representa un salto cualitativo en el empleo de estos sistemas, permitiendo operaciones más complejas, dinámicas y resilientes frente a amenazas tecnológicas avanzadas.

Históricamente, el concepto de enjambre se inspira en patrones naturales de comportamiento colectivo, como los observados en bandadas de aves o colonias de insectos. En el ámbito militar, este principio se ha adaptado para generar ventajas tácticas: saturar defensas aéreas, ejecutar maniobras coordinadas de reconocimiento y vigilancia, o incluso realizar ataques sincronizados sobre múltiples objetivos. Países como Estados Unidos, China, Israel o Turquía lideran el desarrollo de esta tecnología, que ya ha sido probada en escenarios reales con resultados significativos. [136]

España, por su parte, ha iniciado una fase incipiente en la integración de enjambres UAV en sus Fuerzas Armadas. Si bien ya se emplean plataformas UAV en labores de observación y apoyo a unidades terrestres o la UME [137], el uso coordinado de enjambres aún está en fase experimental, en concreto, en el RAAA 71. La necesidad de adaptar la instrucción militar a esta nueva realidad tecnológica es una prioridad estratégica, especialmente en unidades como la Artillería o la Defensa Aérea, donde la precisión y la superioridad son fundamentales.

3.2. Proyectos futuros

Actualmente, el desarrollo de enjambres UAV representa uno de los pilares de modernización de las fuerzas armadas a nivel global. Este auge se debe a la versatilidad de estos sistemas en combate, inteligencia y reconocimiento, así como a su capacidad de operar de forma autónoma y coordinada, lo que supone una ventaja táctica indiscutible. Diversas potencias internacionales han iniciado ambiciosos programas de investigación y despliegue de enjambres UAV, en un esfuerzo por dominar este emergente campo tecnológico.

Uno de los países más destacados en esta carrera es Turquía, que ha mostrado un importante compromiso presupuestario y operativo con el desarrollo de drones autónomos. En particular, el sistema KARGU, desarrollado por STM (Savunma Teknolojileri Mühendislik), ha sido desplegado con éxito en conflictos como los de Siria y Libia, y su funcionalidad como dron suicida y de ataque coordinado lo convierte en una referencia tecnológica. En septiembre de 2020, Turquía realizó su primera prueba con un enjambre UAV con capacidades de observación y respuesta autónoma, obteniendo resultados positivos en campo abierto. [138]

Estados Unidos, por su parte, lidera el desarrollo tecnológico en el ámbito de la autonomía, la inteligencia artificial aplicada a UAV y la integración de cargas útiles específicas. Ejemplo de ello es el ejercicio "2022 Experimental Demonstration Gateway Exercise", en el desierto de Utah, donde se probaron enjambres de drones con módulos de guerra electrónica, capacidades de



evasión pasiva y cabezas de guerra integradas. Además, programas como el Gremlins Program (DARPA) o Low-Cost Attritable Aircraft Technology (LCAAT) evidencian el interés del Departamento de Defensa en UAV de bajo coste, recuperables y capaces de operar en enjambre.

Rusia, que ha intensificado su inversión en enjambres UAV desde 2017, se ha centrado en el despliegue operativo de estas plataformas en conflictos reales [139]. En Siria, y actualmente en Ucrania, ha utilizado enjambres con funciones de reconocimiento, ataque y saturación electrónica. Destaca el proyecto Staya-93, una plataforma de enjambre que busca garantizar comunicaciones internas resilientes entre nodos UAV, incluso ante contramedidas electrónicas, lo que demuestra la madurez de su desarrollo en entornos hostiles.

En el caso de España, el único enjambre operativo con el que cuenta es el Humming-Prop v2, integrado en el RAAA-71 en noviembre del 2023, así mismo España, participa activamente en proyectos europeos de defensa cooperativa. Bajo la estructura de PESCO (Permanent Structured Cooperation), destacan los siguientes proyectos:

- Next Generation Small RPAS (NGSR) [5]: Liderado por España, este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una nueva generación de UAV tácticos, con enfoque en unidades de brigada y división. Se espera que estos sistemas cuenten con autonomía avanzada, sensores EO/IR, y capacidad de comunicación LOS/BLOS. Su tamaño y arquitectura modular permitirían, en fases futuras, una implementación en configuración de enjambre. Las primeras pruebas de interoperabilidad se prevén para 2024-2025.
- EuroMALE [6]: Proyecto liderado por Alemania, con participación de España, Francia e Italia. Tiene como meta el desarrollo del primer MALE europeo capaz de integrarse en el espacio aéreo convencional. Aunque no se trata de un enjambre, sí representa un avance significativo en autonomía, vigilancia y capacidad operativa europea. España ha invertido alrededor de 1.900 millones de euros en este sistema.



Figura 3: Proyecto "Next Generation Small RPAS (NGSR)". Fuente: [7]

Adicionalmente, bajo el paraguas de PESCO, se encuentra el proyecto "Rotorcraft Docking Station for Drones", liderado por Italia y Francia, cuyo objetivo es el desarrollo de una plataforma aérea nodriza capaz de lanzar, operar y recuperar múltiples mini o micro-UAV. Este concepto es especialmente relevante por su potencial en misiones ISR² y de apoyo en escenarios urbanos o

² Misiones ISR: Operaciones destinadas a la obtención, análisis y distribución de información mediante actividades de inteligencia, vigilancia y reconocimiento, con el fin de apoyar la toma de decisiones.



de acceso denegado³.

En este sentido, entre los programas que podrían interesar para su adquisición en este proyecto destacamos, por un lado, el Humming-Prop v2, dado a su previa adquisición y presente estudio dentro del propio Mando de Artillería Antiaérea (MAAA) y, por otro lado, el NGSR, que al estar liderado por España podría ayudar mucho a su implementación, pero al estar enfocado y desarrollado estos UAS de una manera diferente a la del presente trabajo, baja el interés por el mismo.

Por otro lado, desarrollos como el KARGU turco o el Staya-93 ruso muestran un alto grado de sofisticación y experiencia operativa, pero están más orientados a usos ofensivos en escenarios reales de combate. Su adopción requeriría un proceso más complejo, con inversiones elevadas y posibles acuerdos internacionales que, a corto plazo, podrían dificultar su integración en programas de instrucción españoles.

4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Componentes principales de un UAV

- Estructura o chasis del dron: La estructura o chasis constituye el cuerpo principal del dron, cuya función es albergar y mantener unidos todos los componentes del sistema. La configuración del chasis influye directamente en el rendimiento aerodinámico del UAV, así como en su tamaño y resistencia.
- Brazos: Los brazos son las extensiones que conectan los motores con el cuerpo principal del dron. Su longitud y disposición afectan la maniobrabilidad y estabilidad del vuelo. En algunos diseños, los brazos están integrados en la propia estructura del chasis.
- Motores: Los motores son elementos esenciales, responsables de generar la fuerza propulsora necesaria para el vuelo. Se sitúan generalmente en los extremos de los brazos y actúan en conjunto con las hélices para elevar y mantener en vuelo el dron.
- Hélices: Las hélices transforman la energía generada por los motores en sustentación. Normalmente, cada motor tiene una hélice acoplada, existiendo pares estándar (giro anti horario) e inversos, que proporcionan equilibrio y estabilidad al sistema.
- Batería: La batería suministra energía a todos los sistemas eléctricos y electrónicos del dron. Las más utilizadas son las de polímero de litio (Li-po), debido a su ligereza, eficiencia y capacidad de proporcionar alta potencia en vuelos prolongados.
- Placa controladora de vuelo: Constituye el “cerebro” del UAV. Recibe señales del control remoto, sensores, GPS y otros subsistemas, gestionando las órdenes de vuelo. Integra componentes como la brújula, el giroscopio y acelerómetros, esenciales para mantener el control y la estabilidad del dron.
- Sensores: Los sensores son fundamentales para optimizar la navegación y operación del UAV. Entre los más comunes se encuentran:
 - Sensor de velocidad: mide la velocidad a partir de la presión del aire.
 - Sensores de altitud: determinan la altura respecto al suelo y al nivel del mar.

³ Acceso denegado: situaciones operativas en las que un adversario dispone de capacidades militares, tecnológicas o geográficas que dificultan o impiden el despliegue y actuación de fuerzas propias en una zona determinada, limitando el acceso y la libertad de maniobra.



- Sensores de posición: permiten conocer la localización en tiempo real mediante GPS o sistemas similares.
- Cámara: Elemento fundamental en UAV destinados a fotografía o videografía aérea. No todos los drones la incorporan de serie, pero su instalación suele estar prevista en el diseño estructural.
- Gimbal (Estabilizador): Permite estabilizar la cámara durante el vuelo, minimizando vibraciones y asegurando imágenes fluidas. Es indispensable para usos profesionales del dron en grabación y observación.
- Variadores de velocidad (ESC): Los controladores electrónicos de velocidad (ESC) regulan la energía que llega a cada motor, permitiendo un control preciso de la velocidad y dirección del vuelo.
- Estación de control: Incluye el transmisor/receptor de radiofrecuencia, sistema de gestión de datos y el control remoto, que permite pilotar el UAV con precisión. Es el nexo de comunicación entre el operador y el dron.
- Tren de aterrizaje: Situado en la parte inferior del UAV, permite que este aterrice de forma segura, evitando impactos directos contra el suelo. También protege elementos suspendidos, como cámaras o sensores.
- Accesorios adicionales: Según la misión, pueden integrarse elementos específicos como sistemas de carga, proyectores, dispositivos de pulverización o módulos de comunicación. Estos accesorios amplían las capacidades operativas del UAV.



Figura 4: Partes de un Dron. Fuente [2]

- 1- Chasis
- 2- Brazos
- 3- Hélices
- 4- Variador de velocidad
- 5- Cámara
- 6- Tren de aterrizaje
- 7- Motor
- 8- Gimbal



4.2. Empleo previsto de los UAV

4.2.1. Empleo general

Los enjambres de UAV representan una de las tecnologías más revolucionarias para la instrucción táctica de oficiales en defensa aérea, proporcionando capacidades de entrenamiento sin precedentes que simulan amenazas complejas del campo de batalla moderno. Esta tecnología revolucionaria permite desarrollar habilidades críticas mediante sistemas de entrenamiento que pueden coordinar hasta 100 drones simultáneamente, replicando escenarios de amenaza multi-dominio donde cada dron puede asumir roles específicos como reconocimiento, señuelo, ataque directo o guerra electrónica.

Los sistemas de entrenamiento basados en enjambres incorporan algoritmos de inteligencia artificial que permiten comportamientos adaptativos y autónomos, proporcionando experiencia práctica con tecnologías emergentes que incluyen swarm intelligence⁴, machine learning y toma de decisiones autónomas. Esta capacidad de adaptación dinámica a las contramedidas implementadas por los defensores ofrece un entrenamiento más desafiante y realista. La implementación de estos sistemas permite desarrollar protocolos de respuesta rápida donde los usuarios deben detectar, identificar y neutralizar amenazas en el menor tiempo posible preparándolos para operar sistemas como el M-LIDS (Mobile Low, Slow Unmanned Aircraft Integrated Defense System).

Los enjambres proporcionan capacidades avanzadas de recolección de datos durante los ejercicios, registrando métricas detalladas sobre tiempos de respuesta, efectividad de las contramedidas y precisión en la toma de decisiones. Esta tecnología prepara a los militares para amenazas emergentes del futuro campo de batalla, incluyendo enjambres completamente autónomos, sistemas de guerra electrónica avanzados y tácticas de saturación de las defensas aéreas, desarrollando capacidades críticas en la toma de decisiones bajo presión, manejo de sistemas tecnológicamente complejos y adaptación a amenazas emergentes e imprevisibles para enfrentar los desafíos del campo de batalla moderno y futuro.

4.2.2. Enjambres UAV en operaciones de Defensa Aérea

Los enjambres de UAV representan una de las amenazas más desafiantes y evolutivas en las operaciones de defensa aérea contemporáneas. Estos sistemas coordinados de múltiples drones autónomos están transformando radicalmente tanto las capacidades ofensivas como las estrategias defensivas en el campo de batalla moderno, exigiendo un replanteamiento fundamental de las doctrinas de Defensa Aérea tradicionales.

Los enjambres de UAV han demostrado ser especialmente efectivos en tácticas de saturación que abruman las defensas enemigas mediante el volumen de amenazas simultáneas. Empresas, como MBDA, han desarrollado sistemas de drones autónomos capaces de operar en enjambres con cargas explosivas de 40 kg y alcances de 500 km, específicamente diseñados para saturar y atacar instalaciones de defensa aérea enemigas [40]. Estas operaciones coordinadas pueden forzar a las defensas adversarias a revelar sus posiciones, facilitando ataques de seguimiento con otros sistemas de largo alcance.

Los enjambres también pueden ejecutar misiones de reconocimiento coordinado donde

⁴ *Swarm intelligence: paradigma de inteligencia colectiva inspirado en el comportamiento coordinado de enjambres naturales (como hormigas, abejas o aves), en el que múltiples agentes autónomos colaboran de forma descentralizada para alcanzar objetivos comunes mediante interacciones locales simples.*



algunos drones realizan tareas de exploración mientras que otros transmiten datos en tiempo real. Esta capacidad permite la identificación y designación precisa de objetivos, facilitando ataques posteriores más efectivos [41]. La inteligencia artificial integrada permite que estos sistemas localicen activos de valor y, si es necesario, los ataquen autónomamente.

Así mismo, entre las diferentes capacidades que los enjambres UAV pueden realizar encontramos tácticas de saturación, lanzando volúmenes masivos de drones con cargas explosivas para abrumar defensas y revelar posiciones enemigas, ataques multi-vectoriales⁵, atacando desde diversas direcciones para fragmentar la cobertura defensiva, y estrategias de desgaste, obligando al adversario a malgastar costosa munición antiaérea contra drones económicos. Además, realizan las ya mencionadas misiones de reconocimiento y designación coordinada [40] [42].

4.2.3. Necesidades en la instrucción de la Defensa Aérea

El creciente empleo de sistemas aéreos no tripulados en los conflictos contemporáneos ha modificado de manera significativa el concepto de Defensa Aérea. Las recientes experiencias evidencian que los UAV, tanto de reconocimiento como de ataque, se han convertido en una amenaza persistente, de bajo coste y gran adaptabilidad. Para el Ejército de Tierra español, esta realidad plantea la necesidad urgente de adaptar la instrucción de las unidades de Artillería Antiaérea a un nuevo paradigma en el que los UAV, en todas sus variantes, son ya uno de los principales retos a combatir y en el que actualmente las unidades no disponen de maneras para hacerlo.

Actualmente, los sistemas tradicionales como NASAMS o HAWK están diseñados para contrarrestar aeronaves tripuladas o misiles de medio y largo alcance, pero no resultan eficientes frente a enjambres de UAV pequeños, de baja firma térmica y radar, operando a baja cota. En este contexto, la instrucción debe orientarse hacia la detección temprana, clasificación e interceptación específica de estos aparatos, integrando sistemas de defensa de corto alcance (VSHORAD) y soluciones dedicadas a la lucha contra UAS (C-UAS).

El ejército español ha incorporado recientemente el sistema Cervus III, desarrollado por la empresa TRC con la participación de Escribano y el Ejército de Tierra, y actualmente en fase final de desarrollo en el RAAA-71, como una herramienta esencial en la lucha contra UAV [44]. Este sistema combina sensores electroópticos, radares ligeros y capacidades de interferencia electrónica para neutralizar drones en tiempo real, lo cual significaría un gran avance para repeler este tipo de amenazas.

Las principales necesidades de instrucción, por tanto, se centran en desarrollar un entrenamiento específico en detección e identificación, aprovechando tanto simuladores como ejercicios en campo con drones reales, lo que permitirá a los operadores familiarizarse con los patrones de vuelo y las características técnicas de estas amenazas. Es igualmente esencial reforzar la capacitación en guerra electrónica y en el empleo de contramedidas de interferencia, ya que el Cervus III basa gran parte de su eficacia en la neutralización no cinética (softkill⁶). A ello debe sumarse la integración táctica con los sistemas de defensa aérea ya existentes, garantizando una respuesta escalonada que combine los medios tradicionales de Artillería Antiaérea con las nuevas soluciones C-UAS [45].

⁵ Ataques multivectoriales: acciones ofensivas coordinadas que combinan distintos tipos de vectores (por ejemplo, aéreo, terrestre, cibernético o electromagnético) de forma simultánea o secuencial, con el objetivo de saturar defensas, explotar vulnerabilidades diversas y aumentar la eficacia global del ataque.

⁶ Softkill: métodos, como la guerra electrónica o el interferido de señales, destinados a neutralizar una amenaza sin destruirla físicamente



Finalmente, es imprescindible adaptar la doctrina y establecer procedimientos que apoyen y aceleren la toma de decisiones, dado que estas amenazas pueden modificar su comportamiento de forma repentina y operan en entornos donde la reacción rápida y coordinada resulta determinante para el éxito de la defensa aérea [46]. Todo ello, sumado a la ausencia de información y de una instrucción clara sobre la respuesta operativa ante este tipo de amenazas genera una brecha de conocimiento que aumenta la urgencia de establecer protocolos de actuación y programas de adiestramiento.

4.3. La inteligencia Artificial

4.3.1. Definición

La Inteligencia Artificial (IA) no cuenta con una única definición consensuada por la comunidad científica. Sin embargo, puede entenderse como el conjunto de sistemas o programas capaces de simular procesos cognitivos humanos, tales como el razonamiento, el aprendizaje, la planificación o la percepción. Según IBM, se define como “la combinación de algoritmos diseñados para crear máquinas que presenten capacidades similares a las humanas” [8], mientras que la Comisión Europea la describe como “sistemas que muestran un comportamiento inteligente al analizar su entorno y tomar decisiones con cierto grado de autonomía para alcanzar objetivos específicos” [9].

Esta tecnología tiene como finalidad reproducir las capacidades humanas, permitiendo a las máquinas desarrollar funciones propias del pensamiento racional. Actualmente, su aplicación es transversal y se extiende desde la medicina hasta el entretenimiento, pasando por la defensa, la industria o la educación. Sus avances están relacionados de forma directa con el desarrollo de algoritmos y el acceso a grandes volúmenes de datos (Big Data), así como con la capacidad de procesamiento de los sistemas informáticos.

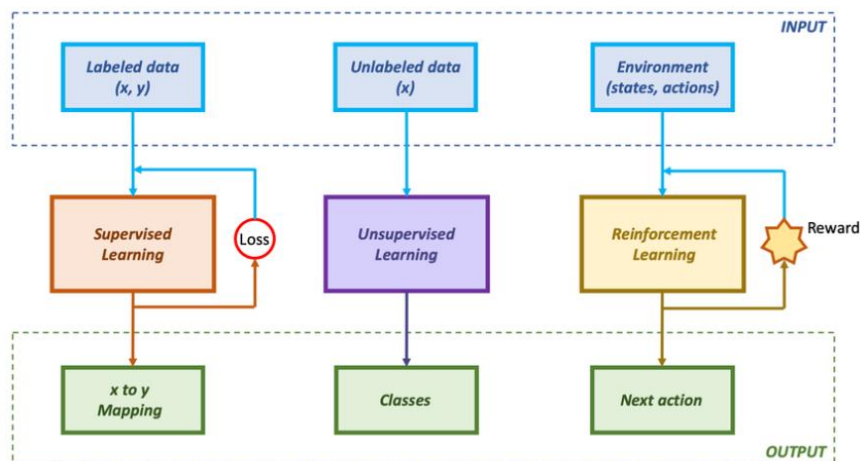


Figura 5: Tipos de aprendizaje automático: supervisado, no supervisado y refuerzo. Fuente: [14]

4.3.2. Uso de la IA en drones

El desarrollo de la Inteligencia Artificial (IA) ha supuesto un punto de inflexión en la evolución de los sistemas no tripulados, especialmente en el ámbito militar. Su integración en los UAV ha posibilitado la aparición de plataformas cada vez más autónomas, capaces de realizar funciones que anteriormente requerían la intervención humana constante y, por tanto, una disminución en las bajas humanas. Uno de los ejemplos más representativos es el MQ-20 Avenger, desarrollado por Estados Unidos, que durante 2025 participó en ejercicios como Orange Flag 25-1 en la Base Edwards (19-21 de febrero), donde fue equipado con el software de autonomía “Hivemind” de



Shield AI. En esas pruebas, el Avenger demostró su capacidad para despegar, navegar, ejecutar maniobras complejas y simular interceptaciones de objetivos de forma plenamente autónoma [15].

Por otra parte, el STM Kargu-2, un dron turco tipo “kamikaze” [16], ganó notoriedad en marzo de 2020, cuando un informe del Panel de Expertos de la ONU confirmó su uso autónomo en Libia. Se detectó que operó sin conexión remota, localizando y atacando objetivos utilizando algoritmos de “machine learning” montados en su plataforma.

La IA no solo habilita autonomía en vuelo, sino que potencia la coordinación en enjambres UAV mediante redes neuronales que distribuyen tareas y adaptan acciones a partir del entorno. Esto mejora notablemente misiones de vigilancia, reconocimiento y ataque coordinado. Además, sistemas como Staya-93 (Rusia) y las pruebas de Avenger [18] cuentan con mecanismos de resiliencia frente a contramedidas electrónicas y pérdida de señal.

El aprendizaje automático estructurado en modalidades supervisado, no supervisado y por refuerzo permite a estos sistemas mejorar su eficiencia con el tiempo, reduciendo errores y superando capacidades humanas. Un ejemplo lo encontramos en 2021, cuando un dron autónomo superó a dos pilotos profesionales en una carrera aérea de precisión en Zúrich [17], demostrando su capacidad de procesamiento y reacción en tiempo real.

En la actualidad, es necesario que exista la figura de un supervisor, debido a que el tipo de aprendizaje que utilizan los drones autónomos es de aprendizaje supervisado. Aun así, existe el miedo en países donde esta tecnología no ha sido desarrollada, debido a su potencial. Con esto, se puede observar que, cada vez de manera más frecuente, se usa menos el trabajo humano para obtener buenos resultados, dejando esta labor a la Inteligencia Artificial. Es por ello que los trabajos en esta dirección son imparables; los UAV con IA están ya siendo integrados en diversas fuerzas armadas alrededor del globo y constituyen un factor de éxito en los conflictos modernos.

4.4. Obtención del UAV

Teniendo como base toda la información anterior, se pueden comenzar a elaborar y fabricar drones que serán utilizados posteriormente en el enjambre. Se busca obtener un UAV que sirva como simulación de aeronaves y enjambres enemigos para ver las respuestas y nuevas doctrinas de la Defensa Aérea del ejército, capaz de cumplir con los requisitos marcados para su incorporación a la Artillería española. Para ello, se deberá prestar especial atención a un factor clave del proceso: cuál va a ser la obtención del producto final.

Durante la elaboración del producto, se han considerado varias alternativas: por un lado, la adquisición de un dron civil del mercado y su posterior adaptación para usos militares; por otro, el diseño y fabricación propia mediante impresión 3D, lo que permitiría ajustarse a requisitos específicos. Asimismo, se contempló la posibilidad de adquirir enjambres UAV ya desarrollados por otros ejércitos. Sin embargo, esta última opción ha sido descartada, dado que el objetivo principal del proyecto es desarrollar un enjambre original y adaptado a las necesidades particulares de las Fuerzas Armadas nacionales.

La impresión 3D es una técnica ampliamente utilizada y en expansión tanto en el ámbito civil como en el militar, especialmente para la construcción de maquetas, piezas de repuesto y la creación o sustitución rápida de componentes. Algunas unidades militares ya cuentan con impresoras 3D, siendo un ejemplo destacado el Regimiento de Artillería Antiaérea RAAA-94 de Las Palmas, que emplea esta tecnología para fabricar sus propios aviones teledirigidos. Esta experiencia demuestra que la fabricación mediante impresión 3D es una opción altamente viable y adecuada para el desarrollo del UAV en este proyecto, proporcionando flexibilidad, rapidez y adaptabilidad frente a métodos tradicionales de producción. El Regimiento de Artillería Antiaérea RAAA-74 dispone de una sala equipada con el material y software necesarios para la fabricación

de piezas mediante impresión 3D. Según el personal responsable, la ejecución de estos trabajos en las instalaciones no presenta inconvenientes, ya que únicamente requiere conocimientos informáticos básicos y manejo adecuado de las aplicaciones y equipos correspondientes.

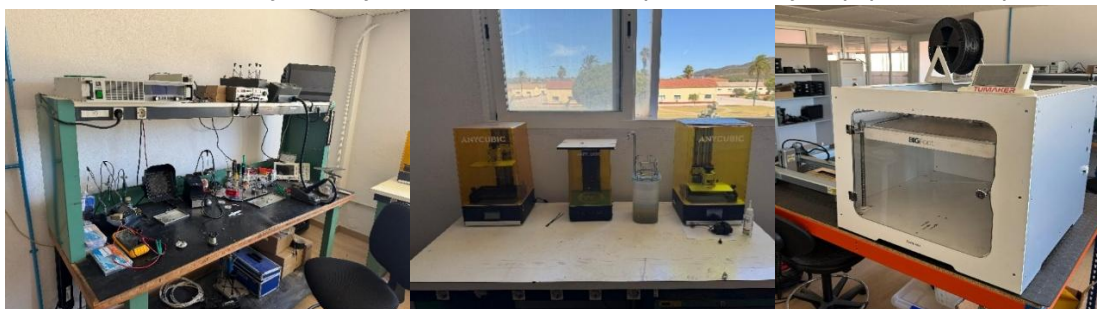


Figura 6: Sala de Impresión 3D del RAAA-74. Fuente: Elaboración propia

Pese a ello solo se contempla, el uso de la impresión 3D en el UAV, para la sustitución de pequeñas piezas en caso de rotura como elementos de la propia carcasa o hélices y no para su fabricación completa debido a la necesidad de contar con elementos electrónicos y optrónicos para su funcionamiento. Por tanto, se utilizará para la elaboración de material fungible para el dron, como los materiales mencionados (Ver Anexo X: Realización de piezas por impresión 3D).

La elección entre las dos opciones restantes se realizará a partir del estudio que se ha hecho sobre ambas opciones, comparando los puntos más y menos fuertes de cada uno de ellos. Para conocer lo que se necesita en el UAV y cómo abordarlo, se ha realizado una Casa de la Calidad (Ver Anexo VII: Casa de la Calidad), que muestra la importancia y lo que puede aportar, en mayor medida, un dron realizado por piezas, el OFFSET Program, de Estados Unidos, (Ver Figura 7) de la marca DARPA, el modelo UAV Navigation LISS, español (Ver Figura 8) de la empresa Esribano y el modelo HUMMING-PROP V2, de la empresa española SCR (Ver Figura 9), este último siendo la última incorporación al ejército y sirviendo de precedente, siendo las tres algunas de las empresas con mayor renombre dentro del mundo de los drones civiles. Destacando la empresa SCR, de la cual se destaca la previa experiencia en colaboraciones con el ejército español, en concreto con el Ejército del Aire y del Espacio con los blancos aéreos SCRAB [59]. Para ello va a ser muy importante el conocer las especificaciones de ambos para diferenciarlos mejor (Ver Tabla 1). Para la elaboración de la Casa de la Calidad se necesitó realizar un estudio con personal que trabaja directamente con drones para elegir las mejores características.

Características	DARPA OFFSET	UAV Navigation LISS	HUMMING-PROP V2
Peso	1-3 kg	5-7 kg	6 kg
Nº drones enjambre	250	32	70
Autonomía de vuelo	3.5 horas	4 horas	40 minutos
Altura máxima	No disponible	11000 metros	900 metros
Tª funcionamiento	No disponible	-20 °C a 50 °C	-10 °C a 50 °C
Alcance máximo	100 m	4 km (con control remoto)	10 km



Francisco José Culiáñez Alcolea

Programabilidad	<i>Muy alta (arquitectura abierta)</i>	<i>Alta (software Visionair, APIs abiertas)</i>	<i>Alta</i>
Coste unitario	<i>7 200 000 USD</i>	<i>50 000–100 000 USD</i>	<i>2.170–2.560 €</i>

Tabla 1: Características específicas del DARPA OFFSET Program, UAV Navigation LISS y HUMMING-PROP V2. Fuente: [19] / [20] / [21]



Figura 7: DARPA OFFSET Program. Fuente: [22]



Figura 8: UAV Navigation LISS. Fuente: [23]



Figura 9: Humming-Prop v2. Fuente: [24]

En vista de los resultados obtenidos durante el estudio, se concluye que existen varios factores determinantes en el diseño y desarrollo de un enjambre UAV, siendo el coste de fabricación y el software empleado dos de los elementos más críticos. A diferencia de un dron individual, un sistema de enjambre UAV implica la producción y coordinación de múltiples unidades, lo que incrementa de forma significativa el presupuesto requerido para la adquisición. Asimismo, el software representa el núcleo operativo del sistema, ya que cualquier error o carencia en este componente comprometería el funcionamiento general del enjambre. Las



actualizaciones periódicas del software son, por tanto, esenciales para asegurar una operatividad eficaz y una adaptación constante a nuevos escenarios o amenazas.

En cuanto a las capacidades técnicas, la altitud y el alcance de los mismos están directamente condicionados por la potencia y estabilidad de la señal de mando que reciben desde tierra. Por otro lado, la autonomía depende principalmente de su configuración electrónica interna y de la batería instalada. No obstante, cabe destacar que el tiempo de vuelo no siempre se corresponde de forma directa con la capacidad nominal de la batería, ya que ciertas misiones pueden realizarse en posición estática o con mínimos requerimientos energéticos.

El análisis comparativo realizado, tomando como referencia el DARPA OFFSET Program, el sistema de navegación inercial UAV Navigation LISS y el modelo HUMMING-PROP V2, pone de manifiesto la tendencia actual hacia drones ligeros, con baja carga estructural ($\approx 3,2$ kg en el HUMMING-PROP V2) y con capacidades de operación coordinada en enjambre gracias a enlaces de comunicaciones en 2,4 GHz y software especializado. Estas características, sumadas a los resultados obtenidos en la elaboración propia, refuerzan la importancia de integrar plataformas con alta maniobrabilidad y rápida capacidad de despliegue, elementos esenciales para misiones de observación, entrenamiento antiaéreo y operaciones tácticas en entornos cambiantes.

Por otro lado, y en relación con la versatilidad operativa, resulta fundamental que cada UAV pueda ser programado o configurado para realizar tareas diversas, permitiendo formar enjambres mixtos con funciones de observación, combate e inteligencia. Para garantizar una operatividad fluida, especialmente en maniobras coordinadas, el volumen y el peso del dron deben ser reducidos, favoreciendo así la agilidad, el transporte y el despliegue rápido en el entorno táctico.

Por último, tanto el tiempo de aprendizaje necesario para operar los drones como la resistencia estructural del sistema son aspectos también a destacar. Se debe procurar que el diseño sea lo suficientemente intuitivo como para facilitar una formación rápida de los operadores. A su vez, los drones deben contar con una capacidad de absorción de impactos adecuada para evitar que posibles colisiones o aterrizajes forzosos no supongan daños críticos al mismo.

Para complementar la decisión del método de realización del producto, se ha realizado un Gráfico Radial, con el fin de comparar los atributos que son necesarios para la realización del UAV (Ver Figura 10).

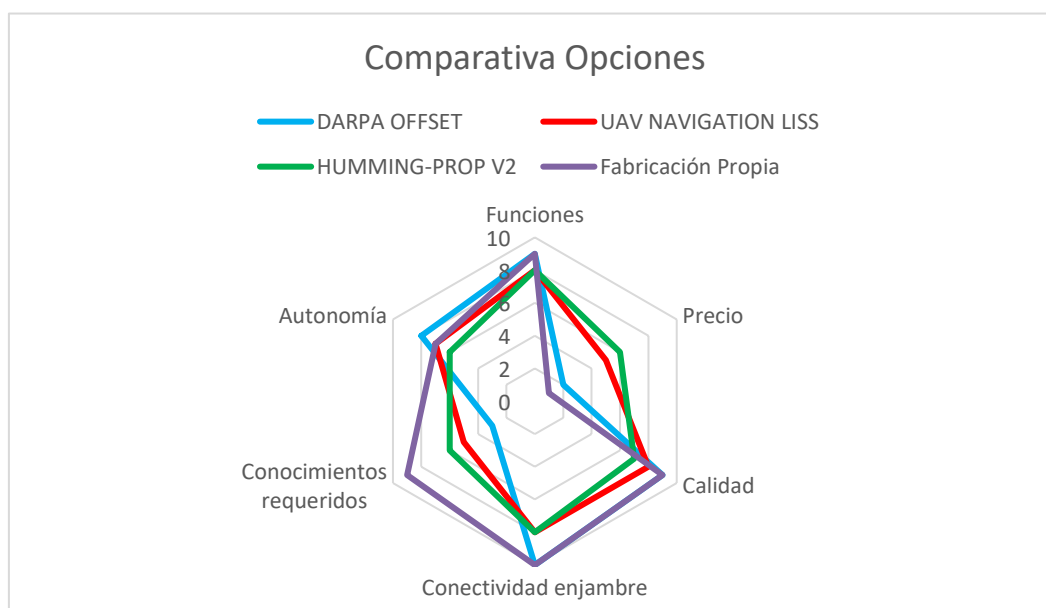


Figura 10: Gráfico de Líneas. Fuente: Elaboración Propia



A partir del análisis comparativo de DARPA OFFSET, UAV Navigation LISS, HUMMING-PROP V2 y el dron de fabricación propia, queda patente que la conectividad en enjambre constituye el pilar sobre el que se sustentan las capacidades operacionales de cada sistema. OFFSET ofrece una arquitectura de malla altamente sofisticada, ideal para escenarios urbanos de alta densidad, mientras que LISS equilibra robustez y fiabilidad en entornos GPS-denegados. HUMMING-PROP V2, orientado principalmente a la formación y entrenamiento antiaéreo, dispone de conectividad en 2,4 GHz que permite coordinación inter-dron, aunque con limitaciones en comparación con arquitecturas más avanzadas. El dron casero, aun con conectividad Wi-Fi básica, facilita la implementación de redes “mesh”⁷ abiertas y configurables, adaptándose a proyectos de simulación y formación interna.

En términos económicos, el dron de fabricación propia destaca por su coste simbólico en comparación con las plataformas profesionales, lo que permite reorientar los recursos hacia sensores y sistemas de comunicación de mayor exigencia. Por su parte, HUMMING-PROP V2 se sitúa en un rango de precio intermedio (≈ 10.284 € unidad), con producción estandarizada, pero con posibilidades limitadas de modificación técnica, mientras que OFFSET y LISS requieren inversiones y entrenamientos especializados, justificables únicamente en misiones de alta complejidad.

Por otro lado, la curva de aprendizaje y las capacidades autónomas definen el uso táctico de cada sistema: HUMMING-PROP V2 resulta accesible tras un adiestramiento básico gracias a su interfaz de control simplificada; el dron propio exige conocimientos de electrónica y programación, pero se beneficia del soporte comunitario open-source⁸; y OFFSET y LISS, con sus avanzados algoritmos de IA y navegación autónoma, demandan perfiles altamente especializados y largos periodos de entrenamiento. Estos matices resultan esenciales para diseñar enjambres UAV adaptados a la instrucción de oficiales tácticos en Defensa Aérea.

Finalmente, se realizó una comparativa Make or Buy (Ver Anexo VIII: Análisis “Make or Buy”) sobre cuál de las dos opciones sería la mejor opción, comprar o fabricar.

El análisis cualitativo destaca que el desarrollo propio de UAVs fomenta no solo la personalización y eficiencia operativa, sino también la formación táctica del personal y la independencia tecnológica, factores alineados con las directrices de modernización del Ejército de Tierra. Por tanto, el HUMMING-PROP v2 se presenta como la opción más adecuada para programas de formación y entrenamiento en defensa aérea. Su coste intermedio, considerablemente inferior al de sistemas de alta complejidad, permite la adquisición de múltiples unidades sin comprometer el presupuesto. Además, su capacidad de operación en enjambre y su interfaz accesible, que reduce significativamente los tiempos de adiestramiento, lo convierten en una plataforma idónea para el proyecto en cuestión.

Un aspecto clave que refuerza su elección es que el Ejército de Tierra ya ha incorporado este sistema en sus programas de instrucción, lo que permite consultar datos reales de uso y extraer lecciones aprendidas para optimizar su integración en nuevos proyectos. Aunque no alcanza el nivel de autonomía ni las capacidades de IA de sistemas más avanzados, su equilibrio entre funcionalidad, coste y experiencia operativa previa lo posiciona como la mejor alternativa para proyectos de instrucción y simulación táctica.

⁷ Redes mesh: arquitecturas de comunicación en las que cada nodo actúa como emisor, receptor y repetidor, permitiendo una conexión descentralizada, flexible y redundante, en la que los datos pueden transmitirse por múltiples rutas sin depender de una única infraestructura central.

⁸ Open source: modelo de desarrollo y distribución basado en el acceso abierto al código fuente o a la información técnica, que permite su uso, modificación y redistribución libre por parte de la comunidad, favoreciendo la colaboración y la innovación colectiva.



4.5. Aplicación de enjambres UAV en la instrucción táctica

4.5.1. Simulación de amenazas de escenarios realistas

La instrucción táctica moderna requiere exponer al personal a amenazas realistas y complejas. Los enjambres de UAV constituyen una herramienta ideal para ello, al permitir simular ataques masivos, coordinados y adaptativos inspirados en conflictos reales como los observados en Ucrania. En este apartado se va a detallar cuál va a ser el diseño del vuelo de los UAV para representar diferentes amenazas tácticas en ejercicios prácticos, basándose en principios de saturación, coordinación distribuida, inteligencia colectiva y patrones de vuelo avanzados.

- **Principios de comportamiento del enjambre en instrucción**

Los drones se programarán siguiendo los principios de operación de un enjambre real, entre ellos [84]:

- Saturación de defensas: ataques con múltiples UAVs en simultáneo, desde distintos ángulos, que buscan sobrepasar la capacidad de medios y reacción del personal [85].
- Descentralización operativa: cada dron toma decisiones locales, pero actúa en coordinación con el resto mediante algoritmos de control distribuido, asegurando resiliencia ante bajas o interferencias.
- Inteligencia colectiva: el enjambre comparte información y adapta su comportamiento global en función del entorno o la respuesta del personal, emulando capacidades emergentes de ataque coordinado [86].

- **Modos de vuelo para la simulación de amenazas**

Cada ejercicio estará diseñado para simular un tipo distinto de amenaza, con sus correspondientes patrones de vuelo y configuración del enjambre:

- Ataque de saturación masiva: los drones se lanzan en oleadas coordinadas desde múltiples vectores de ataque. Se emplearán trayectorias simultáneas y cruzadas que busquen abrumar la capacidad de detección y neutralización del personal. Esta táctica reproducirá ataques reales como los desplegados por Rusia con más de 400 UAVs Shahed simultáneamente [85].
- Ataque FPV coordinado: se utilizarán drones FPV en pequeños grupos (5–12 unidades) que simulan ataques kamikaze dirigidos contra posiciones fijas. Serán precedidos por drones de reconocimiento que identifican el objetivo. El vuelo se realiza a muy baja altitud y alta velocidad, con patrones evasivos hasta el impacto simulado [87].
- Ataques escalonados: el enjambre se divide en oleadas sucesivas. La primera actúa como fuerza de desgaste o engaño; las siguientes simulan drones equipados con cargas explosivas para penetrar posiciones debilitadas. Este esquema permite entrenar la resistencia sostenida y la adaptación defensiva progresiva.
- Formaciones geométricas adaptativas: los drones adoptarán distintas geometrías de vuelo (líneas, círculos, cuñas, etc.) para simular formaciones tácticas de asedio, penetración o cobertura. La transición entre formaciones se programará según los movimientos del personal o señales externas, recreando una amenaza dinámica [88].
- Trayectorias caóticas (no geométricas): algunos ejercicios simularán ataques no convencionales con drones que siguen patrones impredecibles, ocultando su lógica interna mediante algoritmos sofisticados que dificultan su anticipación y neutralización.



- **Coordinación e inteligencia artificial en vuelo**
 - Control híbrido: la operación del enjambre se realizará mediante una arquitectura híbrida, con instrucciones generales emitidas por un operador y decisiones tácticas autónomas gestionadas por IA embarcada en cada dron [89].
 - Fusión de sensores y reconocimiento colaborativo: los drones compartirán información entre sí para simular una red distribuida de vigilancia y selección de blancos. Esto permitirá evaluar la reacción del personal ante amenazas que cambian de posición, velocidad o altitud en tiempo real [90].
 - Adaptación al comportamiento humano: los drones ajustarán su trayectoria al detectar movimientos o reacciones del personal, como una retirada o agrupamiento defensivo. Algunos simularán flanqueos, seguimiento o ataques por la retaguardia [91].
- **Parámetros técnicos del vuelo**
 - Altitud: los drones volarán principalmente entre 1 y 10 metros (vuelos rasantes), imitando escenarios urbanos [92] o de bosque bajo. En zonas abiertas podrán alcanzar hasta 30 metros si se simulan UAVs de observación. En general, en las clasificaciones generales de UAV los pequeños drones operan por debajo de 1 200 pies (~365 m) como límite superior.
 - Velocidad: la velocidad se ajustará entre los 2 m/s (vigilancia, patrullaje) y los 15 m/s (incursiones rápidas o FPV), dependiendo de la función táctica y del tipo de simulación. Algunos estudios de control colaborativo mencionan velocidades máximas usadas en simulaciones, como entre los 8 y 12 m/s, utilizadas en algoritmos de navegación cooperativa entre drones [93].
 - Duración: los ejercicios durarán entre 5 y 15 minutos por oleada, con posibilidad de repetir en distintos formatos para reforzar la instrucción y aumentar progresivamente el nivel de dificultad. Hay diversos estudios y ejercicios de otros ejércitos en los que se está entrenando que los soldados deben reaccionar en plazos de 30 segundos a 2 minutos ante ataques de drones, lo que apunta a que sean entrenamientos muy dinámicos y breves, pero con una coordinación esencial [94].
- **Composición del enjambre**
 - Número de UAVs: entre 5 y 20 drones por ejercicio, según el escenario, la fase de formación y el espacio disponible. Está comprobado que pueden llegar a hacerse simulaciones con hasta 100-130 drones simultáneamente, pero nuestro empleo no necesita de tantos recursos, pudiendo gestionarse igualmente con un número reducido de los mismos.
 - Roles diferenciados: el enjambre incluirá UAVs de reconocimiento (que detectan y transmiten información), UAVs hostiles (simulan ataque o intrusión) y UAVs neutros (que sirven como distractores o parte del entorno). Un trabajo reciente de Deep Reinforcement Learning [95] (enero 2025) explica sistemas híbridos donde cada UAV cumple diferentes roles, bajo la coordinación de un controlador central que distribuye tareas
 - Formaciones típicas en ejercicios [96]:
 - Formación de asedio: drones rodean una patrulla para simular hostigamiento desde 360°.
 - Enjambre cerrado: todos los UAVs convergen sobre un punto defensivo, simulando un asalto sincronizado.
 - Colmena dispersa: UAVs individuales actúan de forma autónoma y aleatoria,



representando amenazas de baja intensidad y difícil localización.

- **Evaluación de la respuesta y aprendizaje**

Todos los vuelos serán grabados desde el dron y desde estaciones de control y observación, con sensores de proximidad y seguimiento. Las respuestas del personal (tiempo de reacción, rutas de evasión, comunicaciones, uso de coberturas) serán analizadas posteriormente para evaluar el rendimiento individual y colectivo. Los ejercicios podrán repetirse con variaciones en parámetros como número de UAVs, velocidad, altitud o comportamiento, promoviendo el aprendizaje progresivo y la adaptación táctica. A su vez, también se podrán modificar los diferentes escenarios, desde extensiones amplias de terreno, hasta zonas urbanizadas o bosques frondosos, dependiendo de la instrucción necesaria y objetivos requeridos a alcanzar.

Modo de Vuelo	N.º UAVs	Objetivo Táctico	Duración estimada
Ataque de saturación	15-20	<i>Evaluar reacción ante ataque múltiple</i>	10 min
FPV coordinado	5-12	<i>Neutralización de punto fijo</i>	3-5 min
Formación de asedio	10-15	<i>Simulación de hostigamiento 360°</i>	7 min
Ataques escalonados	10-20	<i>Desgastar defensas mediante oleadas sucesivas</i>	8-12 min
Trayectorias caóticas	5-10	<i>Simular amenazas impredecibles y forzar vigilancia activa</i>	5-7 min

Tabla 2: Resumen Simulaciones. Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Herramientas y plataformas de entrenamiento

Para llevar a cabo los ejercicios de instrucción táctica con enjambres UAV, se emplearán drones del modelo Humming Prop V2. Las herramientas y plataformas seleccionadas se orientan a facilitar la planificación, ejecución y control de los entrenamientos, adaptándose a las características operativas del sistema y a las necesidades del entorno de instrucción. A continuación, se describen los recursos principales que permitirán coordinar el comportamiento del enjambre, simular amenazas complementarias y garantizar la conectividad y supervisión durante el ejercicio.

- **Herramientas de control y coordinación del enjambre**

El control del enjambre se realizará mediante plataformas compatibles con el sistema Humming Prop V2, priorizando soluciones que permitan gestionar múltiples UAV de forma coordinada en tiempo real, tanto en entornos simulados como en campo abierto. A continuación, se detallan varias herramientas, tanto comerciales como de código abierto, que pueden ser empleadas en el contexto de la instrucción táctica:

Entre las opciones comerciales destaca SwarmC2, un sistema de mando y control avanzado desarrollado por U-Defenses, orientado a operaciones con enjambres en escenarios complejos. SwarmC2 permite la planificación y gestión dinámica de misiones, la reconfiguración sobre la



marcha (retasking⁹), el funcionamiento en entornos sin señal GNSS y la integración con sistemas de mando como ATAK. Además, proporciona interfaces intuitivas para operadores y capacidades de comunicación resiliente basadas en redes malladas [97]. Como alternativa de código abierto, se puede emplear swarmOS, una plataforma modular basada en Linux, utilizada en proyectos artísticos y de investigación, que permite la coordinación de múltiples UAV reales o simulados. SwarmOS incluye una interfaz gráfica, renderizado 3D del enjambre y capacidad de grabación para análisis posterior [98].

Finalmente, para el diseño y análisis previo de estrategias de enjambre, puede utilizarse SwarmLab, un entorno de simulación en MATLAB orientado a la validación de algoritmos de control (como Olfati-Saber o Vasarhelyi), con métricas detalladas sobre cohesión, alineamiento y eficiencia táctica del grupo [99].

La selección de estas herramientas dependerá de los requisitos específicos del ejercicio, el número de unidades a desplegar y las condiciones del entorno de instrucción. Se priorizarán aquellas que permitan control autónomo, modificación en tiempo real y evaluación posterior del comportamiento del enjambre, manteniendo compatibilidad con el sistema adquirido.

- **Simulación aumentada complementaria (opcional)**

Para enriquecer la instrucción táctica sin incrementar el número de drones físicos, se proponen herramientas de realidad aumentada (RA), aumentos visuales y efectos complementarios que refuerzan la percepción de amenaza en el campo de instrucción.

En primer lugar, se pueden emplear dispositivos de realidad aumentada o realidad mixta, como el Microsoft HoloLens o su versión militar IVAS (Integrated Visual Augmentation System) [100], desarrollada inicialmente por Microsoft y más recientemente por Anduril Industries. Estos visores permiten superponer elementos virtuales, como UAV enemigos, trayectorias de vuelo o zonas de amenaza, sobre el entorno físico que perciben los soldados. Esta tecnología, ya utilizada en el ámbito militar del ejército de los Estados Unidos, facilita la visualización simultánea de elementos reales y simulados sin necesidad de desplegar recursos físicos adicionales. En aplicaciones más experimentales, visores como FlightAR permiten proyectar simultáneamente múltiples flujos de vídeo (como FPV desde drones reales) y gráficos superpuestos en tiempo real sobre el terreno operativo [101].

En segundo lugar, existen iniciativas que emplean plataformas RA para generar escenarios tácticos interactivos. Un ejemplo es el prototipo desarrollado por Kaczorowski et al. (2025) [102], que permite crear entornos de batalla dinámicos en los que los drones virtuales se comportan con lógica realista en función de la posición del usuario. Estas herramientas están orientadas a aumentar la presión cognitiva sobre el personal en instrucción sin poner en riesgo la integridad física de los participantes.

Finalmente, se contemplan efectos físicos complementarios como luces estroboscópicas, humos, altavoces direccionales o señuelos visuales para simular la presencia de UAV adicionales sin necesidad de desplegarlos físicamente. Estos elementos permiten generar estímulos visuales y acústicos que aumentan el estrés operativo y exigen una reacción táctica por parte de las unidades entrenadas. Asimismo, se podrán incorporar cámaras embarcadas en los drones o sistemas de grabación externos para su uso posterior en el análisis del ejercicio, permitiendo evaluar las decisiones tomadas ante amenazas reales o simuladas.

⁹ Retasking: proceso mediante el cual se modifica en tiempo real la misión, ruta o función asignada a una plataforma o sistema para adaptarse a cambios en el entorno operativo, nuevas prioridades o información actualizada



- **Herramientas de diseño y control de ejercicios**

La gestión de los ejercicios se apoya en herramientas que permitan planificar misiones detalladas, coordinar el comportamiento del enjambre con la progresión de las unidades terrestres y facilitar el control en tiempo real por parte del instructor. Para este propósito, se seleccionan las siguientes plataformas, por su versatilidad, compatibilidad.

- UgCS (SPH Engineering): plataforma profesional de planificación de misiones multipunto, ampliamente empleada en contextos industriales y de defensa. Permite la creación de rutas personalizadas para múltiples UAV, control simultáneo, ejecución secuencial o paralela, y definición precisa de alturas, velocidades, zonas de activación y puntos de interés. Dispone de una interfaz visual intuitiva y es compatible con distintos tipos de enlace de datos. Su versión para enjambres (*Drone Show module*) ha demostrado fiabilidad en coordinación de vuelos múltiples, y su arquitectura flexible permite adaptarlo a distintos perfiles operativos [103].
- QGroundControl: software de fuente abierta compatible con los principales firmwares de control de vuelo (PX4, ArduPilot), y ampliamente utilizado en entornos académicos y operativos. Permite planificar y ejecutar misiones, monitorizar el estado de cada UAV en tiempo real, y realizar modificaciones sobre la marcha desde una interfaz gráfica multiplataforma. Admite el control de múltiples drones en paralelo mediante MAVLink, lo que lo convierte en una opción ligera, flexible y adecuada para formaciones tácticas en campo real [104].

- **Sistema de Mando y Control (C2)**

El sistema de mando y control (C2) es el eje que articula el funcionamiento del enjambre UAV durante el entrenamiento. Debe permitir al instructor o al operador coordinar el comportamiento del grupo de drones, supervisar su estado en tiempo real y garantizar la fiabilidad del enlace durante todo el ejercicio. Para lograrlo, se integran estaciones de control, redes de comunicación adaptadas al entorno y protocolos de contingencia ante fallos.

El sistema de mando y control del enjambre se articulará mediante herramientas, vistas en el apartado anterior, como QGroundControl, que permiten gestionar múltiples UAV desde una única estación de control, con visualización en tiempo real, modificación de parámetros y registro de datos. Para configuraciones más complejas, se contempla la posible adaptación de sistemas como SwarmC2, que integran capacidades de retasking dinámico, operación en entornos GNSS-denied y compatibilidad con redes tipo mesh o plataformas C4I¹⁰ como ATAK.

Respecto a las comunicaciones, el sistema puede operar mediante:

- Radiofrecuencia en bandas ISM (2.4 GHz / 5.8 GHz), usando módulos de telemetría estándar con antenas omnidireccionales o direccionales según el alcance requerido.
- Redes LTE privadas, mediante routers o módems con tarjetas SIM dedicadas, que permiten ampliar el rango de operación y reducir la latencia en zonas abiertas o urbanizadas.
- Enlaces WiFi de largo alcance, útiles para ejercicios en campos cerrados o polígonos militares, donde se pueden desplegar puntos de acceso móviles.

¹⁰ Plataformas C4I: sistemas integrados que combinan capacidades de mando, control, comunicaciones, computación e inteligencia, permitiendo la planificación, coordinación y supervisión eficiente de operaciones militares mediante el intercambio seguro y en tiempo real de información.



- Como medida de seguridad, se propone implementar protocolos de failsafe¹¹ ante pérdida de enlace, incluyendo retorno automático (RTL), aterrizaje controlado o vuelo estacionario en espera de reconexión, según la lógica definida en la misión.

Finalmente, se recomienda utilizar registros de telemetría y logs de misión almacenados automáticamente en la estación de control, para su posterior análisis durante la evaluación del ejercicio. Estas funciones están integradas tanto en QGroundControl como en plataformas avanzadas como SwarmC2.

- **Plataformas de lanzamiento y recuperación**

La operativa táctica del enjambre UAV exige soluciones eficaces para el despegue y aterrizaje de los drones, especialmente en entornos de instrucción que pueden presentar condiciones climáticas adversas, terrenos irregulares o necesidad de movilidad constante. Dado que los Humming Prop V2 son unidades ligeras y fácilmente desplegables, se requiere un sistema logístico que combine rapidez de despliegue, seguridad operativa y protección del equipo.

En este contexto, se propone el uso de plataformas portátiles de lanzamiento, como la Hoodman Drone Launch/Landing Pad [105]. Este modelo consiste en una lona circular plegable, con bordes reforzados mediante cable de acero cincado que mantiene su forma sin necesidad de montaje estructural. Está fabricada en material textil resistente y de alto contraste visual, lo que facilita la identificación desde la estación de control o por los operadores en campo. Su diseño compacto y ligero la hace especialmente adecuada para operaciones en terreno no preparado, permitiendo lanzamientos simultáneos y evitando daños por despegue sobre grava, tierra suelta o vegetación.

Para la fase de recuperación, se recomienda emplear superficies optimizadas para aterrizajes autónomos o asistidos. Un ejemplo robusto es la SwellPro 110 cm Drone Landing Pad [106], una plataforma hexagonal de mayor tamaño que ofrece mayor estabilidad en condiciones climáticas difíciles, como viento moderado o terreno inestable. Está fabricada en materiales impermeables y antideslizantes, e incluye estacas de fijación para anclarla en zonas abiertas. Su amplio diámetro permite la recuperación segura de múltiples drones en paralelo, ideal para simulaciones con alta densidad de enjambre o reagrupamiento tras una maniobra táctica. Además, protege las hélices y sensores del contacto con humedad, polvo o grava durante el descenso.

Ambas plataformas permiten estandarizar las fases de lanzamiento y recuperación, aumentando la eficiencia logística del ejercicio y reduciendo el riesgo de daños técnicos. Pueden transportarse con facilidad por el personal, instalarse en menos de un minuto y reutilizarse sin desgaste apreciable, lo que las convierte en herramientas esenciales dentro del despliegue para alargar la vida del material lo máximo posible.

4.5.3. Evaluación de la toma de decisiones y desempeño

- **Objetivo de la evaluación**

La evaluación de la toma de decisiones y el desempeño constituye un elemento esencial en la instrucción táctica frente a amenazas de enjambres UAV. En el contexto de la defensa aérea, la capacidad de reaccionar de forma coordinada y eficiente no depende únicamente de la pericia individual, sino de la cohesión operativa del equipo bajo condiciones de presión extrema. Los

¹¹ Protocolos de failsafe: conjuntos de medidas y procedimientos diseñados para que un sistema mantenga un estado seguro o controlado en caso de fallo, pérdida de señal o malfuncionamiento, minimizando riesgos y evitando consecuencias no deseadas durante la operación



recientes conflictos armados han demostrado que la rapidez en el ciclo de Observación, Orientación, Decisión y Acción (OODA) y la correcta distribución de tareas entre unidades son factores determinantes para neutralizar ataques masivos de drones, especialmente aquellos que combinan vectores FPV y formaciones de saturación.

El objetivo principal de esta evaluación es medir la capacidad de los combatientes para tomar decisiones efectivas bajo presión, en entornos que simulen con el mayor realismo posible las condiciones del combate moderno. Para ello, se combina un análisis cuantitativo, basado en métricas objetivas como enmascaramiento, tiempos de reacción, dispersión, porcentaje de interceptación (en caso de disponer) y eficiencia en el uso de recursos defensivos, con un análisis cualitativo, que recoge observaciones de instructores y evaluadores expertos.

Además, este proceso se concibe como una herramienta de mejora continua, proporcionando retroalimentación directa tras cada ejercicio. El propósito final es que se desarrollen patrones de coordinación sólidos, los oficiales sean capaces de adaptarse a amenazas imprevistas y mantengan la eficacia operativa en situaciones de alta presión, optimizando así la instrucción frente a este tipo de amenazas.

- **Parámetros de la evaluación**

La evaluación del desempeño en la instrucción de oficiales se basa en parámetros que combinan el análisis cualitativo de la actuación con métricas técnicas precisas, orientadas a medir la eficacia del mando y la coordinación del equipo. Uno de los factores más determinantes es la ventana temporal de decisión, que recoge el tiempo transcurrido desde la detección inicial del dron hasta la ejecución efectiva de la orden emitida por el oficial. Para su medición, se emplean cuatro métricas principales:

- TTD (Time-to-Detect): tiempo hasta la detección o alerta inicial.
- TTCl (Time-to-Classify): tiempo necesario para clasificar el tipo de UAV y su posible curso de acción.
- TTD_{Dec} (Time-to-Decision): tiempo que tarda el oficial en emitir una orden tras la clasificación.
- TTE_{Ex} (Time-to-Execution): tiempo que transcurre hasta que la orden se materializa en acciones concretas sobre el terreno.

En conflictos recientes como el de Ucrania, se ha constatado que drones de tipo FPV pueden pasar de la detección al impacto en apenas 1 a 3 minutos, lo que reduce drásticamente el margen de reacción. Este dato establece un objetivo de instrucción exigente: mantener el TTD_{Dec} y el TTE_{Ex} combinados por debajo de los 90 segundos en escenarios de proximidad táctica, apoyándose en procedimientos de respuesta previamente ensayados para minimizar la deliberación en combate. [107][108]

La coordinación de equipo es otro parámetro clave, que valora la rapidez y precisión en la ejecución de protocolos estandarizados como dispersión, ocultación térmica o visual, control de emisiones y uso de coberturas. El indicador principal es el porcentaje de efectivos que completan las acciones previstas en menos de 30 segundos desde la orden, junto con la capacidad para reducir la firma detectable ante un segundo sobrevuelo enemigo.

En escenarios donde la disponibilidad de sistemas C-UAS es limitada o inexistente, la defensa se mide por la eficacia de negación, es decir, la capacidad de impedir que el ataque cumpla su objetivo. La métrica central es la tasa de no impacto, que refleja el porcentaje de ataques que no logran alcanzar un objetivo crítico. La negación puede lograrse mediante:

- Desviación inducida, forzando al dron a impactar contra un blanco no prioritario.



- Protección física y hardening¹², con redes, obstáculos o estructuras reforzadas.
- Decepción táctica, empleando señuelos visuales, térmicos o radioeléctricos.
- Enmascaramiento y ocultación, usando humo, control de emisiones y camuflaje térmico.

Estas medidas han demostrado una alta relación coste-eficacia en conflictos recientes. Unidades en Ucrania, por ejemplo, han logrado forzar ataques contra señuelos o posiciones de bajo valor, reduciendo el impacto real del ataque. La evaluación de esta capacidad incluye indicadores como el porcentaje de ataques desviados o fallidos, el tiempo durante el cual el objetivo permanece protegido tras activar las medidas y la rapidez del equipo para implementarlas tras la detección. [109]

Finalmente, se considera la resiliencia del Mando y Control, evaluando la capacidad para mantener comunicaciones y conciencia situacional bajo interferencia o ante drones resistentes al jamming¹³, como los FPV con enlace por fibra óptica. Los parámetros incluyen el porcentaje de redes operativas durante el ataque, la latencia en la transmisión de órdenes y el éxito en la aplicación de procedimientos alternativos sin comunicaciones electrónicas. Asimismo, se analizará la priorización táctica del oficial, midiendo su capacidad para proteger activos críticos, asignar recursos de forma eficiente y minimizar errores de coordinación. El resultado táctico agregado se reflejará en indicadores como el porcentaje de activos operativos tras varias oleadas, el tiempo de recuperación de la unidad y la relación entre las decisiones tomadas y las pérdidas simuladas. [110] [111]

- **Herramientas y métodos de medición**

La evaluación de la toma de decisiones y el desempeño frente a enjambres UAV requiere un sistema de medición que combine métricas objetivas con observaciones cualitativas. El estudio de De Cubber et al. (2025) [112] proporciona un marco metodológico estandarizado para este tipo de evaluaciones en el ámbito C-UAS, que resulta plenamente aplicable a este proyecto para la instrucción. Dicho marco enfatiza la importancia de registrar datos telemétricos precisos y estructurar un proceso de análisis post-ejercicio que permita identificar fortalezas y debilidades en el ciclo de mando.

Siguiendo esta línea, y adaptándolo al uso de drones Humming Prop V2, se propone integrar un sistema de telemetría del enjambre que recoja marcas de tiempo (*timestamps*) de los eventos clave mencionados en el punto anterior como detección inicial o emisión de la orden. Esta descomposición temporal, descrita en el estudio, permite localizar los cuellos de botella en el ciclo OODA y cuantificar mejoras tras el entrenamiento. Los registros incluirán también posición, trayectoria y altitud de los UAV, de modo que sea posible correlacionar el comportamiento de la amenaza con la respuesta de la unidad.

Para la fase de revisión, el manual ATP 3-01.81 Counter-Unmanned Aircraft System (U.S. Army, 2023) y las guías operativas de AirSight (2024) destacan la utilidad de un After-Action Review (AAR) estructurado, en el que se presenten grabaciones de vídeo, mapas de posiciones y cronologías de órdenes. Este recurso permite que los participantes revisen las decisiones tomadas y detecten patrones de coordinación o errores recurrentes.

¹² *Hardening: conjunto de técnicas y medidas destinadas a reforzar la seguridad de sistemas, plataformas o redes mediante la reducción de vulnerabilidades, la eliminación de configuraciones innecesarias y la implementación de controles defensivos adicionales frente a posibles amenazas*

¹³ *Jamming: emisión intencionada de señales electromagnéticas para interferir, degradar o bloquear las comunicaciones y sensores de un adversario, dificultando el control o la transmisión de información.*



La resiliencia del C2 se puede evaluar mediante grabadoras de comunicaciones o *loggers*¹⁴ integrados en los sistemas de radio, tal y como sugieren procedimientos del ejército de los EEUU y de organismos de formación táctica. Estos dispositivos permiten medir la continuidad de las redes, la latencia en la transmisión de órdenes y la eficacia de los protocolos alternativos cuando se pierde el enlace principal, algo crítico frente a drones resistentes al jamming. [113]

Finalmente, y siguiendo la metodología de De Cubber et al., los resultados se pueden integrar en una plantilla de evaluación estandarizada que combine parámetros cuantitativos: (tiempo combinado TTDec + TTE_x, porcentaje de efectivos que ejecutan la orden en ≤ 30 s, tasa de no impacto y porcentaje de activos críticos preservados) con una valoración cualitativa de los instructores sobre claridad de las órdenes, disciplina de ejecución y capacidad de adaptación. Esta combinación de métricas y análisis experto no solo ofrece un diagnóstico preciso del rendimiento, sino que guía de forma directa la mejora continua de los oficiales frente a amenazas de enjambres.

- **Escenarios de referencia para la evaluación**

Para evaluar la eficacia de la instrucción, es imprescindible establecer escenarios de referencia controlados, que permitan medir de forma objetiva las capacidades adquiridas por el personal. Estos escenarios reproducen contextos operacionales realistas y presentan amenazas variadas que requieren la aplicación de tácticas entrenadas, toma de decisiones rápidas y adaptación dinámica. Los UAVs se configuran en diferentes modos de vuelo previamente definidos que reproducen tácticas reales de guerra asimétrica y de enjambre, ya documentadas en múltiples estudios y aplicaciones militares recientes. A continuación, se describen los principales tipos de escenarios que se utilizarán como referencia para la evaluación del desempeño:

Escenario 1: Emboscada en entorno urbano:

Este escenario se basa en la doctrina del ataque por saturación mediante enjambres, una táctica que busca abrumar las defensas enemigas con un número elevado de amenazas provenientes de múltiples vectores. Esta técnica, conocida como SWARMING, se encuentra documentada como uno de los métodos más eficaces para romper sistemas defensivos lineales o estáticos mediante la descentralización operativa de unidades autónomas [114]. En este contexto, los UAVs simulan ataques coordinados a baja cota, en trayectorias impredecibles y desde diferentes puntos del entorno urbano, replicando las condiciones reales de enfrentamientos en zonas densamente edificadas. Actualmente no hay ninguna fuente que documente fielmente un caso idéntico con trayectorias FPV en entornos urbanos, el diseño sigue fielmente los principios establecidos del combate de enjambre.

Escenario 2: Ataque masivo en terreno abierto

Este escenario reproduce un ataque frontal a gran escala mediante enjambres kamikaze o expendables¹⁵, una estrategia empleada por diversas potencias para saturar sistemas antiaéreos enemigos con un gran volumen de amenazas de bajo coste. Programas como LOCUST (Low-Cost UAV Swarming Technology) de la Marina de los EE. UU. han demostrado la viabilidad de emplear decenas o cientos de drones para desbordar las defensas convencionales, obligando a los operadores a emplear recursos costosos para interceptar blancos desechables [115]. El

¹⁴ *Loggers*: sistemas o dispositivos encargados de registrar y almacenar datos relevantes (como telemetría, eventos, comunicaciones o parámetros de misión) durante la operación de una plataforma, con fines de análisis, diagnóstico o evaluación posterior.

¹⁵ *Expendables*: sistemas, plataformas o elementos diseñados para ser utilizados en misiones en las que se asume su posible pérdida o destrucción, priorizando el bajo coste y la capacidad de saturar o apoyar operaciones frente a su recuperación o reutilización.



escenario reproduce esta lógica, permitiendo evaluar la eficacia táctica de las fuerzas propias frente a un ataque coordinado y masivo en terreno abierto.

Escenario 3: Incursión nocturna o en baja visibilidad

Aunque la literatura técnica no proporciona estudios específicos sobre el uso de enjambres en condiciones de visibilidad reducida o entornos con obstáculos visuales (como humo), existen múltiples investigaciones que abordan la capacidad adaptativa de los enjambres UAV en entornos degradados. Estudios recientes destacan cómo estos sistemas mantienen su operatividad incluso bajo interferencias de señal, fallos de sensores o condiciones de oscuridad, gracias a su coordinación distribuida y a la fusión de datos entre plataformas [116][117]. Este escenario aprovecha dichas capacidades para simular ataques durante operaciones nocturnas o bajo condiciones adversas, forzando al personal a emplear medidas de detección alternativas y tácticas defensivas especializadas.

Escenario 4: Hostigamiento prolongado durante patrulla

El hostigamiento prolongado mediante drones forma parte del espectro de tácticas asimétricas derivadas del enfrentamiento distribuido por enjambre. Aunque no existen estudios que detallen con precisión esta táctica como patrón independiente, diversos trabajos sobre Swarming militar reconocen la utilidad del enjambre para ejercer presión constante, desgaste psicológico y disrupción operativa sobre unidades móviles [114][117]. Este escenario simularía dicha amenaza mediante UAVs que persiguen y atacan de forma intermitente a una patrulla en movimiento, evaluando la resistencia, la cohesión de la unidad y la capacidad de respuesta prolongada bajo tensión.

Escenario 5: SEAD

El uso de enjambres en misiones de supresión de defensas aéreas enemigas es una aplicación directamente reconocida en la doctrina militar actual. El principio consiste en provocar la activación de los sistemas defensivos del adversario mediante oleadas de drones, forzando su detección y desgaste, para posteriormente atacarlos con plataformas más precisas o saturarlos hasta su colapso [114][118]. Este escenario reproduce dicha lógica mediante ataques escalonados de UAVs que simulan cargas útiles, perturbadores u observadores, permitiendo evaluar la eficiencia de los sistemas defensivos propios y su resistencia frente al desgaste táctico.

Escenario adicional propuesto: Adaptación dinámica mediante inteligencia artificial

Más allá de los escenarios estáticos, podemos señalar la creciente incorporación de inteligencia artificial en la generación dinámica de escenarios de entrenamiento. El uso de IA permite modificar variables como comportamiento enemigo, intensidad del ataque o topografía del entorno en tiempo real, adaptando el ejercicio al rendimiento del personal evaluado. Además, simuladores vistos anteriormente como ArduSim, SwarmLab y entornos tipo SITL permiten replicar ataques complejos con alta fidelidad sin necesidad de desplegar sistemas reales. ArduSim, por ejemplo, es capaz de simular hasta múltiples UAVs simultáneamente con comunicación ad-hoc entre ellos, mientras que SwarmLab ofrece simulaciones tanto de drones individuales como de enjambres completos con diferentes algoritmos de coordinación. Esta capacidad de adaptación es especialmente útil para personalizar la instrucción y maximizar el aprendizaje progresivo. [119]

• Aplicación de los resultados

La explotación de los datos generados durante los ejercicios con enjambres UAV es esencial para transformar el entrenamiento táctico en un proceso dinámico, adaptativo y basado en evidencia. En este sentido, la aplicación de los resultados permite retroalimentar la instrucción, perfeccionar escenarios, mejorar protocolos operativos y diseñar estrategias defensivas informadas para integrarlas, en el futuro, en la doctrina.

Evaluación del rendimiento y retroalimentación formativa



La simulación constituye una herramienta consolidada en la formación técnica y militar. La realidad virtual y los sistemas de simulación informática ofrecen respuestas de rendimiento cuantificables, permitiendo reducir errores y promover el aprendizaje informativo y oportuno mediante retroalimentación estructurada. Los sistemas de simulación militar han evolucionado significativamente desde los primeros métodos AAR implementados en los años 1970 con el Tactical Engagement System (TES), desarrollándose posteriormente para sistemas como MILES y SIMNET.

En el contexto de los enjambres UAV, plataformas como SwarmLab proporcionan un marco para depurar algoritmos de coordinación y recopilar métricas específicas de desempeño de vuelo, incluyendo orden direccional, seguridad inter e intra-agente, unión de subgrupos y conectividad algebraica del grafo de detección. Estas métricas cuantificables pueden aprovecharse para evaluar tácticas y ajustar estrategias en ejercicios reales.

Asimismo, entornos de entrenamiento basados en simulación de alta fidelidad, combinados con técnicas avanzadas como el reinforcement learning¹⁶, permiten observar y mejorar decisiones tácticas en tiempo real, como la priorización de interceptación de drones en escenarios masivos. [120]

Mejora de escenarios y adaptabilidad mediante IA

La integración de inteligencia artificial en el diseño de ejercicios ofrece la capacidad de ajustar dinámicamente el nivel de desafío táctico durante el desarrollo del entrenamiento. Los sistemas modernos de simulación militar incorporan capacidades de adaptación que permiten modificar variables como comportamiento enemigo, intensidad del ataque o condiciones ambientales en función del rendimiento del personal instruido. Esto facilita la creación de escenarios que evolucionan en tiempo real, optimizando así el aprendizaje progresivo y personalizado. [121]

Evaluación de simuladores militares y criterios métricos

La evaluación de sistemas de simulación militar requiere un marco metodológico claro basado en estándares establecidos. El desarrollo del Standardized Army AAR System (STAARS) ha establecido criterios específicos que deben cumplir los sistemas AAR: soporte para analizar qué ocurrió durante un ejercicio, decidir por qué ocurrió, e identificar acciones correctivas potenciales. Algunas investigaciones actuales como la del US Army Research Institute [122] proponen taxonomías para evaluar simuladores considerando requisitos generales, militares y funcionales, permitiendo verificar su validez operativa y pedagógica.

Aplicación práctica: feedback y transferencia a doctrina

Los sistemas modernos de debriefing¹⁷ militar, como Patria TADS (Tactical Debriefing System) y VirTra, proporcionan capacidades avanzadas para la aplicación práctica de resultados [123] [124]. A partir del análisis de desempeño en simulación, se pueden obtener múltiples beneficios prácticos:

- Debriefing estructurado: Patria TADS permite la revisión sincronizada de video de cabina con análisis de decisiones, proporcionando visualización del orden de batalla, uso de armamento, guerra electrónica y tracks de sensores para extraer lecciones

¹⁶ Reinforcement Learning (aprendizaje por refuerzo): rama del aprendizaje automático en la que un agente aprende a tomar decisiones óptimas mediante la interacción con un entorno, recibiendo recompensas o penalizaciones en función de sus acciones para maximizar un objetivo acumulado a lo largo del tiempo.

¹⁷ Debriefing: proceso estructurado que se lleva a cabo tras una operación, ejercicio o misión, destinado a recopilar información, analizar el desarrollo de las acciones, identificar aciertos y errores, y extraer lecciones aprendidas para mejorar el rendimiento futuro.



tácticas inmediatas.

- Informes personalizados: Los sistemas generan evaluación individual y de unidad sobre tiempos, eficacia y coordinación mediante plantillas configurables que se adaptan a diferentes escenarios, completando el proceso completo en pocos minutos.
- Módulos de reentrenamiento: Sistemas como VirTra proporcionan escenarios con opciones de ramificación extensas que se despliegan según las decisiones del instructor o el evaluado, permitiendo diseñar módulos específicos para corregir deficiencias identificadas.
- Retroalimentación acumulativa: Los sistemas AAR modernos mantienen registro histórico del desempeño y progresión, permitiendo análisis longitudinal para visualizar la mejora continua de la formación. Esto incluye capacidades de monitoreo en tiempo real de ejercicios Live Virtual Constructive (LVC) y debriefing distribuido a gran escala.

La implementación de estos sistemas ha demostrado efectividad comprobada, con Patria TADS [125] sirviendo a la Fuerza Aérea Finlandesa desde 2010 y siendo evaluado por NAVAIR para compatibilidad con plataformas aéreas de la Marina de EE.UU., mientras que VirTra [126] proporciona soluciones de entrenamiento a fuerzas militares, agencias federales y contratistas de defensa en 40 países.

4.5.4. Integración en ejercicios y maniobras militares

En este apartado se va a analizar cómo se están llevando a cabo simulaciones tácticas con drones en unidades de artillería antiaérea del Ejército de Tierra frente a la amenaza emergente. Se enmarca en el desarrollo de una herramienta de instrucción práctica para formar en la toma de decisiones, reacción táctica y empleo efectivo de los recursos antiaéreos disponibles.

- **Análisis de ejercicios militares con enjambres UAV**

El panorama internacional de ejercicios con enjambres de drones muestra una evolución acelerada hacia operaciones cada vez más complejas. Los ejercicios TIE24 de la OTAN han establecido el estándar para la interoperabilidad anti-dron, donde el sistema Crow de Indra demostró capacidades excepcionales para neutralizar enjambres modificados resistentes a contramedidas electrónicas, integrándose con 27 sensores y efectores diferentes mediante el estándar SAPIENT. [79]

Rusia implementó por primera vez enjambres coordinados en el ejercicio Kavkaz-2020, utilizando drones Forpost, Orlan-10 y Eleron-3 para reconocimiento coordinado, marcando un hito en la doctrina militar rusa. Estados Unidos ha desarrollado capacidades avanzadas a través del Project Convergence, demostrando coordinación de múltiples drones ALE para "saturar la zona" con capacidades de vigilancia, reconocimiento e inteligencia. [127]

China realizó pruebas significativas de sus sistemas antiaéreos contra enjambres, obteniendo solo un 40% de efectividad con sistemas PGZ-95 y PGZ-09, evidenciando las limitaciones de la artillería antiaérea convencional ante ataques coordinados. Reino Unido ha desarrollado armas de energía dirigida por radiofrecuencia, logrando neutralizar enjambres completos con un coste de 10 peniques por disparo. [128]

Los ejercicios militares internacionales analizados revelan conclusiones críticas para la instrucción de oficiales en Defensa Aérea: el TIE24 demostró que la defensa efectiva contra enjambres requiere arquitecturas de sensores distribuidas con interoperabilidad estandarizada, mientras que las pruebas chinas evidenciaron la inadecuación fundamental de la artillería antiaérea convencional (40% efectividad vs enjambres). El ejercicio Kavkaz-2020 ilustró cómo



los enjambres generan saturación informacional que paraliza la toma de decisiones, y el Project Convergence confirmó que la redundancia de comando hace ineficaz la neutralización de líderes individuales. Las pruebas británicas con RF DEW establecieron las armas de energía dirigida como la solución más prometedora (95%+ efectividad, coste de 10 peniques/disparo).

- **Experiencias del Ejército español**

España, por su parte, ha demostrado un compromiso notable con la integración de tecnologías de enjambre en sus ejercicios. El Ejercicio Atlas 24 evaluó sistemas de defensa aérea contra enjambres utilizando PATRIOT, HAWK, NASAMS y CERVUS III, con más de 300 efectivos participando en escenarios de ataques coordinados. [129]

Los Ejercicios Orion han evolucionado hacia operaciones multinacionales más complejas, donde España participa junto a Portugal, Francia, Italia y otros aliados en escenarios que incluyen elementos de guerra electrónica y operaciones multi-dominio. El programa SIRTAP representa el desarrollo de capacidades nacionales propias, siendo el primer dron militar completamente desarrollado en España con capacidades de coordinación. [130]

La Armada Española desarrolló capacidades específicas en el Ejercicio MAR 24-2, donde practicó defensas contra ataques masivos de drones, adaptando la doctrina naval a las amenazas de enjambre emergentes. [131]

Los ejercicios Atlas 24, Orion, MAR 24-2 y el desarrollo del programa SIRTAP evidencian un compromiso significativo con la adaptación a amenazas de enjambre, pero revelan necesidades críticas de mejora para la instrucción: el Atlas 24 demostró capacidades de coordinación multi-sensor con sistemas PATRIOT, HAWK, NASAMS y CERVUS III, aunque requiere integración con el estándar SAPIENT para interoperabilidad OTAN. Los ejercicios Orion han incorporado elementos de guerra electrónica y operaciones multi-dominio, pero necesitan escenarios específicos de saturación de enjambres para entrenar toma de decisiones bajo presión informacional extrema. El MAR 24-2 adaptó doctrina naval contra enjambres, estableciendo precedente para defensa marítima que debe expandirse a escenarios tridimensionales aire-superficie-subsuperficie.

Por otro lado, y siguiendo en la misma línea, el ejercicio Atlas 25 que se realizará en octubre del mismo año se muestra como otro ejercicio conjunto de doble acción UAS - C-UAS en el que se implementarán las capacidades más modernas del ejército enfocándose en la protección del espacio aéreo frente a drones hostiles, y estando el dron Humming Prop v2 presente en la misma. Dejando evidente la preocupación creciente frente a estas amenazas y el compromiso de España para su modernización tecnológica.

- **Lecciones aprendidas de conflictos contemporáneos**

Gaza 2021 (Operación Guardian de Muros): El uso de enjambres de drones por las FDI marcó el primer empleo operacional real de enjambres coordinados, donde múltiples UAV ligeros realizaron reconocimiento y ataques de baja intensidad simultáneos. El sistema Iron Dome¹⁸ logró interceptar cerca del 90% de las amenazas con misiles y drones, pero demostró vulnerabilidad ante saturación moderada, manteniendo una efectividad del 60% cuando flechas de 20-30 drones atacaron simultáneamente. La conclusión para la defensa aérea es que las redes de sensores distribuidas y la fusión de datos en tiempo real son indispensables para mantener la superioridad, y que los sistemas cinéticos deben complementarse con contramedidas electrónicas y munición de bajo coste para reducir el impacto logístico y

¹⁸ Iron Dome: sistema de defensa aérea desarrollado por Israel para interceptar y destruir cohetes y proyectiles de corto alcance en vuelo, mediante radares y misiles interceptores guiados, ofreciendo una protección eficaz frente a amenazas de saturación en zonas pobladas o estratégicas.



económico de cada interceptación. [132]

Gaza 2023-2024 (Operación Espadas de Hierro): Esta campaña introdujo algoritmos de IA y aprendizaje automático en el enlace hombre-máquina para procesar grandes volúmenes de datos de señal y vídeo, permitiendo identificar y priorizar automáticamente más de 200 objetivos potenciales antes del combate. El Iron Dome, reforzado con capas adicionales de sensores y sistemas David's Sling¹⁹, alcanzó rendimientos superiores al 95% en escenarios de enjambres de 50–60 drones, pero requirió coordinación precisa de todos los niveles de mando para optimizar la asignación de interceptores. La lección clave es que la automatización con supervisión humana y la implementación de doctrinas de tiro basadas en IA son esenciales para mantener la tasa de protección ante enjambres masivos.

Guerra Ucrania-Rusia (2022-actual): El uso extensivo de enjambres FPV y kamikaze por ambas partes saturó las defensas estáticas y móviles; los sistemas de artillería antiaérea y EW rusos presentaron efectividades inferiores al 30% ante oleadas de 70–100 drones cada una. Ucrania, por su parte, combinó NASAMS y Patriot con drones EW montados en vehículos, alcanzando hasta un 80% de interceptación de UAV hostiles cuando integró completamente la fusión multi-sensor. La principal conclusión es que la defensa multicapa integrada, que combine cinética, EW y DEW, es la única forma de gestionar eficazmente enjambres escalonados y que la movilidad de plataformas defensivas es crítica para evitar la saturación. [109]

Mar Rojo – Ataques Houthies (2023-2024): Los Houthies emplearon enjambres de drones de ala fija y bots marítimos coordinados por radio, combinados con cohetes de bajo coste, en oleadas sucesivas para desgastar defensas navales. Las fragatas protegidas por CIWS Phalanx y misiles RAM lograron tasas de interceptación del 85% en oleadas iniciales, pero vieron su rendimiento caer al 50% en oleadas prolongadas de más de 40 vehículos marítimos y UAV simultáneos. La conclusión doctrinal es que las plataformas navales requieren capacidades DEW embarcadas y sistemas automáticos de reasignación de blancos para afrontar amenazas multi-dominio sin agotar reservas de munición. [133]

Ataque iraní a Israel (abril 2024): Más de 300 drones kamikaze y misiles fueron lanzados en un asalto simultáneo desde múltiples direcciones; los sistemas Arrow-3 e Iron Dome interceptaron cerca del 90% de los misiles y casi todos los UAV a un coste estimado de más de \$10,000 por amenaza neutralizada. Sin embargo, la defensa mostró resiliencia al emplear enlaces de mando superpuestos y redundantes que permitieron repartir cargas de trabajo entre baterías dispersas. La lección final es que la resiliencia de la red de mando y control, con rutas de comunicación alternativas y compañeros de misión automatizados, es tan vital como la capacidad de derribo individual para proteger infraestructuras críticas frente a enjambres masivos. [134]

Por otro lado, en misiones como en las que se encuentra actualmente en Ejército de Tierra, más en concreto, en la misión Enhanced Forward Presence, localizada en Letonia, se están realizando diversos ejercicios de enmascaramiento frente a amenazas UAV, aunque son medidas aún muy básicas pendientes de evolución, y subraya la necesidad imperante de una doctrina basada en la defensa de estos sistemas.

- **Propuesta de implementación en los ejercicios**

La evolución reciente de los conflictos y de los ejercicios militares internacionales evidencia la necesidad de adaptar los modelos de instrucción en defensa aérea a la creciente amenaza de los enjambres de drones. Lejos de ser un riesgo puntual o limitado a entornos de baja intensidad,

¹⁹ *David's Sling*: sistema de defensa antimisiles desarrollado conjuntamente por Israel y Estados Unidos, diseñado para interceptar misiles balísticos de corto y medio alcance, misiles de crucero y cohetes pesados, actuando como capa intermedia dentro de la arquitectura defensiva israelí entre Iron Dome y Arrow.



estas formaciones coordinadas han demostrado su capacidad para saturar los sistemas defensivos tanto en el plano cinético como en el informativo, desbordando la capacidad de decisión de las unidades y revelando debilidades doctrinales en aquellas fuerzas armadas que no se han adaptado a tiempo.

Ejercicios avanzados como el TIE24 de la OTAN o el Project Convergence estadounidense han demostrado que la defensa frente a enjambres exige más que sistemas de armas sofisticados: requiere redes de sensores interoperables, arquitecturas de mando distribuidas, tácticas y formación del personal al enfrentarse a esta amenaza y doctrinas que contemplen explícitamente la saturación informacional. En paralelo, experiencias reales como las campañas de Gaza o los ataques iraníes sobre Israel han evidenciado que incluso sistemas avanzados como Iron Dome o Arrow-3 pueden quedar comprometidos sin una coordinación precisa, resiliencia en las redes de mando y una integración completa entre sensores y efectores.

En este contexto, la presente propuesta busca trasladar estos aprendizajes internacionales a un marco formativo realista y progresivo para el Ejército español, con aplicación tanto en maniobras de gran escala como en la instrucción diaria. Aunque ejercicios como Atlas 24, Orion o MAR 24-2 han supuesto avances relevantes, gran parte de los escenarios continúan centrados en la respuesta técnico-operativa, sin desarrollar entrenamiento específico en la toma de decisiones bajo saturación táctica ni en la respuesta doctrinal del personal ante enjambres dinámicos.

En el caso de las maniobras de gran escala, la propuesta contempla comenzar con una fase preparatoria en la que se incluya un módulo específico denominado *Amenaza Enjambre* dentro del plan general del ejercicio. Esta fase debe incluir el diseño de un guion que contemple ataques UAV progresivos y roles diferenciados, de manera que los planes puedan adaptarse en función de la reacción de las unidades.

Durante la ejecución en campo, el sistema HUMMING-PROP v2 se desplegaría en oleadas de complejidad creciente, desde formaciones reducidas de cinco drones hasta ataques masivos con treinta UAV, combinando rutas preprogramadas con maniobras adaptativas gestionadas en tiempo real por los instructores. Asimismo, se podrían integrar amenazas combinadas, como artillería simulada o interferencia de guerra electrónica, para recrear situaciones de saturación más cercanas a un entorno de combate real.

La interoperabilidad sería un elemento clave de estos ejercicios, integrando los ataques simulados con sistemas de defensa aérea ya en servicio como PATRIOT, NASAMS o HAWK, así como con capacidades de guerra electrónica. Esto permitiría coordinar la defensa con unidades terrestres y aéreas, favoreciendo la simulación de un entorno multidominio. Finalmente, la evaluación táctica se basaría en el registro de tiempos de reacción, la eficacia en la neutralización de amenazas, el nivel de coordinación entre unidades y la capacidad de gestionar los recursos bajo presión.

En cuanto a la aplicación en la instrucción diaria, se propone que las unidades realicen sesiones de familiarización consistentes en entrenamientos básicos de detección, identificación y respuesta a enjambres, utilizando el HUMMING-PROP v2 en entornos controlados. Este entrenamiento podría organizarse en bloques cortos de entre 30 y 60 minutos, integrados en el programa habitual y orientados a habilidades concretas como la priorización de blancos, la coordinación de sensores, la gestión de la munición o la respuesta combinada.

Para aumentar la exigencia, se desarrollarían escenarios combinados en los que la amenaza UAV se complementase con incidencias adicionales como la pérdida de radar, la interrupción de comunicaciones, una intrusión terrestre o un ataque cibernético. Estas prácticas se verían reforzadas con el uso de simulación aumentada e inteligencia artificial, lo que permitiría incrementar progresivamente la complejidad del ejercicio sin que ello suponga un aumento del coste operativo.

En lo que respecta a la escalabilidad y proyección futura, el plan se iniciaría en unidades



seleccionadas, como el RAAA-74, extendiéndose progresivamente a ejercicios conjuntos. Los módulos se adaptarían a futuras versiones del HUMMING-PROP u otros sistemas compatibles, garantizando la actualización tecnológica. Además, se fomentaría la cooperación internacional mediante el intercambio de experiencias y datos con países aliados que ya desarrollen entrenamientos frente a enjambres, con el objetivo de acelerar la curva de aprendizaje y consolidar procedimientos comunes.

La integración de este modelo en la instrucción permitirá entrenar no solo la capacidad de neutralizar amenazas, sino también la toma de decisiones en entornos saturados, la optimización de recursos y la adaptabilidad doctrinal. El oficial en formación desarrollará competencias para mantener la iniciativa en escenarios de alta presión, alineando su preparación con las exigencias reales de los conflictos contemporáneos y con la evolución tecnológica del combate aéreo.

- **Implicaciones de su implementación**

La integración de ejercicios específicos con enjambres de UAV en la instrucción de Defensa Aérea representa una transformación paradigmática tanto en el enfoque doctrinal como en la preparación operativa de las unidades militares. Esta evolución responde a la necesidad imperativa de adaptar las capacidades defensivas a las amenazas emergentes que han demostrado su efectividad en conflictos recientes, particularmente en el escenario ucraniano.

En el plano operativo, la introducción de estos sistemas permite que el entrenamiento evolucione desde escenarios de amenaza convencional hacia la gestión de entornos de saturación multidominio. Los ejercicios con enjambres proporcionan a los oficiales y operadores experiencia directa en la gestión de crisis rápidas bajo presión informativa, desarrollando competencias críticas para el manejo de múltiples vectores de amenaza simultáneos.

La evidencia empírica de ejercicios como el C-UAS TIE24 de la OTAN demuestra que la integración efectiva requiere un enfoque holístico que combine sensores diversos, efectores escalonados y sistemas de gestión de batalla inteligentes. Esta aproximación permite desarrollar la capacidad de respuesta ante amenazas que pueden presentar entre 20 y 100 elementos simultáneos.

Desde una perspectiva doctrinal, la adopción obliga a revisar procedimientos establecidos para incluir explícitamente la amenaza enjambre, incorporando conceptos operativos avanzados como:

- Priorización Dinámica de Blancos: Los sistemas tradicionales de defensa aérea requieren algoritmos de inteligencia artificial para gestionar eficazmente la asignación de recursos defensivos ante enjambres masivos en tiempo real.
- Coordinación Tiempo Real: La experiencia de ejercicios multinacionales demuestra la necesidad de arquitecturas de comando y control distribuidas capaces de integrar radares, sistemas electro-ópticos y guerra electrónica en una red coherente.
- Equilibrio Automatización-Supervisión Humana: La implementación fomenta una cultura de mando más flexible y distribuida, donde la automatización táctica se combina con supervisión humana estratégica, manteniendo la continuidad operativa ante pérdida parcial de sistemas o interrupción de comunicaciones.

En el ámbito estratégico, la integración trasciende la preparación táctica para convertirse en un multiplicador de capacidades que refuerza la posición española dentro del marco de seguridad transatlántico.

- Fortalecimiento de la Interoperabilidad OTAN: La adopción mejora sustancialmente la interoperabilidad con aliados que ya han integrado estas capacidades, como Suecia con tecnología Saab o Estados Unidos con su programa *Replicator*. La participación en ejercicios multinacionales permite validar la compatibilidad de sistemas y procedimientos.



- Posicionamiento Internacional: España posee una base industrial sólida con empresas como Escribano (sistemas de enjambre multiplataforma) e Indra (sistema Crow). La experiencia en adaptación de tácticas, técnicas y procedimientos puede posicionar a las Fuerzas Armadas españolas como referencia internacional en innovación doctrinal contra amenazas no tripuladas.

La implementación genera un efecto de retroalimentación positiva donde cada ejercicio aporta datos críticos sobre patrones de comportamiento de enjambres, efectividad de contramedidas y tiempos de respuesta. Esta información alimenta el perfeccionamiento continuo tanto del diseño de escenarios como de la doctrina operativa. Los datos de ejercicios recientes indican que la defensa aérea puede evolucionar desde un sistema fundamentalmente reactivo hacia una capacidad proactiva capaz de anticipar y neutralizar amenazas enjambre antes de que comprometan la seguridad del espacio aéreo. Esta transformación permitirá que la preparación de las unidades evolucione al mismo ritmo que las capacidades de la amenaza.

4.6. Enjambres UAV

4.6.1. Elementos de un enjambre UAV

En primer lugar, encontramos los propios elementos físicos dentro del enjambre, los cuales se subdividen en las plataformas aéreas (UAV), los diferentes sensores a bordo, como navegación y orientación (IMU, giróscopos, GPS...) y sensores de entorno (cámaras RGB, radar, sensores acústicos...), la carga útil, en caso de necesitarla (micrófonos, municiones, C-EM, repetidores de frecuencia...) y, por último, el sistema de propulsión, que es típicamente eléctrica (baterías de litio) [47].

En segundo lugar, encontramos el sistema de comunicaciones, del cual se ramifica la red en malla (mesh), de la cual cada UAV mantiene la comunicación con los miembros del enjambre y retransmite información; las topologías de comunicación, los protocolos y routing²⁰ (para establecer la transmisión de manera confiable y eficiente en tiempo real, pese a las interferencias) y los enlaces con el nodo central, que pueden ser de dos tipos: LoS (radio de corto alcance, Wi-Fi o 5G) y BLoS (enlaces satelitales, estaciones nodrizas o retransmisión dentro del enjambre) [48] [50].

Por otro lado, encontramos los modos de control y coordinación dentro del enjambre, pudiendo ser centralizado, donde un nodo maestro dirige la operación y es el resto el que lo imitan, o distribuido o autónomo, siendo las decisiones locales, inspiradas en algoritmos de enjambre. Estos algoritmos de enjambre son los que van a tomar las decisiones del mismo y se basan en el aprendizaje automático del enjambre y modelos bioinspirados. Estos algoritmos pues, gestionan la agregación, dispersión o asignación de misiones evitan la colisión entre los diferentes miembros del sistema [49] [50].

Por último, encontramos la infraestructura de apoyo, en la cual podemos encontrar el centro de Mando y Control (C2), que planifica la misión, supervisa el enjambre y gestiona la seguridad y calidad de los enlaces. En él también podemos encontrar los medios para el lanzamiento y recuperación tales como rampas, catapultas u operadores manuales; bases de recarga y aprovisionamiento o incluso drones nodriza que reabastecen la energía durante operaciones prolongadas. Y, por último, mecanismos de ciberseguridad y guerra electrónica para

²⁰ Routing: proceso mediante el cual se determina la ruta óptima que deben seguir los datos a través de una red, utilizando protocolos y algoritmos que permiten dirigir la información desde el origen hasta el destino de forma eficiente y fiable

proteger al sistema de las interferencias y ataques cibernéticos [50]. Para transmitir la información obtenida por el enjambre UAV, se necesitará la implementación de una nueva malla de datos dentro de la unidad donde se encuentre encuadrado el enjambre UAV.

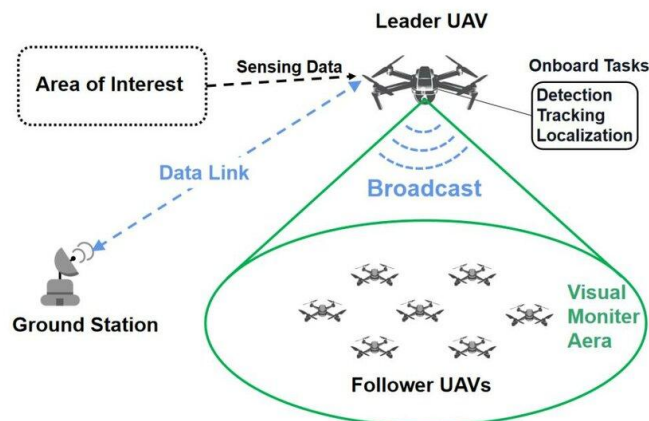


Figura 11: Descripción general de la estructura jerárquica del enjambre de UAV. Fuente [53]

Es destacable e importante asumir los posibles riesgos que habrá durante el desarrollo y posterior funcionamiento del enjambre UAV. Los errores podrán aparecer desde antes de que el propio proyecto sea iniciado, hasta el futuro uso de los mismos como un conjunto de drones autónomos. Un estudio previo de los posibles riesgos supondrá adelantarse a probables acontecimientos negativos, como el fin del proyecto (Ver Anexo VI: Análisis de riesgos).

4.6.2. COMAO

En el caso de los enjambres de UAV, su uso en el campo de batalla se adapta de manera óptima a las operaciones aéreas compuestas (COMAO). Estas operaciones consisten en la incursión y aproximación simultánea a una zona de objetivos mediante formaciones coordinadas, tradicionalmente realizadas por aeronaves tripuladas como aviones o helicópteros, pero que, en este contexto, se ejecutan mediante drones operando de manera colaborativa [51].

La implementación de un COMAO con enjambres UAV tiene como finalidad cumplir uno de los objetivos más relevantes de estos sistemas: “realizar misiones programadas de forma separada contra un conjunto de objetivos, utilizando rutas de aproximación comunes y sincronizadas”. Este tipo de incursiones combinadas ha demostrado su eficacia en escenarios contemporáneos [52].

Al igual que los aviones en un COMAO convencional, los UAV dentro de un enjambre pueden programarse para ejecutar las mismas funciones específicas que los distintos roles de aeronaves tripuladas. Cada dron dentro del enjambre puede adoptar funciones diferenciadas, tales como operaciones de ataque (Strike UAV), operaciones de escolta o cobertura electrónica, operaciones de reconocimiento y designación de objetivos (Targeting) u operaciones de señuelo (Decoy UAV).



Francisco José Culiáñez Alcolea

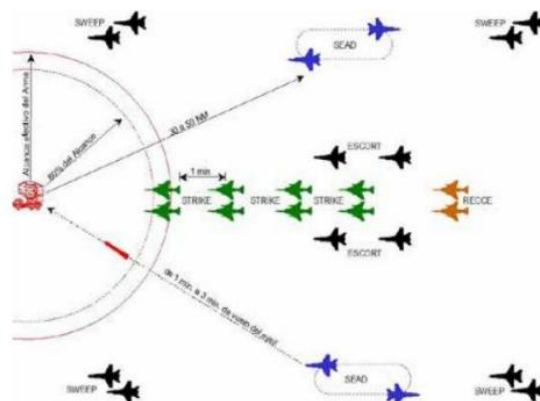


Figura 12: Ejemplo de COMAO. Fuente: [54]

El empleo de COMAO con enjambres UAV requiere una estrecha coordinación y sistemas de observación. Sin estos, las operaciones serían inviables, especialmente en misiones de alta complejidad como las de supresión de defensas aéreas enemigas (SEAD), que son en la que nos vamos a centrar, o ataques en profundidad. La ventaja fundamental radica en la capacidad de distribuir tareas entre múltiples drones, aumentando la resiliencia del conjunto.

El esquema presentado en la Figura superior ilustra un ejemplo de COMAO en el que diferentes elementos aéreos se organizan y coordinan para cumplir múltiples funciones en una misión compleja. En la imagen se observa cómo la fuerza de ataque principal (STRIKE) avanza en formación central, escoltada por aeronaves de protección (ESCORT) y apoyada en los flancos por aeronaves dedicadas a la supresión de defensas (SEAD) y a misiones de barrido ofensivo (SWEEP). Además, una sección se destina a reconocimiento (RECCE). Esta disposición refleja la necesidad de sincronizar roles y trayectorias de cada elemento para maximizar la eficacia operativa y minimizar la vulnerabilidad ante las defensas enemigas, lo que resulta especialmente aplicable cuando se integran enjambres de UAV en tales operaciones.

4.6.3. Mantenimiento

El empleo de enjambres de UAV, como de cualquier sistema, en el Ejército de Tierra requiere un escalón de mantenimiento que garantice su disponibilidad y operatividad constante y un rápido retorno a la operación en caso de daño. Debido al estado crítico de estos sistemas en misiones de reconocimiento, guerra electrónica y apoyo a maniobras terrestres, su mantenimiento debe ajustarse a la estructura escalonada del ET, conforme a la Orden DEF/1265/2015, de 29 de junio, y bajo la dirección del Mando de Apoyo Logístico (MALE) [55].

La clasificación de los trabajos en cada escalón se realiza en función de la complejidad técnica y del impacto que la avería tiene en la operatividad del enjambre, optimizando así los tiempos de respuesta y el uso de recursos. [56]

El mantenimiento de primer escalón lo realizan las unidades operativas que despliegan los enjambres UAV. En este nivel se busca asegurar que los sistemas puedan volver a operar en el menor tiempo posible tras daños menores, reduciendo la dependencia de escalones superiores. Al tratarse de operaciones simples, el personal orgánico puede realizarlas en la zona de operaciones, garantizando una respuesta táctica inmediata y manteniendo la cohesión del enjambre. Entre las tareas que se pueden realizar encontramos: la sustitución de elementos fungibles: tales como brazos, carcasas externas y protecciones superficiales dañadas que no afecten a la estructura interna; recarga y reposición de baterías; sustitución de hélices o ajustes básicos de software y calibración inicial de sensores.

El segundo escalón corresponde a las compañías de mantenimiento integradas en las



propias unidades, que operan como refuerzo técnico cercano. Estas unidades asumen reparaciones de mediana complejidad sin necesidad de derivar el material a parques o centros logísticos de mayor nivel. Según la Doctrina Logística en Operaciones (PDC-4, 2022), una adecuada organización del apoyo logístico en niveles operativos y orgánicos es fundamental para mantener la eficacia en el despliegue de fuerzas. En la estructura actual del Ejército de Tierra, los segundos escalones dependen directamente de los propios Grupos.

Las tareas que realizarían los segundos escalones incluyen: reparación de carcasas parcialmente fracturadas que afectan la estabilidad aerodinámica; sustitución de hélices y brazos con daños estructurales moderados; reemplazo de módulos electrónicos secundarios (como luces o antenas de corto alcance); y recalibración de sensores ópticos no críticos. En caso de que la unidad dispusiera de una impresora 3D, este escalón sería responsable de su gestión, constituyendo un recurso innovador para la fabricación de repuestos en campaña.

El tercer escalón se corresponde con los Parques y Centros de Mantenimiento dependientes del MALE. Este escalón reúne personal altamente cualificado y dispone de bancos de prueba avanzados, lo que permite realizar intervenciones técnicas con un alto nivel de precisión. En el Ejército de Tierra, este tipo de trabajos se concentran en el Parque y Centro de Mantenimiento de Sistemas Antiaéreos, Costa y Misiles (PCMASACOM), dependiente del MALE, con el fin de centralizar las reparaciones más complejas y garantizar la trazabilidad técnica de cada sistema durante su vida útil. Entre sus funciones principales se incluyen la sustitución y reparación de cámaras y sistemas ópticos, la corrección de averías eléctricas y electrónicas complejas, la sustitución y recalibración de antenas y sistemas GPS, así como la reparación parcial o sustitución de motores de hélices.

El cuarto escalón se sitúa fuera de la estructura orgánica del Ejército de Tierra y corresponde a la industria civil o centros externos altamente especializados, siempre bajo la dirección técnica y supervisión del MALE. Este nivel se reserva para intervenciones de máxima complejidad tecnológica, que exceden las capacidades de los centros logísticos militares y suelen implicar la participación directa del fabricante o de empresas autorizadas. Entre las tareas habituales se incluyen la reparación de fallos críticos en el software de control de enjambre, la actualización y reprogramación de algoritmos de coordinación, la sustitución y calibración de sensores inerciales y de navegación, la reparación o sustitución de placas controladoras de vuelo y sus variadores, así como la reconstrucción integral de plataformas gravemente dañadas, incluyendo estructuras y sistemas inerciales completos.

4.6.4. Ventajas e inconvenientes de los enjambres UAV

El uso de enjambres UAV en la instrucción de la Defensa Aérea surge como respuesta a las nuevas amenazas aéreas observadas en conflictos recientes y al creciente empleo de estas tecnologías en otros ejércitos. Su aplicación permite recrear escenarios realistas de saturación, mejorar la toma de decisiones bajo presión y entrenar a un coste operativo limitado. No obstante, requiere sistemas de control avanzados y supone un notable consumo logístico [57]. A continuación, se muestran las principales ventajas e inconvenientes analizados, valorando su impacto en la instrucción y en la capacidad del Ejército de Tierra para adaptar su preparación a los desafíos actuales:

Ventajas:

- Disminución de costes en los medios, permitiendo crear un mayor número de drones con mejoras en diferentes apartados, como el software o la placa controladora de vuelo.
- Ausencia de un controlador humano para cada dron perteneciente al enjambre, disminuyendo de forma considerable el uso del personal humano
- Fáciles de modificar, pudiendo cambiar elementos o incorporar otros de interés futuro.



- Son pequeños y portátiles, facilitando su transporte y manejo.
- Actualmente no existe un medio de neutralización completa de un enjambre UAV, siendo solo posible inhibir parte del mismo. En España, los medios C-UAS son escasos, y es complicado contrarrestar drones de uso militar (Ver Anexo II: Medios C-UAS en España). Por lo que su uso podría abrir una puerta a un posible desarrollo más en profundidad.
- Permiten recrear escenarios de ataque saturado mucho más cercanos a los riesgos actuales, como los vividos en conflictos recientes
- Facilitan la simulación de diferentes roles: ataques masivos, penetración cooperativa, creación de señuelos, evasión e inteligencia de señales, incrementando las opciones de entrenamiento dinámico.
- El comportamiento autónomo de los enjambres expone a los operadores a situaciones imprevisibles, mejorando su capacidad de toma de decisiones en tiempo real y su adaptación a entornos con saturación informativa o interferencias.
- El fallo de uno o varios drones no interrumpe el ejercicio, gracias a la redistribución automática de misiones en el enjambre, reproduciendo el comportamiento redundante de sistemas descentralizados.

Inconvenientes

- Coordinar decenas o centenares de UAV exige sistemas robustos de telecomunicaciones, algoritmos de control multiagente y un entorno de simulación capaz de reflejar la realidad (modelado físico, interferencias, etc.).
- Los drones de simulación suelen tener hardware limitado y pueden no replicar fielmente el perfil de firma o de vuelo de aeronaves de combate reales, dificultando la generación de escenarios totalmente fidedignos.
- La instrucción masiva con UAV puede chocar con restricciones legales sobre vuelo autónomo o en zonas restringidas, exigiendo coordinación con las autoridades civiles y militares del espacio aéreo.
- La rotación continua de ejercicios implica un abastecimiento constante de baterías y módulos electrónicos, lo que exige una planificación específica para no comprometer otras actividades de la unidad. El uso constante en entrenamientos, además, provoca un desgaste acelerado de componentes.

El análisis de las ventajas e inconvenientes de los enjambres UAV permite comprender con mayor claridad los pros y contras de su empleo en instrucción y simulación. Este tipo de sistemas, considerados por numerosos ejércitos como parte del futuro de la guerra debido a su versatilidad y bajo coste, han demostrado resultados óptimos en los conflictos donde se han empleado. Dado que el Ejército de Tierra aún no dispone de enjambres propios, resulta esencial estudiar las posibles causas de fallos que afecten a su funcionamiento. Para ello, se elaboró un diagrama de Ishikawa o diagrama de pez, una herramienta que permite identificar las causas que originan un efecto determinado. Mediante un brainstorming, se establecieron causas primarias, secundarias y terciarias potenciales, como los variadores, integrados en la electrónica del dron y directamente vinculados a su diseño, cuya corrección permitiría minimizar estos fallos.



Francisco José Culiáñez Alcolea

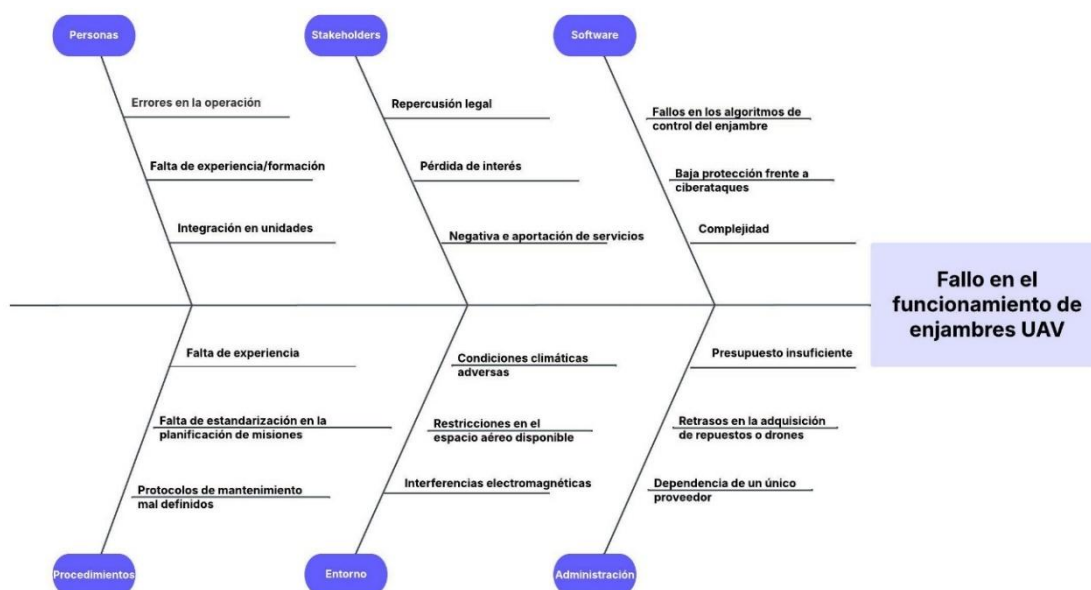


Figura 13: Diagrama de Ishikawa o de pez. Fuente: Elaboración Propia mediante [73]

4.6.5. Introducción en una unidad de Artillería Antiaérea

Con la finalización del proyecto de enjambres UAV, es necesario el proceso de entrega e introducción de los mismos en las unidades de Artillería Antiaérea del Ejército de Tierra. Para conocer cuál sería el mejor puesto donde encuadrar estos medios en un Grupo de Artillería, se ha realizado una encuesta con el personal militar del el RAAA 74 y de otras unidades (Ver Figura 14).

¿Dónde encuadraría usted el enjambre UAV dentro de su unidad?

- ☐ FDC/BCP/UCE
- ☐ CIO/CPL
- ☐ Lanzadores
- ☐ Radares
- ☐ Crear un equipo/pelotón/sección nuevo
- ☐ Plana
- ☐ Otro: _____

Figura 14: Encuesta sobre encuadramiento de los enjambres UAV en unidades AAA. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]



¿Dónde encuadraría usted el enjambre UAV dentro de su unidad?

87 respuestas

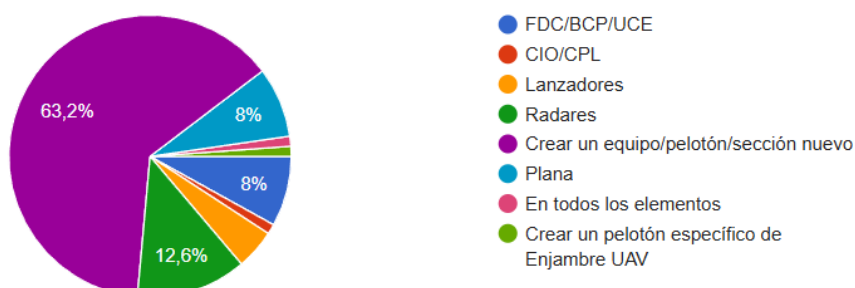


Figura 15: Resultados en gráfica de barras de la encuesta sobre el encuadramiento de los enjambres UAV en unidades AAA. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

A partir del resultado obtenido en esta encuesta, se observa que, según el personal militar de estas unidades, el mejor puesto para su implementación sería con la creación de un nuevo equipo/pelotón/sección dentro de cada Batería para poder tener una mayor capacitación, lo cual subraya la importancia que el personal le da a este tipo de amenazas.

4.6.6. Análisis DAFO

El análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas, Oportunidades) es una herramienta que nos permite conocer los puntos fuertes y débiles que este proyecto va a tener en su desarrollo y mantenimiento. Esta herramienta es útil para la toma de decisión sobre la continuidad y viabilidad o no del proyecto (Ver Figura 16).



Figura 16: Análisis DAFO. Fuente: Elaboración Propia a partir de [60]

En cuanto a las Fortalezas, destacan la innovación en la formación táctica y la posibilidad de uso recurrente de los enjambres para diferentes ejercicios, lo que optimiza los recursos formativos del Ejército de Tierra. La adquisición previa de sistemas similares permite además



aprovechar datos reales y lecciones aprendidas, facilitando la labor de los responsables de la instrucción táctica y técnica y asegurando una curva de adaptación más eficiente y rápida. Asimismo, la capacidad para mejorar la calidad de la instrucción y la toma de decisiones rápidas beneficia directamente al personal en formación, incrementando su nivel de preparación ante escenarios complejos.

Las Debilidades están principalmente asociadas a condicionantes tecnológicos y operativos. La limitación en autonomía e IA puede reducir el realismo de las simulaciones, lo que supone un desafío para los diseñadores y desarrolladores del sistema (industria tecnológica y departamentos de I+D). La dependencia de comunicaciones estables y la necesidad de personal altamente cualificado implican que los centros de formación deberán invertir en capacitación técnica, afectando a instructores y operadores especializados. Además, la carencia de una doctrina específica sobre enjambres UAV dentro del Ejército español subraya la necesidad de colaboración estrecha dentro del mismo para crear procedimientos estandarizados y modernizar la doctrina actual.

Entre las Oportunidades, el proyecto ofrece un gran potencial para la modernización de la doctrina de la Defensa Aérea, posicionando a España como referente en formación avanzada con UAV. Esto genera un interés directo para los responsables políticos y de adquisiciones en Defensa al alinearse con las estrategias de modernización militar, estando actualmente sobre la mesa debido a la necesidad de aumentar el gasto en defensa propuesto por la OTAN. También supone una oportunidad para la industria nacional y los centros de investigación, que pueden participar en el desarrollo de tecnologías complementarias, y para los oficiales en formación, quienes se beneficiarían de un entrenamiento más realista, adaptado a amenazas modernas.

Finalmente, las Amenazas identificadas, como la obsolescencia tecnológica, las restricciones presupuestarias o la vulnerabilidad a interferencias electrónicas, afectan de manera transversal a todo el proyecto. El Ejército de Tierra debe garantizar la sostenibilidad presupuestaria y la seguridad cibernética, mientras que la industria y los proveedores externos deben comprometerse a ofrecer actualizaciones continuas para mantener la vigencia del sistema y su modernidad. Los operadores y personal implicado en la formación, por su parte, pueden verse condicionados por riesgos operativos como accidentes durante ejercicios, lo que resalta la importancia de contar con protocolos de seguridad y mantenimiento claros.

El análisis DAFO, en definitiva, revela que para garantizar el éxito del proyecto es imprescindible establecer mecanismos claros de coordinación entre responsables doctrinales, equipos técnicos y operadores de las plataformas UAV. En la fase de ejecución, se debe aprovechar las capacidades tecnológicas y doctrinales detectadas como fortalezas, implementando acciones específicas para cubrir carencias internas y mitigando amenazas externas mediante protocolos de adaptación y respuesta rápida. Esto implica definir roles, procesos y canales de comunicación efectivos entre todos los implicados, asegurando así una gestión cohesionada y orientada a resultados.

4.7. Formación de Pilotos

El empleo de UAV en las Fuerzas Armadas hace necesario establecer programas específicos de formación para los operadores de estos sistemas. Los pilotos de drones deben adquirir conocimientos tanto técnicos como operativos para garantizar un uso eficaz y seguro de estos medios. Esta formación abarca aspectos como el pilotaje básico, el control de vuelo mediante estaciones terrestres, el uso de sensores embarcados y el análisis de la información obtenida.

Además, es imprescindible que los operadores comprendan el marco normativo vigente, tanto nacional como internacional, así como los procedimientos operativos estándar. En España, esta formación suele impartirse en unidades específicas, como el Regimiento de Artillería



Antiaérea n.º 71 (RAAA 71), donde se capacita al personal del Ejército de Tierra en el manejo de sistemas UAS tácticos. Estos programas incluyen formación teórica, sesiones en simuladores y vuelos reales con supervisión de instructores.

La formación de pilotos de sistemas aéreos no tripulados en España se rige por un marco normativo unificado a nivel europeo, principalmente bajo el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, complementado por el Real Decreto 517/2024, que adapta estas directrices al contexto nacional. [135]. Algunas de las empresas que realizan este tipo de cursos son European Flyers, Aerocámaras o Grupo One Air, entre otras. Esta normativa establece distintos niveles de exigencia en función del riesgo de la operación, siendo el curso de categoría específica (STS) el que permite realizar operaciones profesionales más avanzadas, como las requeridas para la integración táctica en unidades militares. Los requisitos comunes que deben cumplir los aspirantes son los siguientes:

- Certificación Teórica Básica y Avanzada STS-01 y STS-02, que incluye la superación de pruebas oficiales ante AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea).
- Formación estructurada con una duración mínima de 65 horas, distribuidas en modalidad mixta: teoría online/autónoma y sesiones presenciales.
- Bloque práctico de vuelo de 24 horas mínimas, supervisadas por instructores certificados, incluyendo maniobras en condiciones de visibilidad reducida, simulacros de pérdida de enlace y planificación de rutas automatizadas.
- Evaluación continua del rendimiento, mediante simuladores, pruebas prácticas en campo y evaluación final presencial.
- Prueba de acceso inicial exigente
- Capacitación complementaria

La progresiva incorporación de UAV en unidades operativas impulsa al desarrollo de nuevos módulos de instrucción centrados en misiones de observación, vigilancia, corrección de fuegos y apoyo a la decisión táctica. Este enfoque integral permite dotar a los futuros operadores de las capacidades necesarias para actuar con precisión y eficacia en un entorno operacional cada vez más digitalizado.

4.8. Impacto social y ético

El uso de enjambres de drones autónomos representa un avance tecnológico significativo con potencial para transformar tanto los ámbitos, civil como militar. No obstante, para la ciudadanía española, esta tecnología sigue siendo en gran medida desconocida, limitada a la percepción que ofrecen los espectáculos de luces sincronizadas y las imágenes de conflictos armados difundidas en redes sociales, que en realidad reflejan conjuntos sincronizados de drones controlados remotamente, no enjambres reales. Estos últimos se caracterizan por tener una inteligencia colectiva que permite a cada dron adaptarse y continuar la misión si uno falla, generando un nivel de autonomía y coordinación mucho más avanzado. Este desconocimiento provoca una mezcla de curiosidad y desconfianza, donde algunos sectores valoran la integración de estas capacidades como un indicador de progreso y seguridad nacional, mientras otros expresan preocupación por la elevada inversión requerida y los riesgos éticos inherentes a delegar decisiones en sistemas autónomos. Esta ambivalencia en la percepción social resalta la importancia de abordar los aspectos éticos, de responsabilidad y regulación en el despliegue de estas tecnologías.

A nivel social, la percepción de seguridad puede incrementarse al saber que el Ejército dispone de sistemas avanzados capaces de defender el territorio sin exponer vidas humanas. Sin embargo, el uso de tecnologías basadas en Inteligencia Artificial genera preocupación



respecto a la pérdida de control humano. La capacidad de los enjambres para actuar sin intervención directa, cruzar fronteras sin ser detectados o llevar a cabo ataques autónomos reaviva el debate sobre la ética en la guerra de si debe permitirse que una máquina decida sobre la vida de una persona. Estas cuestiones están presentes en foros internacionales, con voces críticas que alertan del riesgo de deshumanizar el conflicto [34] [35].

También existe una preocupación creciente sobre el reemplazo de seres humanos por sistemas automáticos, como ha sucedido en entornos civiles con drones de reparto, programación o vigilancia. Este fenómeno puede generar tensiones laborales y cuestionamientos sobre el valor del trabajo humano frente a una eficiencia cada vez más tecnológica [38]. Además, el empleo militar de estas tecnologías plantea dudas sobre los derechos soberanos de los Estados, al permitir operaciones encubiertas o acciones sin autorización previa, lo que puede vulnerar principios del derecho internacional humanitario [39].

El avance hacia un ejército más tecnificado y desarrollado plantea beneficios claros en cuanto a eficacia y protección, pero requiere también de un marco ético y normativo que garantice que estos desarrollos respeten los principios fundamentales de la sociedad en la que se encuadra.

4.9. Impacto psicológico

La irrupción de los drones autónomos ha generado preocupación dentro de ciertos sectores militares tradicionales, especialmente por la percepción de una posible pérdida de control frente a sistemas dotados de inteligencia artificial. Esta incertidumbre puede derivar en reticencias a la integración de estas tecnologías, sobre todo cuando las decisiones tácticas comienzan a delegarse a algoritmos o a plataformas con cierto grado de autonomía. La progresiva independencia operativa de estos sistemas plantea dilemas éticos y legales, especialmente cuando ya existen dispositivos capaces de desplegar unidades secundarias que identifican y neutralizan objetivos sin necesidad de intervención humana, lo que acerca el escenario bélico a uno en el que las decisiones sobre la vida y la muerte recaen en máquinas [32].

A su vez, su empleo en conflictos recientes marca un profundo cambio de paradigma. La guerra de Ucrania ha mostrado cómo el uso masivo de drones Shahed-136 de bajo coste ha permitido ejecutar ataques de saturación que desbordan defensas tradicionales, revelando una nueva lógica de combate basada en la cantidad y el coste [33]. La expansión de drones kamikaze y municiones merodeadoras de precisión, económicas y fácilmente desplegables, demuestra una creciente asimetría entre el precio del medio atacante y el valor estratégico del objetivo atacado. Esta situación puede generar frustración y altos niveles de estrés psicológico en las fuerzas defensoras, que enfrentan la dificultad de neutralizar amenazas aparentemente baratas, pero con un impacto estratégico elevado, lo que incrementa la presión operativa y exige nuevas estrategias de respuesta.

4.10. Conflicto legal

A la hora de integrar sistemas UAV en el espacio aéreo español, resulta imprescindible ajustarse al marco normativo europeo, que se recoge en el Reglamento Básico de Aviación Europea 2018/1139 y el Reglamento 947/2019, y que cada Estado miembro publica en su respectivo boletín oficial [26]. La AESA, por su parte, tiene funciones de supervisión, inspección y ordenación del transporte aéreo, así como potestad sancionadora ante infracciones, pero no elabora la normativa. Dicha legislación europea establece que debe existir siempre un operador humano responsable y preparado para intervenir en cualquier momento, incluso en operaciones



automatizadas, lo que impide el uso de drones totalmente autónomos sobre territorio de la UE. Esto representa un obstáculo significativo para el desarrollo de capacidades de autonomía plena, especialmente en el ámbito militar, donde esta tecnología es clave para operaciones sin supervisión continua. [25] [27] [28].

Pese a que se cree que existe cierto vacío regulatorio en materia de drones autónomos, la normativa vigente establece de forma clara la obligación de contar, como mínimo, con un operador en modalidad BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), responsable de la aeronave durante toda la operación [30][31]. Dado que el Reglamento europeo es de obligado cumplimiento para todos los Estados miembros, no es posible desarrollar normativas nacionales que lo contradigan. En este contexto, la elaboración de una norma específica de carácter militar podría permitir adaptar los requisitos técnicos y operativos de los UAV a las necesidades de defensa, siempre dentro de los límites establecidos por la normativa europea, facilitando así una integración progresiva y segura de sistemas con mayores niveles de autonomía.

Para garantizar la legalidad y seguridad de las operaciones con UAV, es esencial conocer y cumplir con los distintos permisos y autorizaciones que deben solicitarse para cada tipo de ejercicio y espacio aéreo. En el Anexo XI: Permisos de vuelo de UAV en diferentes ejercicios se detalla específicamente el proceso, las categorías y requisitos necesarios para evitar cualquier incidencia administrativa o normativa durante las fases de vuelo.

5. CONCLUSIONES

5.1. Principales hallazgos

El presente Trabajo de Fin de Grado ha permitido analizar en profundidad la viabilidad y el potencial del empleo de enjambres de UAV en la instrucción táctica de oficiales de Defensa Aérea, en un contexto en el que la transformación tecnológica y la aparición de nuevas amenazas hacen imprescindible replantear nuevos métodos de instrucción y adiestramiento.

En relación con el objetivo general, se ha constatado que los enjambres UAV constituyen una herramienta formativa capaz de reproducir con alto grado de realismo situaciones tácticas contemporáneas, como ataques de saturación, incursiones FPV o formaciones coordinadas, favoreciendo la mejora de la toma de decisiones en entornos dinámicos y situaciones bajo presión.

Respecto a los objetivos específicos, los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- El análisis doctrinal y operativo ha confirmado que los enjambres UAV aportan beneficios notables para la instrucción: bajo coste relativo, repetibilidad de ejercicios y capacidad para simular amenazas complejas sin riesgo real. No obstante, también se han identificado limitaciones significativas, como la dependencia de la conectividad, la autonomía reducida de los drones ligeros y los riesgos asociados a la guerra electrónica o a la pérdida de control.
- La comparativa entre sistemas disponibles ha permitido concluir que el modelo Humming Prop V2, de la empresa SCR, representa la opción más adecuada para programas de instrucción, al equilibrar coste, accesibilidad y experiencia previa en unidades del Ejército de Tierra. Se ha evidenciado, asimismo, que la fabricación propia mediante impresión 3D resulta útil para piezas de repuesto o material fungible, aunque no lo es para la construcción completa de plataformas operativas.
- Se ha determinado que, para integrarse eficazmente en un enjambre, cada dron debe contar con conectividad de red en malla, sensores básicos de navegación, software de



control distribuido y resistencia estructural mínima. Estos requisitos garantizan la operatividad colectiva y la resiliencia del sistema en ejercicios de saturación o reconocimiento.

- El estudio ha puesto de relieve que la IA constituye el núcleo del futuro de los enjambres UAV, permitiendo coordinación autónoma, adaptación al entorno y resiliencia ante contramedidas. Aunque su implementación en España es aún incipiente, la tendencia internacional confirma que la autonomía progresiva será un factor decisivo en el entrenamiento y en la guerra contemporánea.

En conjunto, el trabajo confirma que los objetivos planteados se han alcanzado, al proponer un modelo de instrucción basado en enjambres UAV que es viable desde el punto de vista técnico, doctrinal y económico, y que responde a la necesidad de preparar a las unidades de Antiaéreas frente a amenazas múltiples y emergentes.

No obstante, es necesario reconocer limitaciones: el estudio se ha circunscrito a un único modelo de dron, sin integrar otras plataformas de mayor autonomía o carga útil; los escenarios propuestos han sido planteados de forma conceptual y no implementados en ejercicios a gran escala; y el marco legal aún carece de una normativa específica que regule el uso militar de enjambres UAV en territorio nacional

5.2. Propuestas de mejora y líneas futuras de investigación

Se abren, por tanto, posibles líneas futuras de trabajo orientadas a reforzar y ampliar los resultados obtenidos en este estudio. En primer lugar, conviene ampliar la variedad de UAV empleados en los entrenamientos, incorporando modelos de distinta capacidad, autonomía y carga útil. Esto permitiría simular con mayor realismo las amenazas heterogéneas que podrían encontrarse en un escenario bélico actual, y otorgaría la posibilidad mayor de modular la dificultad y la complejidad de los ejercicios.

En segundo lugar, resulta prioritario integrar tecnologías de simulación virtual y realidad aumentada en los ejercicios físicos con enjambres. De este modo se podrían recrear escenarios de gran escala sin necesidad de desplegar un número excesivo de drones, optimizando recursos y reduciendo costes, a la vez que se multiplica la variedad de supuestos tácticos a los que puede enfrentarse el personal en formación.

Asimismo, se identifica la necesidad de desarrollar protocolos robustos de ciberseguridad y protección electrónica, que aseguren la integridad de las comunicaciones y el control de los enjambres frente a intentos de interferencia, intrusión o sabotaje. La vulnerabilidad en este aspecto no solo comprometería la eficacia de la instrucción, sino que podría generar riesgos de seguridad incluso en el ámbito formativo.

Por otra parte, resulta fundamental evaluar el impacto psicológico y ético que puede tener la instrucción basada en sistemas autónomos y semiautónomos. La exposición a escenarios en los que máquinas con capacidad de decisión colectiva actúan de manera independiente puede generar tanto ventajas en la preparación bajo estrés como dudas morales y resistencias que deben abordarse en paralelo a la formación técnica.

Finalmente, es imprescindible impulsar la cooperación con la industria nacional y europea, tanto para fomentar la investigación en inteligencia artificial aplicada a enjambres UAV como para avanzar en la elaboración de doctrinas propias en el ámbito de la Defensa Aérea. Una estrecha colaboración entre fuerzas armadas, universidades y sector privado aseguraría no solo un mayor grado de innovación tecnológica, sino también una adaptación más rápida a los estándares y normativas europeas en materia de defensa y seguridad.

En definitiva, este trabajo demuestra que los enjambres UAV no solo representan una



innovación tecnológica, sino también una oportunidad para transformar la instrucción táctica de los miembros de las fuerzas armadas. Su implementación abre la puerta a una preparación más completa y realista, capaz de anticiparse a los retos de la guerra moderna, optimizar las capacidades defensivas y reforzar una cultura de innovación dentro de las Fuerzas Armadas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Buchholz, K. (2023, 14 junio). Where combat drones are operated. Statista Daily Data. <https://www.statista.com/chart/30194/countries-operating-combat-drones>
- [2] Sánchez, A. (2023, 29 agosto). What are the parts of a Drone? Full list. UMILES. <https://umilesgroup.com/en/what-are-the-parts-of-a-drone-full-list/>
- [3] Singleton, L. (2025, 16 enero). How to Become a Drone Pilot in the Military. Rocket Drones. <https://rocketdrones.com/how-to-become-a-drone-pilot-in-the-military/>
- [4] AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea - MTMS. (s. f.). <https://www.seguridadeaerea.gob.es/>
- [5] Next Generation Small RPAS (NGSR). (2021). European defence agency. <https://www.pesco.europa.eu/project/next-generation-small-rpas-ngsr/>
- [6] SIAE: Focus sur le drone MALE RPAS (Eurodrone). (2025, 6 junio). Armée de L'Air Et de L'Espace. <https://www.defense.gouv.fr/air/actualites/siae-focus-drone-male-rpas-eurodrone>
- [7] Esd. (2023, 4 agosto). UAV Programmes: a Focus on the EU -. European Security & Defence. <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32890/uav-programmes-a-focus-on-the-eu/>
- [8] Stryker, C., & Kavlakoglu, E. (2025, 29 julio). Artificial Intelligence. What is artificial intelligence (AI)? <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>
- [9] Inteligencia artificial. (2025, 4 septiembre). Configurar el Futuro Digital de Europa. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/artificial-intelligence>
- [10] Bumie-E. (s. f.). Get started with machine learning. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/en-us/community/content/get-started-machine-learning>
- [11] McKinsey & Company. "The State of AI in 2023: Generative AI's breakout year". <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023>
- [12] OECD AI Policy Observatory Portal. (s. f.). <https://oecd.ai/en/>
- [13] AI Index | Stanford HAI. (s. f.). <https://aiindex.stanford.edu/report/>
- [14] Machine Learning Techniques for Non-Terrestrial Networks. (2023, January). Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/367548639_Machine_Learning_Techniques_for_Non-Terrestrial_Networks
- [15] Shield AI's Hivemind Flies MQ-20 Avenger Autonomously at Orange Flag. (s. f.). Shield AI. <https://shield.ai/shield-ais-hivemind-flies-mq-20-avenger-autonomously-at-orange-flag/>
- [16] Vance, C., & Nasu, H. (2024, 6 septiembre). The Kargu-2 Autonomous Attack Drone: legal & ethical dimensions. Lieber Institute West Point. <https://lieber.westpoint.edu/kargu-2-autonomous-attack-drone-legal-ethical>
- [17] Ibañez, Á. (2023, 27 septiembre). Drones de carreras inteligentes capaces de batir a los campeones humanos - Tecvolución. Tecvolución. <https://tecvolucion.com/drones-carreras-inteligentes-batir-campeones-humanos/>
- [18] Bendett, S., Bendett, S., & Bendett, S. (2021, 20 abril). Strength in Numbers: Russia and the Future of Drone Swarms. Modern War Institute -. <https://mwi.westpoint.edu/strength-in-numbers-russia-and-the-future-of-drone-swarms/>
- [19] Pomerleau, M. (2022, 18 agosto). Contractors demonstrate single-user drone swarm at DARPA experiment. C4ISRNet. <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2022/01/20/contractors-demonstrate-single-user-drone-swarm-at-darpa-experiment/>
- [20] López, C. D. V. (2025, 9 mayo). Enjambres de drones: el futuro de la guerra ha llegado. Ejércitos. <https://www.revistaejercitos.com/articulos/enjambres-de-drones-el-futuro-de-la-guerra-ha-llegado/>
- [21] pliego de prescripciones técnicas para el contrato del suministro de enjambre de blancos aéreos. (2023). En contrataciones del estado. Cuartel general del mando de artillería antiaérea. <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/43ffd594-6f20-4ac4-840d->



d968dcbd0257/DOC20231004115057PPT.pdf?MOD=AJPERES

[22] Office_Zzam. (s. f.). DARPA's OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET) program. <https://armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/air/aviation-defence-industry-technology/darpa-s-offensive-swarm-enabled-tactics-offset-program>

[23] López, C. D. V. (2021, 11 abril). El programa LISS de Escribano. Ejércitos. <https://www.revistaejercitos.com/articulos/el-programa-liss-long-range-intelligent-security-system-de-escribano/>

[24] El Ejército recibe un "sistema de enjambre de drones". (2023, 4 diciembre). https://ejercito.defensa.gob.es/gl/actualidad/2023/11/9536-el-ejercito-de-tierra-recibe-un-sistema-de-enjambre-de-drones.html?_locale=gl

[25] BOE-A-2017-15721 Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-15721>

[26] Normativa de UAS/drones | AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea - MTMS. (s. f.). <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/normativa-de-uas-drones>

[27] Trato, G., & Trato, G. (2024, 23 septiembre). Normativa actual de drones: todo lo que necesitas saber. Grupo Trato | Mallorca - Menorca - Ibiza - Formentera -. <https://grupotrato.com/blog/normativa-actual-de-drones/>

[28] BOE-A-2024-11377 Real Decreto 517/2024, de 4 de junio, por el que se desarrolla el régimen jurídico para la utilización civil de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), y se modifican diversas normas reglamentarias en materia de control a la importación de determinados productos respecto a las normas aplicables en materia de seguridad de los productos; demostraciones aéreas civiles; lucha contra incendios y búsqueda y salvamento y requisitos en materia de aeronavegabilidad y licencias para otras actividades aeronáuticas; matriculación de aeronaves civiles; compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos; Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea; y notificación de sucesos de la aviación civil. (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2024-11377>

[29] Geozonas: sepa dónde puede volar un dron | EASA. (s. f.). EASA. <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/geo-zones-know-where-fly-your-drone>

[30] Flying UAS. (2021, 24 febrero). Regolamenti EU operatori UAS - Flying UAS. <https://flying-uas.com/es/regulations-eu-operators-uas/>

[31] NORMATIVA. (s. f.). <https://clubdevuelotas.com/normativa/>

[32] The Role of Ethics in Autonomous Drone Technology. (s. f.). <https://falconediting.com/en/blog/the-role-of-ethics-in-autonomous-drone-technology>

[33] The drone factories fueling Russia's unprecedented assaults on Ukraine. (2025). The Wall Street Journal. <https://www.wsj.com/world/russia-iran-drone-factory-ukraine-aea9bf5b?utm>

[34] Resnik, D. B., & Elliott, K. C. (2018). Using Drones to Study Human Beings: Ethical and Regulatory Issues. Science And Engineering Ethics, 25(3), 707-718. <https://doi.org/10.1007/s11948-018-0032-6>

[35] Intricate and Multifaceted Socio-Ethical Dilemmas Facing the Development of Drone Technology: A Qualitative Exploration. (2025). preprints.org. <https://www.preprints.org/manuscript/202505.2429/v1>

[36] Cheap drones, expensive lessons: ethics, innovation, and regulation of autonomous weapon systems. (2025). Washington.edu. <https://jsis.washington.edu/news/cheap-drones-expensive-lessons-ethics-innovation-and-regulation-of-autonomous-weapon-systems/>

[37] How does drone transport affect the labour market and traditional supply chains? (s. f.). Flyingcarsmarket. <https://flyingcarsmarket.com/how-does-drone-transport-affect-the-labour-market-and-traditional-supply-chains/>

[38] Weller, C. (2016, 12 mayo). Drones could replace \$127 billion worth of human labor. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/drones-could-replace-127-billion-of-human-labor-2016-5>



- [39] Director, J. B. | J. E. (2025, 2 junio). AI-Enabled Drones, State Responsibility, and the Rule of Law: Legal and Ethical Imperatives. JURIST - Commentary - Legal News & Commentary. <https://www.jurist.org/commentary/2025/06/ai-enabled-drones-state-responsibility-and-the-rule-of-law-legal-and-ethical-imperatives/>
- [40] Administrador. (s. f.). Drones para saturar los sistemas de defensa aérea del enemigo – Centro de Estudio Grl Mosconi. <https://www.fie.undef.edu.ar/ceptm/?p=17199>
- [41] Blanco, L. (2025, 22 enero). Enjambres de drones en Defensa: merodean, hablan y desgastan al enemigo. Capital Radio. https://www.capitalradio.es/programas/hablemos-de-defensa-y-seguridad/enjambres-drones-defensa-merodean-hablan-desgastan-al-enemigo_137015057.html
- [42] Béchard, D. E. (2025, 16 junio). How Drone Swarms Work—From Iran’s Shahed Attack to Ukraine’s Operation Spiderweb. Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/how-drone-swarms-work-from-irans-shahed-attack-to-ukraines-operation/>
- [43] Marinero, I. (2022, 9 octubre). El preciso sistema para controlar enjambres de drones y atacar a varios objetivos a la vez. El Español. https://www.elespanol.com/omicrono/defensa-y-espacio/20221009/preciso-sistema-controlar-enjambres-drones-atacar-objetivos/708179497_0.html
- [44] Julio Maíz, J. (2024, 5 febrero). El sistema contra UAVs Cervus III que operará el Ejército de Tierra. Defensa.com. <https://www.defensa.com/espana/sistema-contra-uas-cervus-iii-operara-ejercito-tierra>
- [45] Srivari, & Srivari. (2017, 25 junio). Spanish Defence Ministry to deploy AUDS counter-UAV system. Army Technology. <https://www.army-technology.com/news/newsspanish-defence-ministry-to-install-blighters-auds-to-detect-malicious-drones-5851553/>
- [46] Borsari, F., & Davis, G. B. ", Jr. (2025, 9 abril). An Urgent Matter of Drones. CEPA. <https://cepa.org/comprehensive-reports/an-urgent-matter-of-drones/>
- [47] Show. (2023, 3 noviembre). ¿Qué es un enjambre de drones? Lumasky Drone Show. <https://lumasky.show/es/journal/que-es-un-enjambre-de-drones/>
- [48] Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols. (2020). MDPI. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3661>
- [49] Admin. (2025, 11 julio). Los enjambres de drones Starling by Zelenza operan autónomamente. Defensa.com. <https://www.defensa.com/industria/enjambres-starling-by-zelenza-inteligencia-distribuida-para>
- [50] Javaid, S., Saeed, N., Qadir, Z., Fahim, H., He, B., Song, H., & Bilal, M. (2023). Communication and Control in Collaborative UAVs: Recent Advances and Future Trends. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 24(6), 5719-5739. <https://doi.org/10.1109/tits.2023.3248841>
- [51] Bi, S., Li, K., Hu, S., Ni, W., Wang, C., & Wang, X. (2023, 6 diciembre). Detection and Mitigation of Position Spoofing Attacks on Cooperative UAV Swarm Formations. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2312.03787>
- [52] Ukraine collects vast war data trove to train AI models. (2024, 20 diciembre). Reuters. <https://www.reuters.com/technology/ukraine-collects-vast-war-data-trove-train-ai-models-2024-12-20/>
- [53] Vision-Based Formation Control for an Outdoor UAV Swarm With Hierarchical Architecture. (2023). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10185448>
- [54] MANDO DE ADIESTRAMIENTO Y DOCTRINA: DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN, D. O. (2016). PD4-300: EMPLEO DE LA ARTILLERÍA ANTIAÉREA (TOMO I: CAPÍTULOS). Ejército de Tierra.
- [55] BOE-A-2015-7238 Orden DEF/1265/2015, de 29 de junio, por la que se desarrolla la organización básica del Ejército de Tierra. (s. f.). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-7238
- [56] Evolución de la logística hacia nuevos modelos. (2026). Ministerio de Defensa. https://emad.defensa.gob.es/Galerias/CCDC/files/2024_evolucion-de-la-logistica-hacia-nuevos-modelos.pdf
- [57] EDA RESEARCH, AND INNOVATION PAPERS AWARD. (2023). European defence agency. https://eda.europa.eu/docs/default-source/brochures/eda-rti-papers-award-2023_web.pdf
- [58] Google Forms: sign-in. (s. f.). <https://docs.google.com/forms/u/0/>



- [59] Sener. (2024, 26 septiembre). SCR celebra 30 años de liderazgo en target drones. <https://www.group.sener/noticias/scr-celebra-30-anos-de-liderazgo-en-target-drones-y-su-reciente-integracion-en-el-grupo-sener/>
- [60] Canva. (s.f.). Plantilla DAFO <https://www.canva.com>
- [61] Dukowitz, Z. (2025, 18 julio). How Much Does a Drone Cost? An In-Depth Guide [New for 2025]. UAV Coach. <https://uavcoach.com/how-much-drone-cost/>
- [62] Llc, R. M. R. (s. f.). Flight Controller Sensors and Parts - RMRC. https://www.readymadec.com/collections/fpv-video-components/osd-dvr-ground-station/osd-fc-sensors-and-parts?srlid=AfmBOopWAL4urQO2KNJRboz1jUURDI47k4au9W5K2ko12wiB5_i3icXh&
- [63] Aerocamaras. (2025, 2 abril). Inicio | Aerocamaras Especialistas en Drones. Aerocamaras Especialistas En Drones. <https://aerocamaras.es/>
- [64] Servicio Técnico de Drones y mantenimiento. (2019, 30 julio). IbericaDron. <https://www.ibericadron.com/servicio-tecnico-drones>
- [65] Cegadrone SL. (2021, 22 abril). Cegadrone - Especialistas en inspecciones técnicas con UAS. Cegadrone. <https://cegadron.es/>
- [66] Catec, A. B. (2024, 5 diciembre). Inicio | Centros de vuelos ATLAS. Centros de Vuelos ATLAS. <https://www.atlascenter.aero/>
- [67] SCR Drones. <https://scrdrones.com/>
- [68] BCN3D Technologies. (2025, 19 agosto). BCN3D Technologies: Professional desktop FFF 3D Printers models. <https://www.bcn3d.com/>
- [69] SolidWorks. (s. f.). [Software]. <https://www.solidworks.com/>
- [70] Autodesk. (s. f.). [Software]. <https://www.autodesk.com>
- [71] Drongy Experience: highlights capítulo 3. (2022, 9 mayo). <http://intelligy.com/>. <https://intelligy.com/blog/2022/05/09/drongy-experience-highlights-capitulo-3/>
- [72] Mariana, & Mariana. (2024, 21 septiembre). QfD. Mundo Excel. <https://mundo-excel.com/qfd/>
- [73] Lucid visual collaboration suite: Log in. (s. f.). <https://lucid.app/>
- [74] Plan Director de RPAS. (Febrero de 2015). Ministerio de Defensa. <https://www.defensa.gob.es/Galerias/dgamdocs/plan-director-RPAS.pdf>
- [75] Singh, R., & Kumar, S. (2025, 17 enero). A Comprehensive Insights into Drones: History, Classification, Architecture, Navigation, Applications, Challenges, and Future Trends. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2501.10066>
- [76] Open Category — Low risk — Civil Drones | EASA. (2024, 10 julio). EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/open-category-low-risk-civil-drones>
- [77] Operations with UAS/Drones - Open category (subcategories A1, A2 and A3) | AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea - MTMS. (s. f.). <https://www.seguridadaaerea.gob.es/en/ambitos/drones/operaciones-con-uas-drones/operaciones-con-uas-drones---categoria-abierta-subcategorias-a1-a2-y-a3>
- [78] Carrasco, B. (2023, 26 mayo). Cervus, el sistema «único» del Ejército de Tierra para neutralizar drones con sello español. Infodefensa - Noticias de Defensa, Industria, Seguridad, Armamento, Ejércitos y Tecnología de la Defensa. <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4305213/cervus-sistema-unico-ejercito-tierra-neutralizar-drones-sello-espanol>
- [79] Redacción, & Amarante, A. (2023, 14 diciembre). Indra entrega el segundo sistema C-UAS Crow al EADA del Ejército del Aire. Infodron. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4648289/Indra-entrega-segundo-Crow-EADA-Ejercito-Aire>
- [80] EnforceAir2, the anti-drone system that the Spanish Air and Space Force is betting on. (2023, 16 octubre). 20minutos.com. <https://www.20minutos.es/noticia/5180970/0/enforce-air-2-el-sistema-antidron-por-el-que-apuesta-el-ejercito-del-aire-y-del-espacio-de-espana/>
- [81] El Ejército de Tierra muestra los fusiles RF C-RPAS, sus armas portátiles contra drones. (2023, 25



- marzo). Defensa y Aviación. <https://www.ouono.net/elelntir/2023/03/25/el-ejercito-de-tierra-muestra-los-fusiles-rf-c-rpas-sus-armas-portatiles-contra-drones/>
- [82] De Santos, Á. L. (2025, 1 junio). El Ejército del Aire invierte 1 millón de euros en sistemas antidrón e inhibidores para proteger sus bases aéreas. Infodron. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/5310406/ejercito-aire-refuerza-seguridad-bases-sistemas-antidrones-capaces-neutralizar-cualquier-amenaza>
- [83] Redacción. (2023, 13 julio). Escribano pone a prueba su torre Guardian 2.0 como sistema antidrón en Huelva. Infodron. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4367204/escribano-pone-prueba-torre-guardian-20-como-sistema-antidron-huelva>
- [84] Operación real de enjambre de drones | UAV Navigation. (2025, 4 agosto). <https://www.uavnavigation.com/empresa/blog/operacion-real-de-enjambre-de-drones>
- [85] Redacción. (2024, 28 noviembre). Rusia lanza la cifra récord de 188 drones Shahed en un ataque de saturación contra Ucrania. Galaxia Militar. <https://galaxiamilitar.es/rusia-lanza-la-cifra-record-de-188-drones-shahed-en-un-ataque-de-saturacion-contra-ucrania/>
- [86] Sujinee. (2023, 26 agosto). Swarm Intelligence: Using Collective Behavior for Military Applications – VPRC. <https://vprc.in/defence/swarm-intelligence-using-collective-behavior-for-military-applications/>
- [87] www.endoacustica.com. (s. f.). FPV Drone Tactics & Countermeasures | Endoacustica. <https://www.endoacustica.com/fpv-drone-tactics.php>
- [88] Flight Patterns for Swarms of Drones. (s. f.). <https://arxiv.org/html/2412.13119v1>
- [89] Research on Swarm Control Based on Complementary Collaboration of Unmanned Aerial Vehicle Swarms Under Complex Conditions. (2025). MDPI. <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/2/119>
- [90] Biologically Inspired Swarm Dynamic Target Tracking and Obstacle Avoidance. (s. f.). <https://arxiv.org/html/2410.11237v1>
- [91] Tang, R., Tang, J., Talip, M. S. A., Aridas, N. K., & Xu, X. (2025). Enhanced multi agent coordination algorithm for drone swarm patrolling in durian orchards. Scientific Reports, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88145-7>
- [92] Fan, R. (2023, 3 enero). OFFSET Envisions Swarm Capabilities for Small Urban Ground Units. DefesaNet. <https://www.defesanet.com.br/technology/offset-envisions-swarm-capabilities-for-small-urban-ground-units/>
- [93] Swarm Cooperative Navigation Using Centralized Training and Decentralized Execution. (2023). MDPI. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/3/193>
- [94] Nieberg, P. (2024, 8 agosto). Soldiers created their own drone attack simulator ahead of Middle East deployment. Task & Purpose. <https://taskandpurpose.com/soldiers-create-drone-simulation/>
- [95] Arranz, R., Carramiñana, D., De Miguel, G., Besada, J. A., & Bernardos, A. M. (2023). Application of Deep Reinforcement Learning to UAV Swarming for Ground Surveillance. Sensors, 23(21), 8766. <https://doi.org/10.3390/s23218766>
- [96] Enhancing UAV Swarm Tactics with Edge AI: Adaptive Decision Making in Changing Environments. (2024). MDPI. <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/10/582>
- [97] UDS. (s. f.). <https://www.udefenses.com/products/swarm-c2>
- [98] SwarmOS. (2024, 10 junio). Swarms+Art. <https://ars.electronica.art/swarms/research/swarm-os/>
- [99] SwarmLab: a Matlab Drone Swarm Simulator. (2020). Cornell University. <https://arxiv.org/abs/2005.02769>
- [100] Integrated Visual Augmentation System. (s. f.). Peosoldier. <https://www.peosoldier.army.mil/Equipment/Equipment-Portfolio/Project-Manager-Soldier-Warrior-Portfolio/Integrated-Visual-Augmentation-System/>
- [101] FlightAR: AR Flight Assistance Interface with Multiple Video Streams and Object Detection Aimed at Immersive Drone Control. (2024). Cornell University. <https://arxiv.org/abs/2410.16943>
- [102] Innovative Concept of Augmented Reality Training for Countering UAVs. (2024). AIMT. <https://www.aimt.cz/index.php/aimt/article/view/1965/427>



- [103] UgCS. (s. f.). [Software]. <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>
- [104] Luo, Z., Xiang, X., & Zhang, Q. (2019). Autopilot System of Remotely Operated Vehicle Based on Ardupilot. En Lecture notes in computer science (pp. 206-217). https://doi.org/10.1007/978-3-030-27535-8_19
- [105] Hoodman Drone Launch/Landing Pad (2 Ft). (s. f.). Advexure. <https://advexure.com/products/hoodman-drone-landing-pad-2-ft?srltid=AfmBOor0xGznczoqYJDhs7R1Nkov9kSiaDTIEBRjJ22a3Cyn96LTArPz>
- [106] Hoodman Drone Launch/Landing Pad (2 Ft). (s. f.). Advexure. <https://advexure.com/products/hoodman-drone-landing-pad-2-ft?srltid=AfmBOor0xGznczoqYJDhs7R1Nkov9kSiaDTIEBRjJ22a3Cyn96LTArPz>
- [107] Epstein, J. (2025, 30 julio). Ukraine's special operators used to dodge artillery shells. Now they're trying to survive Russian drones. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/ukraines-special-operators-focused-russian-artillery-now-drones-2025-7>
- [108] Loh, M. (2025, 28 abril). NATO can't ignore the Russian military's faster, more dangerous kill chain. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/russia-kill-chain-faster-more-precise-nato-ready-artillery-2025-4>
- [109] Slusher, M. (2025). Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience. <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>
- [110] Sabbagh, D. (2025, 23 abril). 'They cannot be jammed': fibre optic drones pose new threat in Ukraine. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2025/apr/23/they-cannot-be-jammed-fibre-optic-drones-pose-new-threat-in-ukraine>
- [111] Fiber-Optic Drone Technologies: A Multidisciplinary Review from Communication Fundamentals to Military Applications. (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/392512531_Fiber-Optic_Drone_Technologies_A_Multidisciplinary_Review_from_Communication_Fundamentals_to_Military_Applications
- [112] Standardized Evaluation of Counter-Drone Systems: Methods, Technologies, and Performance Metrics. (s. f.). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/391557861_Standardized_Evaluation_of_Counter-Drone_Systems_Methods_Technologies_and_Performance_Metrics
- [113] Counter-Unmanned Aircraft System (C-UAS). (2023). En Army Techniques Publication - Department Of The Army (N.o 3-01.81). Headquarters. <https://irp.fas.org/doddir/army/atp3-01-81.pdf>
- [114] Wikipedia contributors. (2025, 1 mayo). Swarming (military). Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Swarming_\(military\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swarming_(military))
- [115] Hambling, D. (2016, 7 enero). Drone swarms will change the face of modern warfare. WIRED. <https://www.wired.com/story/drone-swarms-change-warfare/>
- [116] PLA CONCEPTS OF UAV SWARMS AND MANNED/UNMANNED TEAMING. (2025). China Aerospace Studies Institute. <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/CASI/documents/Research/Other-Topics/2025-04-21%20PLA%20Concepts%20of%20UAV%20Swarms%20and%20Manned-Unmanned%20Teaming.pdf>
- [117] Examining application-specific resiliency implementations in UAV swarm scenarios. (2023). Intelligence & Robotics. <https://www.oaepublish.com/articles/ir.2023.27>
- [118] A Critical Step Toward Harnessing the Power of Autonomous Systems. (2025, mayo). Army University Press. <https://www.armyupress.army.mil/journals/military-review/online-exclusive/2025-ole/defining-swarm/>
- [119] Drone (UAV) swarm technology: Transforming military potential. (2025, 18 marzo). MARIS - TECH. <https://www.maris-tech.com/blog/drone-swarm-its-impact-at-the-military-scene-maris-tech/>
- [120] Soria, E., Schiano, F., & Floreano, D. (2020, 6 mayo). SwarmLab: a Matlab Drone Swarm Simulator. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2005.02769>
- [121] AI Integration for Scenario Development - Training the Whole-of-Force. (2024, mayo). Army University Press. <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/Online-Exclusive/2024-OLE/AI->



[Integration-for-Scenario-Development/](#)

- [122] Standardizing Army After Action Review Systems. (1996). En U.S. ARMY RESEARCH INSTITUTE (N.o 1702). U.S. Army Research Institute. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA322044.pdf>
- [123] The Role of Debriefing in Simulation-Based Learning. (2007, season-02). Simulation In Healthcare: The Journal Of The Society For Simulation In Healthcare, <https://www.aku.edu/cime/Documents/Reading%20material%20module%206.pdf>
- [124] Svendsen, B. T., Petersen, L. F., Skjelsager, A., Lippert, A., & Østergaard, D. (2024). Using simulation scenarios and a debriefing structure to promote feedback skills among interprofessional team members in clinical practice. *Advances In Simulation*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s41077-024-00303-5>
- [125] Patria to present its defence solutions at DSEI 2023. (2023, septiembre). Defence Industry Europe. <https://defence-industry.eu/patria-to-present-its-defence-solutions-at-dsei-2023>
- [126] VIRTRA - Army Technology. (2021, 30 noviembre). Army Technology. <https://www.army-technology.com/contractors/training/virtra-systems/>
- [127] Hambling, D. (2020, 24 septiembre). Russia uses 'Swarm of drones' in military exercise for the first time. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/davidhambling/2020/09/24/russia-uses-swarm-of-drones-in-military-exercise-for-the-first-time/>
- [128] Chinese drill against UAV swarm yields limited success. (2024, 10 septiembre). *Default*. <https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/c4isr/chinese-drill-against-uav-swarm-yields-limited-success>
- [129] Redacción. (2024, junio 12). Artillería antiaérea contra drones: el Ejército de Tierra pone a prueba sus medios para abatir UAV. *Infodefensa - Noticias de Defensa, Industria, Seguridad, Armamento, Ejércitos y Tecnología de la Defensa*. <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4864378/artilleria-contra-drones-ejercito-tierra-pone-prueba-defensa-aerea-frente-ataques-uav>
- [130] HuffPost, R. (2025, 16 mayo). El ejército portugués despliega su gran operación en respuesta a crisis y España responde a la llamada. *ElHuffPost*. <https://www.huffingtonpost.es/global/el-ejercito-portugues-despliega-gran-operacion-respuesta-crisis-espana-responde-llamada.html>
- [131] Newsroom Infobae. (2024, 2 octubre). La Armada se adiestra para repeler un ataque masivo de drones en un ejercicio táctico. *Infobae*. <https://www.infobae.com/espana/agencias/2024/10/02/la-armada-se-adiestra-para-repeler-un-ataque-masivo-de-drones-en-un-ejercicio-tactico/>
- [132] Gaza Conflict 2021 Assessment: Observations and Lessons. (s. f.). En The Jewish Institute For National Security Of America. <https://jinsa.org/wp-content/uploads/2021/10/Gaza-Assessment.v8-1.pdf>
- [133] Loewenson, I. (2024, 30 abril). What Marines may be learning from Houthi tactics in the Red Sea. *Marine Corps Times*. <https://www.marinecorpstimes.com/news/your-marine-corps/2024/04/30/what-marines-may-be-learning-from-houthi-tactics-in-the-red-sea/>
- [134] Frantzman, S. (2025, 24 junio). Israel sees increasing success against Iranian drones, drone and missile attacks continue. *FDD's Long War Journal*. <https://www.longwarjournal.org/archives/2025/06/israel-sees-increasing-success-against-iranian-drones-drone-and-missile-attacks-continue.php>
- [135] REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/947 DE LA COMISIÓN de 24 de mayo de 2019 relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. (2019). En *Boletín Oficial del Estado* (11.6.2019). Comisión Europea. <https://www.boe.es/doue/2019/152/L00045-00071.pdf>
- [136] Kallenborn, Z., Kallenborn, Z., & Kallenborn, Z. (2024, 20 marzo). Swarm Clouds on the Horizon? Exploring the Future of Drone Swarm Proliferation. *Modern War Institute* -. <https://mwi.westpoint.edu/swarm-clouds-on-the-horizon-exploring-the-future-of-drone-swarm-proliferation/>
- [137] Mena, M. M. (2025, 23 agosto). La irrupción de los drones en la lucha contra los incendios forestales: la actuación nocturna y la capacidad de transporte marcarán su futuro. *Infobae*. <https://www.infobae.com/espana/2025/08/23/la-irrupcion-de-los-drones-en-la-lucha-contra-los-incendios-forestales-la-actuacion-nocturna-y-la-capacidad-de-transporte-marcaran-su-futuro/>
- [138] Finabel, & Finabel. (2020, 2 diciembre). Drone Swarms – A Future Threat to Armed Forces? - Finabel. Finabel - Finabel promotes the interoperability of European land forces, whilst complementing EU and NATO structures, through research and decision-making recommendations. <https://finabel.org/drone-swarms-a-future-threat-to-armed-forces/>



Francisco José Culiañez Alcolea

[139] López, C. D. V. (2025b, mayo 9). Enjambres de drones: el futuro de la guerra ha llegado. Ejércitos. <https://www.revistaejercitos.com/articulos/enjambres-de-drones-el-futuro-de-la-guerra-ha-llegado/>

[140] ENAIRE. <https://www.enaire.es/home>



ANEXOS

ANEXO I: TIPOS DE DRONES

ANEXO II: MEDIOS C-UAS EN ESPAÑA

ANEXO III: ENCUESTAS

ANEXO IV: ENTREVISTAS

ANEXO V: ORGANIGRAMA RAAA-74

ANEXO VI: ANÁLISIS DE RIESGOS

ANEXO VII: CASA DE LA CALIDAD

ANEXO VIII: “MAKE OR BUY”

ANEXO IX: STAKEHOLDERS

ANEXO X: REALIZACIÓN DE PIEZAS POR IMPRESIÓN 3D

ANEXO XI: PERMISOS DE VUELO UAV EN DIFERENTES EJERCICIOS



Anexo I Tipos de Drones

Dentro de los diversos tipos de drones existentes en la actualidad, su clasificación puede abordarse desde criterios técnicos, normativos y estratégicos, atendiendo a aspectos como su configuración estructural, tamaño y peso, sistema de propulsión, ámbito de aplicación y el marco regulatorio en el que operan (Singh y Kumar, 2025 [75]; Ministerio de Defensa [74], 2015; EASA, 2019 [76] [77]).

1. Configuración estructural y aerodinámica

La configuración aerodinámica determina el método de generación de sustentación y, por tanto, las capacidades operativas y mecánicas del dron:

a. Multirrotores

- i. Tricópteros: tres brazos con motores brushless, equilibrio entre maniobrabilidad y simplicidad mecánica, aunque su estabilidad es inferior frente a configuraciones con mayor número de rotores.
- ii. Cuadricópteros: con cuatro brazos y cuatro motores dispuestos simétricamente, constituyen la configuración más habitual en el mercado civil; ofrecen estabilidad destacada, facilidad de control y autonomías de 20 a 34 minutos.
- iii. Hexacópteros: seis brazos con motores que permiten soportar cargas de 2 a 6 kg; empleados en topografía y filmación aérea, mantienen autonomías de 25 a 40 minutos y mejor resistencia al viento.
- iv. Octocópteros: con ocho brazos y motores, alcanzan gran estabilidad y potencia, adecuados para cine profesional y transporte de cargas de hasta 12 kg.
- v. Coaxiales: incorporan dos motores superpuestos por brazo, lo que duplica el empuje y aporta redundancia operativa, permitiendo mantener el vuelo ante fallos parciales.

b. Ala fija: Con una estructura similar a la de un avión, proporciona mayor eficiencia aerodinámica y autonomía que los multirrotores, aunque carece de capacidad de vuelo estacionario. Se emplea en agricultura de precisión, vigilancia fronteriza y patrullas de largo alcance.

c. Rotor único (helicópteros): Basados en un rotor principal y uno de cola, ofrecen mayor autonomía y capacidad de carga; son comunes en aplicaciones industriales y militares (Plan Director RPAS, Grupo II–III).

d. VTOL híbridos (Vertical Take-Off and Landing): Combinan despegue vertical y vuelo eficiente tipo ala fija. Se consideran clave en logística y operaciones tácticas militares, donde el espacio para el despegue es limitado.

2. Tamaño y peso

La clasificación por tamaño y peso varía según el enfoque técnico, normativo o estratégico.

a. Clasificación técnica (Singh y Kumar, 2025)

- i. Nano UAVs (<250 mm): utilizados en misiones de reconocimiento cercano y vigilancia táctica (p. ej., Black Hornet Nano).



- ii. Micro UAVs (250–500 mm): empleados en entornos urbanos para vigilancia discreta.
 - iii. Mini UAVs (0,5–2 m): aplicados en agricultura de precisión y cartografía.
 - iv. Small UAVs (2–5 m): inspección industrial y transporte ligero.
 - v. Tactical UAVs (5–10 m): misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) militares.
 - vi. Strike o HALE (>10 m): sistemas de gran altitud y larga duración (p. ej., MQ-9 Reaper).
- b. Clasificación normativa civil (EASA/AESA, Reglamento UE 2019/947)
- i. Clase C0 (≤ 250 g): operación en categoría abierta A1, sin registro obligatorio.
 - ii. Clase C1 (≤ 900 g): operación A1, hasta 120 m de altura, con geoconsciencia ²¹e identificación remota.
 - iii. Clase C2 (≤ 4 kg): operación A2/A3, con “slow mode” (5 m/s).
 - iv. Clases C3 y C4 (≤ 25 kg): operación A3, con geolimitadores ²²(C3) o control manual (C4).
- c. Clasificación estratégica-militar (Plan Director RPAS, 2015–2026)
- i. Grupo I (<150 kg): mini y micro RPAS para misiones tácticas de reconocimiento cercano.
 - ii. Grupo II (150–600 kg): sistemas tácticos de mayor alcance, con capacidad de vuelo prolongado.
 - iii. Grupo III (>600 kg): sistemas MALE/HALE para vigilancia estratégica y ataques de precisión.

3. Propulsión y fuente de energía

El sistema de propulsión condiciona la autonomía, el mantenimiento y las aplicaciones:

- a. Eléctrica (Li-ion/Li-Po): predominante en drones civiles y recreativos, con autonomías de 15 a 45 min.
- b. Híbrida gasolina-eléctrica: combina un motor térmico con un generador a bordo para recargar baterías, logrando autonomías de 2 a 10 h y rangos de hasta 1 000 km; empleados en logística y misiones tácticas.
- c. Combustión pura (2T/4T o diésel): mayor potencia y recarga rápida, habitual en helicópteros monorrotor industriales y militares.
- d. Solar: alas con celdas fotovoltaicas que superan las 24 h de autonomía, útiles en misiones HALE (p. ej., Zephyr S).

²¹ Geoconsciencia: capacidad de un sistema UAV para conocer en tiempo real su posición geográfica y actuar en función de ella, integrando datos de navegación y entorno.

²² Geolimitadores: barreras virtuales programadas que restringen el vuelo de un UAV a un área determinada, impidiendo que sobrepase zonas no autorizadas.



- e. Hidrógeno (pila de combustible): triplica la autonomía de las baterías convencionales, aunque sigue siendo experimental por su elevado coste y necesidades logísticas.

4. Dominio de aplicación

- a. Civil y comercial:
 - i. Fotografía y vídeo: cuadricópteros ligeros (DJI Mini, Mavic).
 - ii. Topografía y fotogrametría: multirrotores y alas fijas ligeras con GNSS RTK.
 - iii. Agricultura de precisión: alas fijas y VTOL híbridos con sensores multiespectrales.
 - iv. Entrega de paquetería: hexacópteros y VTOL híbridos (2–5 kg de carga, 15–30 km de recorrido).
- b. Seguridad y vigilancia: patrullas fronterizas, inspección de infraestructuras críticas y protección de eventos con multirrotores pesados y helicópteros monorrotor.
- c. Militar (Ver Tabla 3):
 - i. ISR: mini y tácticos (Grupo I y II).
 - ii.UCAV de ataque: sistemas MALE y HALE (Grupo III).
 - iii. Enjambres de microdrones: guerra electrónica y saturación táctica.

5. Tendencias emergentes

- a. Enjambres coordinados: misiones colaborativas con control distribuido, alta resiliencia a interferencias y bajo coste unitario.
- b. eVTOL para transporte de personas: desarrollo de taxis aéreos (Joby, Volocopter, EHang).
- c. Integración 5G/6G: habilita vuelos BVLOS con latencias <20 ms y transmisión en 4K.
- d. IA y autonomía avanzada: navegación adaptativa con algoritmos de percepción y evasión de obstáculos (Skydio 2, RacerAI).



CLASIFICACIÓN UAV OTAN				
Clase (MTOW)	Categoría	Empleo	Altitud de operación AGL	Radio de Misión
CLASE I ≤ 150 Kg	MICRO < 2 kg	Táctico (Sección)	Hasta 200 pies	5 km (LOS)
	MINI 2-20 Kg	Táctico (Compañía)	Hasta 1.000 pies	25 km (LOS)
	LIGEROS >20 kg	Táctico (Batallón)	Hasta 1.200 pies	50 km (LOS)
CLASE II ≤600 Kg	TÁCTICO	Táctico (Brigada)	Hasta 10.000 pies	200 Km (LOS)
CLASE II >600 Kg	MALE (Medium Altitude Long Endurance)	Operacional	Hasta 45.000 pies	Sin límite (BLOS)
	HALE (High Altitude Long Endurance)	Estratégico	Hasta 65.000 pies	Sin límite (BLOS)
	Combate	Estratégico	Hasta 65.000 pies	Sin límite (BLOS)

23

Tabla 3: Clasificación UAV según NATO. Fuente: [74]

²³ LOS: tipo de operación con drones en la que el piloto mantiene contacto visual directo con la aeronave durante todo el vuelo, sin ayuda de dispositivos electrónicos de apoyo visual.

BLOS: operaciones donde el dron se controla más allá del alcance visual del piloto, usando sistemas de control remoto, lo que exige tecnologías adicionales de navegación y seguridad.

Anexo II Medios C-UAS en España

El Ejército de Tierra español ha incorporado diversos sistemas especializados en la detección y neutralización de aeronaves no tripuladas de pequeño tamaño (Clase I), que incluyen desde microdrones hasta mini-UAV y plataformas de categoría *small*. Los microdrones, como el Phantom II, tienen un peso máximo al despegue inferior a 2 kg y están diseñados para ser transportados y operados por un único combatiente. Los mini-UAV, con masas comprendidas entre 2 y 15 kg, incluyen modelos como el Raven, empleados en misiones de corto alcance orientadas a la observación y el reconocimiento. Por su parte, los drones de categoría *small*, como el Scan Eagle utilizado por la Armada Española, alcanzan los 18 kg y presentan una envergadura de 3,11 metros, lo que amplía significativamente las capacidades de vigilancia táctica. En conjunto, estos sistemas buscan contrarrestar la creciente amenaza que representan los drones comerciales y los UAV FPV (*First Person View*) utilizados con fines hostiles.

- **Sistema Cervus III:** Sistema integrado de detección y neutralización de drones de pequeño tamaño, desarrollado por TRC y Escribano para el Ejército de Tierra. Montado sobre vehículo VAMTAC ST5, combina radar 3D, sensores optrónicos y de radiofrecuencia, apoyados por inteligencia artificial para asistencia a la decisión (requiere siempre autorización humana para la neutralización). Es capaz de detectar objetivos a distancias estimadas de hasta 7–10 kilómetros y clasificar amenazas tipo UAV Clase I (hasta 15 kg). Incorpora doble capacidad de neutralización mediante inhibición RF (soft-kill) y una estación de armas remota Guardian 2.0 con ametralladora de 12,7 mm (hard-kill). Su configuración móvil permite protección dinámica de convoyes y despliegues avanzados. Presenta limitaciones de eficacia en entornos electromagnéticos saturados y requiere tripulación entrenada para su correcta operación. Actualmente se encuentra en fase final de certificación y primeras entregas operativas. [78]



Figura 17: Sistema Cervus III. Fuente: [78]

- **Sistema Crow:** Sistema de guerra electrónica desarrollado por Indra con capacidad de integración con 27 tipos de sensores diferentes. Utiliza detección pasiva para identificar drones comerciales DJI, Parrot y otros fabricantes mediante análisis de firmas de radiofrecuencia. Cumple con el protocolo OTAN C-UAS AEDP-4869 para intercambio de información. Tiene un alcance de detección de 8 kilómetros y ha sido probado operativamente en Mali. Su configuración modular permite adaptación a diferentes plataformas (terrestres, navales y aéreas). Presenta limitaciones con drones que operan en modo autónomo sin enlace de comunicación activo. [79]



Figura 18: Sistema Crow. Fuente: [79]

- **Sistema EnforceAir 2:** Sistema de toma de control remoto (“takeover”) de drones comerciales adquirido por el Ejército del Aire y del Espacio. Desarrollado por Target Tecnología en colaboración con D-Fend Solutions, permite detectar y asumir el control de la señal de comunicación del dron, forzando su aterrizaje seguro para posterior análisis forense. Su tasa de neutralización supera el 90% frente a drones comerciales del mercado (DJI, Parrot, Autel, entre otros). Dispone de configuraciones móvil (mochila), táctica (vehículo) y estacionaria (protección de instalaciones), con un alcance efectivo de entre 2 y 5 kilómetros según el entorno. Su eficacia disminuye ante drones militares, modificados o con protocolos de comunicación cifrados. Se encuentra operativo desde 2023 en misiones de protección de bases aéreas y eventos de alto riesgo. [80]



Figura 19: Sistema EnforceAir 2. Fuente: [80]

- **Fusiles Anti-Drones RF C-RPAS:** Armas portátiles de neutralización electrónica empleadas por unidades de seguridad y fuerzas desplegadas. Operan en las bandas de 2,4 GHz y 5,8 GHz, bloqueando las comunicaciones entre el dron y su operador, lo que provoca su aterrizaje o retorno automático. Alcance efectivo de 1 a 2 kilómetros en condiciones óptimas y autonomía variable entre 30 y 120 minutos, dependiendo del modelo. Son particularmente efectivos contra drones ligeros (<5 kg) de uso comercial. Presentan limitaciones frente a sistemas autónomos o equipados con técnicas de salto de frecuencia. Se utilizan como respuesta inmediata de bajo coste en instalaciones militares y despliegues tácticos. No se publican especificaciones detalladas por motivos de seguridad operativa. [81]



Figura 20: Sistema Fusiles anti drones RF C-RPAS. Fuente: [81]

- **Sistemas AdeVex:** Plataforma de detección pasiva de radiofrecuencia destinada a la protección de bases aéreas frente a amenazas no tripuladas. Detecta emisiones de control y telemetría de drones comerciales en un radio aproximado de 6 kilómetros, sin emitir señales propias, lo que asegura discreción electromagnética y baja probabilidad de detección por parte del adversario. Es capaz de integrarse con otros sistemas C-UAS para la neutralización final. Aunque ofrece buena cobertura frente a drones de uso civil, presenta limitaciones ante plataformas autónomas que no mantienen enlace activo con su operador. Actualmente se encuentra en fase de instalación en distintas bases del Ejército del Aire tras adjudicación de contratos en 2025. [82]



Figura 21: Imagen creada con IA del Sistema AdeVex. Fuente: Perplexity

- **Sistema Guardian 2.0:** Estación de armas remota (RWS) desarrollada por Escribano, diseñada para neutralización cinética de drones pequeños. Equipada con ametralladora de 12,7 mm, sistemas de puntería día/noche y operación remota estabilizada, permite la intercepción de objetivos a distancias de hasta 4 kilómetros en condiciones óptimas. Puede operar como subsistema hard-kill dentro del Cervus III o integrarse en otras plataformas fijas o móviles. Requiere munición adecuada y personal entrenado, con limitaciones de capacidad de fuego sostenido en configuraciones móviles. [83]



Francisco José Culiañez Alcolea



Figura 22: Sistema Guardian 2.0. Fuente: [83]



Anexo III Encuestas

Con el objetivo de complementar el análisis teórico y obtener información directa del ámbito operativo, se diseñó una encuesta de carácter cuantitativo dirigida al personal de todas las escalas pertenecientes al Mando de Artillería Antiaérea. La finalidad fue conocer la valoración general del proyecto propuesto y detectar las necesidades específicas de las unidades en relación con la aplicación de enjambres UAV en la instrucción táctica. La población objetivo correspondía al personal militar vinculado al MAAA, mientras que la muestra estuvo compuesta por 87 participantes, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la accesibilidad del colectivo, reconociendo la posible limitación de representatividad.

El cuestionario, elaborado a través de Google Forms, constaba de seis preguntas tipo test orientadas a recoger datos cuantitativos sobre la percepción y el interés en la implementación del proyecto. Los resultados fueron analizados de manera descriptiva, utilizando porcentajes y representaciones gráficas para reflejar las tendencias generales de las respuestas.

La primera encuesta está propuesta sobre encuadramiento de los enjambres UAV en unidades de Artillería Antiaérea (Ver figura 14 y Figura 15).

La segunda encuesta hace referencia a la necesidad de incorporar este tipo de tecnología a las unidades (Ver figura 23)

¿Cree usted que es necesario incorporar esta tecnología a las unidades de Artillería antiaérea?

- ☐ Si, cuanto antes
- ☐ Si, poco a poco
- ☐ No es necesario
- ☐ NS/NC

Figura 23: Encuesta sobre la necesidad de incorporar los enjambres UAV a las unidades. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

En vista de los resultados, la inmensa mayoría de los encuestados creen que es necesario incorporar esta tecnología cuanto antes, frente a un tercio que considera que poco a poco. Es interesante resaltar que nadie ha contestado que no sea necesario.

¿Cree usted que es necesario incorporar esta tecnología a las unidades de Artillería antiaérea?

86 respuestas

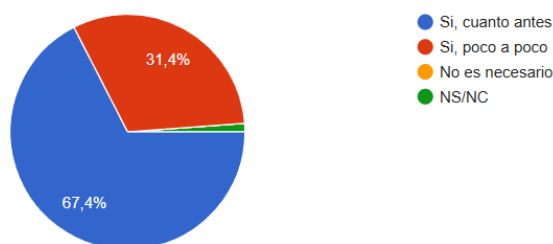


Figura 24: Respuesta encuesta sobre la necesidad de incorporar los enjambres UAV a las unidades.



La siguiente encuesta preguntó cuál era la mejor opción para el desarrollo de los drones, a partir de un diseño propio o con drones civiles Humming-Prop v2, DARPA OFFSET o UAV Navigation LISS (Ver Figura 25). Esta encuesta se realizó al personal perteneciente al RAAA 94. Esta encuesta complementa a la solución obtenida por la Casa de la Calidad (Ver Anexo VIII: Casa de la Calidad), aportando más fuerza a la decisión final.

En caso de implementarse, ¿qué modelo considera usted más adecuado?

- ☐ Diseño propio
- ☐ Adquisición de uno de empresa española (Humming-Prop v2)
- ☐ Adquisición de uno de empresa/ejército extranjero (DARPA OFFSET, UAV Navigation LISS)
- ☐ Otro: _____

Figura 25: Encuesta sobre la mejor opción de elaboración de drones. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

Los resultados de la misma son bastante variados, pero con una disposición bastante amplia a la adquisición de un sistema que sea fabricado por una empresa española.

En caso de implementarse, ¿qué modelo considera usted más adecuado?

86 respuestas

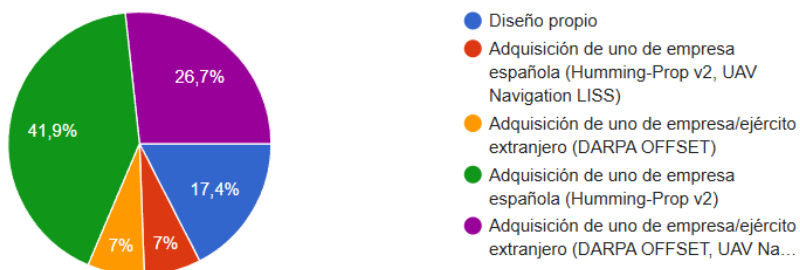


Figura 26: Respuesta encuesta sobre la mejor opción de elaboración de drones

La cuarta encuesta realizada está orientada a, en caso de que pudiera tener otro uso el sistema, para una mayor amortización, en qué ámbito se podría usar.



¿Qué otros usos, además de la instrucción, considera que podrían darse a los drones en su unidad?

- ☐ Reconocimiento y vigilancia del espacio aéreo o del terreno
- ☐ Apoyo logístico
- ☐ Evaluación de daños en combate
- ☐ Otro: _____

Figura 27: Encuesta sobre diferentes usos de los drones. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

El resultado es abrumador en cuanto a las respuestas obtenidas. Casi el 90% considera que un buen uso alternativo para estos sistemas sería el reconocimiento y vigilancia del espacio aéreo o del terreno, quedando el presente trabajo abierto a nuevas investigaciones sobre el tema.

¿Qué otros usos, además de la instrucción, considera que podrían darse a los drones en su unidad?

87 respuestas

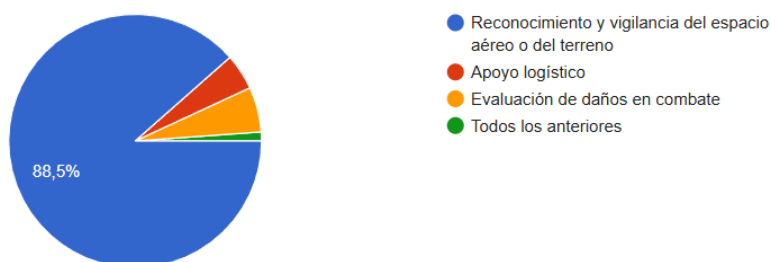


Figura 28: Respuesta encuesta sobre diferentes usos de los drones

La siguiente encuesta realiza una pregunta acerca de cómo ve el personal perteneciente al ejército la idea de una posible incorporación de estos sistemas y su utilidad.

¿Qué nivel de utilidad cree que aportarían los enjambres UAV en su formación?

- ☐ Muy alta
- ☐ Alta
- ☐ Media
- ☐ Baja
- ☐ Muy baja

Figura 29: Encuesta sobre la utilidad de UAV en la instrucción. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

Aquí podemos observar que nadie considera que su utilidad sea baja o muy baja, y en su



defecto se valora bastante el uso de estos sistemas para la instrucción de las unidades.

¿Qué nivel de utilidad cree que aportarían los enjambres UAV en su formación?

87 respuestas

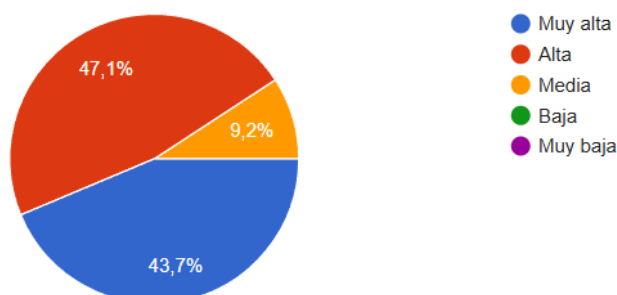


Figura 30: Resultado encuesta sobre la utilidad de UAV en la instrucción

Por último, se realizó un pequeño sondeo para ver cuál sería el valor añadido, en su opinión, al introducir este tipo de herramienta en la unidad y en ejercicios de instrucción y adiestramiento.

En tu opinión, ¿Cuál sería el mayor valor añadido de integrar UAV en maniobras militares reales?

- ☐ Evaluar mejor la toma de decisiones de los mandos
- ☐ Aumentar la presión psicológica y el estrés realista en combate
- ☐ Obtener datos objetivos para análisis post-ejercicio
- ☐ Ensayar nuevas tácticas de defensa anti-dron
- ☐ Otro: _____

Figura 31: Encuesta sobre el valor añadido al implementar el enjambre. Fuente: Elaboración Propia a partir de [58]

Aquí se vuelve a subrayar la idea de la carencia de instrucción en este ámbito y la alarmante necesidad en la que se encuentran las unidades debido a esta falta de doctrina.



En tu opinión, ¿Cuál sería el mayor valor añadido de integrar UAV en maniobras militares reales?

87 respuestas

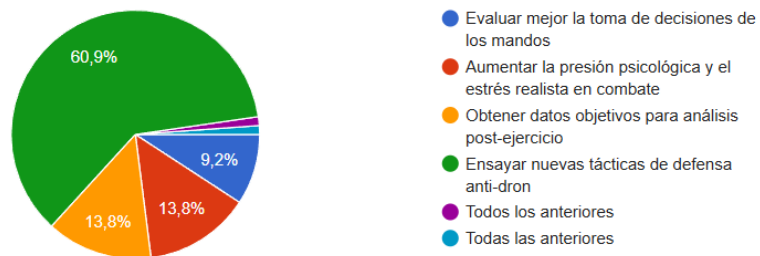


Figura 32: Resultado encuesta sobre el valor añadido al implementar el enjambre



Anexo IV Entrevistas

Con el propósito de complementar la información obtenida mediante la encuesta y profundizar en el análisis cualitativo del proyecto, se realizaron cuatro entrevistas presenciales dirigidas a personal del Grupo HAWK, perteneciente a las tres escalas, junto con un representante de una empresa civil vinculada al ámbito UAV. Los participantes fueron seleccionados de forma intencionada, en función de su experiencia y conocimiento específico en instrucción táctica y sistemas no tripulados, asumiendo la posible limitación de representatividad inherente a dicho procedimiento. El objetivo principal de estas entrevistas fue recoger las opiniones y percepciones del personal directamente implicado, para identificar los aspectos más relevantes, las necesidades formativas y las posibles áreas de mejora en la aplicación de enjambres UAV en ejercicios de instrucción. Los encuentros fueron de carácter abierto, permitiendo a los entrevistados expresarse con total libertad y aportar una visión más completa y contextualizada sobre la temática estudiada.

Entrevista nº1 Oficial:

1. ¿Considera que el uso de enjambres de drones puede mejorar la instrucción de los oficiales en defensa aérea?

Sí, los enjambres de UAV representarían una herramienta revolucionaria para el adiestramiento. Los enjambres nos permitirían simular escenarios realistas de saturación de defensas, obligándonos a desarrollar capacidades de toma de decisiones rápidas y coordinaciones que son imposibles de entrenar con blancos convencionales.

2. ¿Son un medio necesario?

Sin duda, son imprescindibles debido a la escasa situación de conocimiento sobre el tema. Los conflictos actuales nos demuestran que las amenazas aéreas han evolucionado hacia este tipo de ataques. Observando lo ocurrido en Ucrania y otros teatros de operaciones, vemos que ya no enfrentamos amenazas individuales, sino múltiples vectores simultáneos que requieren respuestas complejas. Sin este tipo de adiestramiento, estaríamos preparándonos aún para conflictos del pasado, no para las realidades operativas actuales.

3. ¿Cree que el entrenamiento con UAV podría reemplazar o complementar ciertos ejercicios con fuego real?

Debe ser complementario, no sustitutivo. El fuego real sigue siendo irremplazable para el adiestramiento en procedimientos de tiro y manejo de armamento. Sin embargo, los UAV ofrecen ventajas operativas significativas: mayor frecuencia de entrenamiento, reducción de costes logísticos, y capacidad de simular amenazas específicas de manera repetitiva. Permiten entrenar la cadena de detección-identificación-neutralización sin los costes y limitaciones del fuego real, especialmente valioso para la instrucción y el perfeccionamiento de nuestros procedimientos.

4. Desde su experiencia en instrucción o maniobras, ¿qué papel cree que podrían tener los enjambres de UAV en la simulación de amenazas realistas para la gente?

Los enjambres son fundamentales para simular la saturación de sensores y la coordinación de amenazas múltiples que caracterizan los conflictos modernos. Bajo mi experiencia he visto cómo los ejercicios tradicionales no logran replicar la presión y complejidad de enfrentar múltiples contactos simultáneos. Los enjambres nos permitirían entrenar la priorización de amenazas, la gestión de munición limitada, y la coordinación entre diferentes sistemas de armas bajo estrés operativo real.

5. ¿Ve viable su integración en las unidades actuales de artillería, teniendo en cuenta medios y personal?



Sí, es viable, pero hay que ser realistas con los tiempos y recursos que tenemos ahora mismo. Nuestro personal ya tiene formación técnica sólida y puede adaptarse, pero necesitamos cursos específicos para operadores de drones. El problema principal no es la tecnología sino organizar la logística, mantenimiento y crear nuevos procedimientos operativos y doctrina.

6. Observando los conflictos actuales y mirando su progresión, ¿cómo cree que evolucionará esta tecnología?

La evolución, al igual que la propia tecnología, será hacia mayor autonomía, coordinación mejorada y capacidades de enjambre más sofisticadas. Veremos sistemas con inteligencia artificial integrada que permitan coordinación automática entre múltiples plataformas, capacidades de adaptación táctica en tiempo real, y mayor resistencia a las contramedidas electrónicas. Vamos, que serán medios que nos darán grandes problemas al combatiente.

7. ¿Cómo cree que se podrán contrarrestar estos medios en el futuro?

La defensa contra enjambres debe ir por capas, como toda defensa aérea. Detectar temprano, interrumpir sus comunicaciones y, si es necesario, derribarlos. España ya trabaja con sistemas como el CERVUS que coordina automáticamente radares, interferencia electrónica y armas. El futuro estará en sistemas con IA que respondan automáticamente a ataques masivos, ya que los humanos no procesamos tanta información tan rápido, pero siempre manteniendo al humano con la decisión final.

8. ¿Cree que el uso de enjambres UAV puede ayudar a mejorar la capacidad de reacción y toma de decisiones de las unidades? ¿De qué manera?

Definitivamente. Los enjambres nos obligarían a procesar información compleja rápidamente, priorizar amenazas dinámicas, y coordinar recursos limitados eficientemente. Este tipo de adiestramiento desarrollaría capacidades cognitivas que se transfieren a otros escenarios operativos. Además, mejoran la coordinación inter-armas y la comunicación bajo estrés, elementos críticos en operaciones modernas donde la velocidad de decisión puede determinar el éxito de la misión.

Entrevista nº2 Suboficial:

1. ¿Cree que la incorporación de enjambres UAV podría transformar la forma en que se desarrollan los ejercicios tácticos

Sí. Con los recientes conflictos queda patente que el empleo de UAVs marca líneas realmente trascendentales en el desarrollo de una guerra. Por lo tanto, el empleo de este tipo de tecnología en ejercicios se convierte en un punto de inflexión entre un tipo de combate más convencional en el que se espera hacer frente a objetivos mucho más grandes y de menor entidad, a un combate tecnológicamente muy avanzado y de rápido desarrollo, donde se enfrentan objetivos de muy reducido tamaño y en "grupos" de mayor entidad.

2. ¿Cómo cree que pueden mejorar los enjambres UAV a un Grupo de Artillería?

En la gestión de los objetivos o cómo técnicamente se denominan, trazas. Ayudaría, claramente, a mejorar las capacidades de identificación y adquisición de múltiples blancos, siendo acciones que pondrían a prueba tanto a los elementos de los que se componen los sistemas de defensa antiaérea como al personal que los opera.

3. ¿Cree que sería una buena incorporación al grupo de Artillería?

Sin lugar a dudas, "toda piedra hace pared". Sin embargo, sería, en mi opinión, una "asignatura" que habría que coger con pinzas dado el sistema que se emplea todavía hoy en idea y las capacidades que este aporta, así como sus limitaciones. Por el momento lo emplearía como una especie de área de I+D para "estudiar" el comportamiento tanto del sistema HAWK como de las aeronaves en sí en un ambiente táctico.



4. ¿Qué dificultades cree que podrían aparecer al incorporar drones en la instrucción del personal?

Principalmente la formación y estandarización de la misma de todo aquel piloto/operador de UAS perteneciente a la unidad sin la necesidad de recurrir a terceros para dar ese soporte durante la instrucción. Y en menor medida la "creación" e "implementación" de la cultura UAS entre el personal.

5. ¿Qué ventajas tácticas observa en el uso de enjambres de drones frente a otros métodos de simulación?

Básicamente que dejaríamos de estar hablando de objetivos/trazas simulados. Resultaría idóneo, excelso; el tener a disposición gran cantidad de aeronaves de este tipo en el que se puedan recrear escenarios prácticamente reales, donde se puedan modificar los parámetros de las mismas a doquier adquiriendo comportamientos similares a los del combate dentro del contexto de la instrucción.

6. ¿Considera que esta tecnología puede ayudar a evaluar mejor la toma de decisiones de los mandos en situaciones de combate simulado?

Sí. Mejoraría la instrucción y por lo tanto la evaluación del personal último encargado de enfrentar este tipo de amenazas.

7. ¿Qué utilidades podría tener esta tecnología?

Primero de todo que contribuiría a una instrucción de calidad claramente fiel a la realidad del combate, con todo lo que ello conlleva. Por otro lado, se podría emplear en la evaluación y certificación de diferentes sistemas de defensa antiaérea, así como de su personal. Y por último impulsaría la concienciación en materia UAV del personal fomentando así la investigación y desarrollo de dicha tecnología a nivel unidad.

Entrevista nº3 Tropa Profesional:

1. Desde su punto de vista, ¿qué utilidad tendría emplear enjambres UAV como "enemigo simulado"?

Sí, hoy en día sería un gran acierto porque considero que es el presente y futuro de la guerra moderna y la instrucción para su defensa nos sería de gran utilidad de cara a futuro.

2. ¿Qué limitaciones técnicas cree que podrían presentarse en su uso dentro de la instrucción?

Yo vería pocas limitaciones técnicas porque hoy en día como se está viendo tanto en el conflicto de Ucrania y Rusia como en otras tantas otras, los drones tienen una facilidad muy grande de adaptación en todo tipo de terrenos y ambientaciones.

3. ¿Cómo valora la incorporación de tecnologías como la inteligencia artificial en estos sistemas?

Lo valoro de forma positiva el integrarlo en estos sistemas ya que hoy en día está demostrando la IA en muchos aspectos, tanto de la vida civil como de la militar un gran uso, aunque considero que el factor humano siempre tiene que estar presente y combinarlos.

4. ¿Sería partidario de emplear esta herramienta de forma regular en maniobras o ejercicios?

Sí, estoy a favor ya que se está viendo que es la nueva arma de la guerra contemporánea y debemos adaptarnos y prepararnos con ella.

5. ¿Considera a los enjambres UAV una amenaza actual y el futuro de los conflictos armados?



Sí, totalmente de acuerdo, porque como estamos viendo a lo largo del mundo, tanto en guerras, conflictos armados o incluso en el combate contra el narcotráfico se está usando por lo que es una herramienta esencial tanto en el mundo civil como militar.

Entrevista nº4 empresa civil “SCR Drones”:

1. ¿Qué nivel de desarrollo tiene actualmente España en el campo de los enjambres UAV?

España se sitúa en un punto intermedio en el desarrollo de enjambres UAV. No alcanza el grado de madurez y despliegue operativo de potencias como EE. UU. o China, pero tampoco parte de cero, pues existe un ecosistema público-privado en crecimiento apoyado por programas de defensa, centros universitarios y empresas tecnológicas. Actualmente predominan demostradores, prototipos y proyectos de I+D orientados a algoritmos de autonomía colectiva, comunicaciones distribuidas y ciberseguridad, y hay iniciativas concretas vinculadas a futuros programas de capacidades aéreas que contemplan el papel de sistemas cooperativos, por lo que España está construyendo las bases técnicas, industriales y regulatorias necesarias para avanzar hacia capacidades más operativas aunque todavía falte camino para alcanzar una implantación táctica extendida.

2. ¿Qué retos encuentra una empresa como la suya a la hora de colaborar con el ámbito militar?

Las dificultades para una empresa como la nuestra, que colabora con el ámbito militar, son tanto técnicas como organizativas y regulatorias. La normativa europea y nacional sobre operaciones de UAV limita las pruebas en espacio aéreo compartido y ralentiza la validación a escala real, mientras que los requisitos de seguridad de la información y clasificación obligan a desplegar infraestructuras y procedimientos de ciberprotección muy estrictos. Además, la interoperabilidad con sistemas existentes nos impone trabajar con estándares y procesos de certificación complejos, y la naturaleza continua y costosa del desarrollo de enjambres exige asegurar financiación y contratos a largo plazo para pasar de prototipos a productos desplegables, lo que hace que los retos sean simultáneamente técnicos, normativos, financieros y de alineamiento con la doctrina y prioridades del Ministerio de Defensa.

3. ¿Cree que los enjambres UAV pueden adaptarse eficazmente a entornos de simulación o entrenamiento táctico?

Sí, la simulación y el entrenamiento son aplicaciones inmediatas y de alto valor para los enjambres UAV, porque permiten recrear amenazas desde escenarios sencillos hasta situaciones de saturación compleja con una versatilidad que reduce costes logísticos y elimina riesgos humanos, además de posibilitar la repetición precisa de escenarios para consolidar el entrenamiento. Su uso facilita entrenamientos realistas en toma de decisiones bajo incertidumbre y presión, permite practicar contramedidas de guerra electrónica y comportamientos adaptativos, y ofrece una solución coste-efectiva frente al despliegue de aeronaves tripuladas o blancos físicos, lo que convierte a los enjambres en una herramienta disruptiva para modernizar el adiestramiento.

4. ¿Cuál cree que es el mejor procedimiento de control de un enjambre de drones?

El procedimiento óptimo de control combina control centralizado y descentralizado en una arquitectura híbrida donde un nodo supervisor define la misión y coordina a alto nivel mientras que cada vehículo dispone de autonomía local suficiente para mantener cohesión, evitar colisiones y continuar la misión ante pérdidas de comunicaciones. Esta aproximación se complementa con algoritmos que favorecen la escalabilidad y resiliencia del conjunto, interfaces operativas que permiten al operador comandar el enjambre como una única entidad táctica y capas de autonomía y tolerancia a fallos que aseguren operación continua en entornos



degradados o frente a amenazas electrónicas.

5. ¿Qué desarrollo y evolución cree que tienen los enjambres de drones?

La evolución de los enjambres UAV se prevé en fases: a corto plazo se consolidarán enjambres pequeños orientados a inteligencia, vigilancia, guerra electrónica y entrenamiento. A medio plazo habrá integración con sistemas de armas y capacidades ofensivas de saturación como drones de impacto y conceptos colaborativos con plataformas tripuladas. Y, por último, a largo plazo surgirán enjambres heterogéneos y multisistema con altos niveles de autonomía colectiva, aprendizaje adaptativo e interoperabilidad que los convertirán en multiplicadores de fuerza determinantes en operaciones conjuntas y en piezas clave de la defensa en red.



Anexo V Organigrama RAAA-74

El Regimiento de Artillería Antiaérea nº 74 es el único en España que opera con el sistema HAWK. El Regimiento está compuesto por una PLMM y tres Grupos, con emplazamiento en San Roque, Cádiz (GAAA I/74 y UREP) y Dos Hermanas, Sevilla (GAAA II/74).

Integra, además a la UREP (Unidad de Reparaciones) con sito en San Roque (Cádiz) de entidad Grupo (UREP, Grupo III), siendo esta última la encargada de llevar a cabo acciones de cuarto escalón de mantenimiento (EMAN) de todo el Regimiento. Está compuesta por una Plana Mayor de Mando (PLMM), una Batería de Plana Mayor (PLM) y una Batería de Apoyo General. Es en la UREP en donde se han recogido la mayoría de los datos obtenidos en este trabajo, y el lugar de las Prácticas externas.

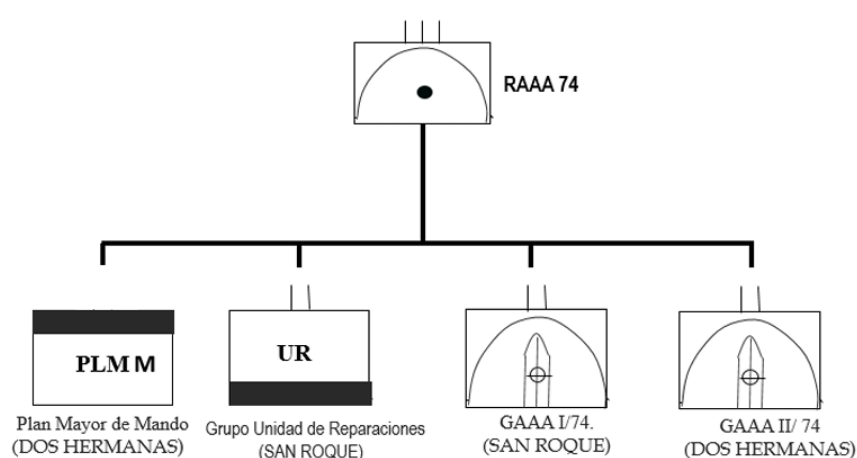


Figura 33: Organigrama RAAA 74. Fuente: Propia

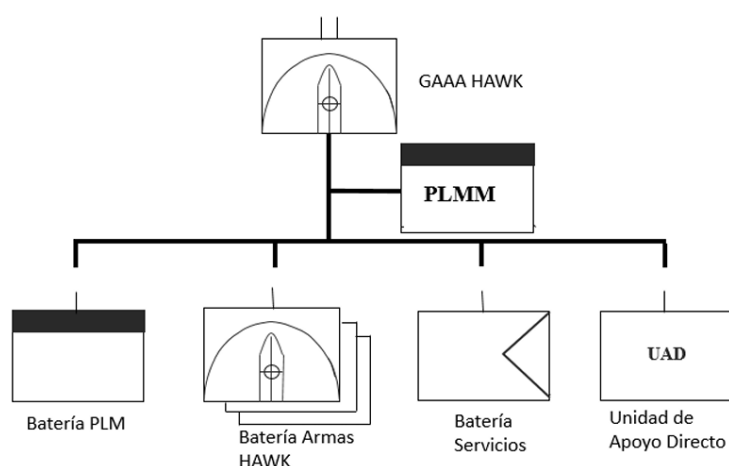


Figura 34: Organigrama GAAA I/74 y GAAA II/74. Fuente: Propia



Anexo VI Análisis de Riesgos

El análisis de riesgos se realiza en un proyecto para conocer los posibles efectos negativos que puedan ocurrir en el mismo. Para poder realizarlo es necesario realizar un estudio para determinar cuáles pueden ser los causantes de estos efectos y la manera de solucionarlos.

La clase de riesgo dentro del análisis de riesgos se clasifica en función de:

- El impacto que pueda causar en el proyecto:
 - H: High (Alto).
 - M: Medium (Medio).
 - L: Low (Bajo).
- La probabilidad de que ocurra dicha causa:
 - 1: Probabilidad baja.
 - 2: Probabilidad media.
 - 3: Probabilidad alta.

La realización de una medida alternativa provoca un cambio en la clase de riesgo, disminuyendo su impacto y probabilidad en el posible riesgo (ver Tabla 4).



Francisco José Culiañez Alcolea

ID	Descripción riesgo	Categoría riesgo	Causa del riesgo	Impacto (H,M,L)	Probabilidad (1,2,3)	Clase riesgo	Efectos riesgo	Medida/Alternativas	Clase riesgo tras medida
1	Rechazo al desarrollo del proyecto	Legislativo	Resistencia al cambio por parte de los usuarios finales o desconfianza en la eficacia del sistema	H	2	2H	Paralización o retraso en la adopción del sistema	Comunicación clara de objetivos formativos y demostraciones prácticas	1M
2	Cambios en la normativa nacional de uso de UAV	Legislativo	Actualización de regulaciones por motivos de seguridad aérea o nuevas directrices militares	L	2	2H	Imposibilidad de operar bajo ciertas condiciones	Monitorear la normativa y diseñar operaciones flexibles	1M
3	Restricciones de vuelo en determinadas zonas	Legislativo	Protección de espacios aéreos sensibles o proximidad a infraestructuras críticas	M	3	3M	Limitación de escenarios de entrenamiento o reducción de operatividad	Planificación en áreas autorizadas y solicitud de permisos	2M
4	Requisitos adicionales de certificación	Legislativo	Imposición de estándares más estrictos para garantizar la seguridad y la fiabilidad de los UAV	M	2	2H	Aumento de costes y retrasos en la implementación	Certificar equipos desde el diseño para cumplir estándares	1M
5	Defectos en las piezas impresas en 3D	Calidad	Mala calibración de la impresora o uso de materiales de baja calidad	M	3	3M	Fallo funcional del dron y/o accidentes	Uso de materiales de calidad y calibración periódica	2L
6	Falta de estandarización en los repuestos fabricados	Calidad	Ausencia de protocolos unificados de diseño y fabricación para las piezas	M	2	2M	Incompatibilidad entre piezas y fallos en mantenimiento	Establecer protocolos CAD y bibliotecas validadas	1L
7	Desgaste prematuro de piezas	Calidad	Uso de materiales inadecuados o parámetros de impresión incorrectos	M	2	2M	Aumento de fallos en vuelo y frecuentes reemplazos de material	Usar materiales más resistentes y mantenimiento y reemplazo preventivo	1L
8	Errores en el ensamblaje tras el mantenimiento	Calidad	Falta de formación técnica o procedimientos de montaje mal definidos	M	2	2M	Fallo operativo de vuelo o averías recurrentes	Capacitación continua y generación de manuales estandarizados	1L



Francisco José Culiañez Alcolea

9	Falta de aceptación del sistema de enjambres UAV	Mercado	Desconfianza en la fiabilidad del sistema o resistencia a adoptar nuevas tecnologías en la formación	H	2	2H	Reducción del uso y escaso retorno de la inversión	Pilotos demostrativos y retroalimentación	1M
10	Aparición de tecnologías competidoras más avanzadas	Mercado	Rápida evolución del sector UAV y continua innovación por parte de competidores	H	2	2H	Obsolescencia rápida del sistema	Actualización tecnológica constante y modularidad	1M
11	Escasa demanda futura de formación con UAV	Mercado	Cambio en las estrategias de instrucción militar o sustitución por otros métodos de entrenamiento	M	1	1M	Infrautilización del sistema y reducción de su financiación	Adaptar el sistema a otros usos	1L
12	Fallos en la conectividad o comunicación entre drones	Técnico	Interferencias electromagnéticas o limitaciones en el alcance de los sistemas de comunicación	H	2	2H	Pérdida de control del enjambre	Protocolos redundantes y uso de frecuencias seguras	1M
13	Limitaciones de autonomía y batería	Técnico	Capacidad energética insuficiente o uso intensivo en condiciones exigentes	M	3	3M	Reducción del tiempo de escenarios y simulaciones fallidas	Baterías de alta densidad y optimización de rutas	2M
14	Incompatibilidad de los nuevos repuestos 3D	Técnico	Diferencias en tolerancias dimensionales o materiales respecto a los originales	M	2	2M	Fallo de ensamblaje y fallos en vuelo	Validar prototipos y pruebas funcionales previas	1L
15	No retorno del dron tras pérdida de la señal	Técnico	Superación del alcance o altitud máxima / fallo de receptor	H	2	2H	Pérdida del dron	Configurar un GPS o un sistema "Return to Home" automático	1M
16	Dependencia excesiva de un único proveedor	Contractual	Falta de diversificación en la cadena de suministro o acuerdos exclusivos con un solo fabricante	M	2	2M	Retrasos en mantenimiento, posible ruptura negociaciones	Diversificar proveedores y contratos múltiples	1L



Francisco José Culiañez Alcolea

17	Falta de financiación continuada para el mantenimiento del proyecto	Financiero	Presupuestos limitados o prioridad baja en la asignación de recursos institucionales	H	2	2H	Paralización progresiva del proyecto y pérdida de operatividad	Planificar presupuesto escalonado	1M
18	Errores humanos en la operación o mantenimiento de los UAV	Operativo	Formación insuficiente o falta de procedimientos estandarizados	M	3	3M	Averías frecuentes o accidentes durante el uso	Entrenamiento periódico y simulaciones	2L
19	Hackeo o interferencia en las comunicaciones	Ciberseguridad	Sistemas de comunicación con protocolos de seguridad débiles o no encriptados	H	2	2H	Pérdida de control y riesgo de uso indebido	Cifrado de extremo a extremo y auditorías de seguridad	1M
20	Daños en fauna o entorno durante entrenamientos con enjambres	medioambiental	Planificación inadecuada de las zonas de vuelo o falta de estudios de impacto ambiental	L	1	2M	Impacto ambiental negativo y posibles sanciones. Mala imagen.	Elegir zonas controladas y seguir las guías ambientales y leyes	1L
21	Asociación del proyecto con aplicaciones ofensivas en lugar de defensivas	Social	falta de comunicación sobre su propósito formativo	M	2	2M	Críticas públicas y pérdida de apoyo institucional.	Difundir públicamente su finalidad educativa en Defensa	1L

Tabla 4: Análisis de riesgos. Fuente: Elaboración Propia



Anexo VII Casa de la Calidad

La Casa de la Calidad es una herramienta que nos permite comparar diferentes medios u opciones en función de las características o funciones deseadas. Para ello, a cada “qué” (requisito o necesidad) se le asigna un nivel de importancia, en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una baja relevancia en el proyecto y 5 la máxima importancia para el mismo.

Una vez definidos los “qués” y los “cómos” (medios para cumplirlos), se establece la relación entre ambos mediante valores numéricos:

- 9: Existe una relación muy fuerte entre el “qué” y el “cómo”.
- 3: La relación es moderada.
- 1: La relación es débil o apenas existente.

Finalmente, la evaluación de ingeniería determina el orden de prioridad de cada opción dentro del proyecto. Este orden se establece a partir de los valores obtenidos en la evaluación de importancia, situando en la primera posición la alternativa con mayor puntuación.

					Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9							
					Direction of Improvement	▲	▼	◇	▲	▲	◇	◇	▲	▲	Customer Competitive Assessment						
Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Coste	Volumen	Fuerza de Impacto	Autonomia	Alcance	Software	Nº Funciones	Techo	Capacidad batería		Elaboración propia	DAREPA OFFSET	NAVIGATION LHS	HUAXMING PROP-V2	Row #	
1		14%	8	9		Bajo coste	●	○	▽	▽	▽	○	▽	▽	▽		4	1	3	5	1
2		5%	3	9		Pequeño tamaño	○	●	▽	▽	▽	▽	▽	▽	○		4	2	3	5	2
3		9%	5	9		Resistente	○	○	●	▽	▽	▽	▽	▽	▽		4	5	3	3	3
4		14%	8	9		Autonomia	○	▽	▽	●	○	▽	▽	▽	●		4	5	3	2	4
5		16%	9	9		Alcance de señal	▽	▽	▽	▽	●	○	▽	▽	○		4	5	4	3	5
6		16%	9	9		Facilidad de uso	○	▽	▽	▽	▽	●	○	▽	▽		5	3	3	4	6
7		14%	8	9		Funcionabilidad	▽	▽	▽	○	○	○	●	▽	▽		5	5	4	3	7
8		10%	6	9		Techo máximo	▽	▽	▽	▽	○	▽	▽	●	○		4	5	4	2	8

Correlations

Positive

+

Negative

-

No Correlation

Relationships

Strong

●

Moderate

○

Weak

▽

Direction of Improvement

Maximize

▲

Target

◇

Minimize

▼

Tabla 5: Casa de la Calidad. Fuente: Elaboración propia

CORRELACIONES TÉCNICAS PRINCIPALES

Coste ↔ Autonomía: Negativa (-)

Coste ↔ Alcance: Negativa (-)

Autonomía ↔ Capacidad batería: Positiva (+)

Alcance ↔ Software: Positiva (+)

Volumen ↔ Capacidad batería: Positiva (+)



Francisco José Culiáñez Alcolea

Evaluación técnica									
UAV NAVIGATION LISS	3	3	3	3	4	3	3	3	3
DARPA OFFSET	1	1	2	5	5	2	5	5	5
HUMMING PROP v2	4	5	4	4	2	5	2	3	2
Diseño propio	5	3	3	4	4	3	2	2	4

Tabla 6: Casa de la Calidad. Fuente: Elaboración propia

En conclusión, con la ponderación técnica definitiva, Humming Prop v2 es efectivamente la opción que mejor satisface la combinación de necesidades priorizadas por el cliente y requisitos técnicos críticos.



Anexo VIII Análisis “Make or Buy”

El análisis Make or Buy nos permite conocer los aspectos positivos y negativos de ambos puntos para poder valorar y determinar si nos conviene más fabricar el material por nosotros mismos o, por el contrario, es mejor acudir a un proveedor externo para adquirir este material.

Criterio estratégico / cualitativo	Peso (%)	Make (1-5)	Buy (1-5)	Puntuación Make	Puntuación Buy
Control de calidad	30	3	5	90	150
Flexibilidad / Adaptación	25	4	3	100	75
Conocimiento técnico necesario*	20	1	4	20	80
Dependencia de proveedores*	15	3	2	45	30
Riesgos y errores técnicos	10	2	5	20	50
TOTAL PONDERADO	100			275	385

Concepto	Make (€)	Buy (€)
Costes directos - Materia prima	300	2500
Costes directos - Maquinaria / Amortización	150	
Costes directos - Software y actualizaciones	20	
Costes indirectos - Supervisión / Formación	35	
COSTE TOTAL	505	2500

Tabla 7: Análisis Cualitativo y de Costes “Make or Buy”. Fuente: Elaboración Propia

	MAKE	BUY
POSITIVO	Costes más bajos Flexibilidad y personalización Independencia tecnológica	Alta fiabilidad y robustez Listo para usar Mayor rendimiento técnico
NEGATIVO	Menor fiabilidad Calidad y rendimiento limitados Mayor tiempo de desarrollo y formación	Coste elevado Menor personalización Dependencia del proveedor

Tabla 8: Análisis “Make or Buy”. Fuente: Elaboración Propia



Anexo IX Stakeholders

Los stakeholders son todas aquellas personas o entidades que poseen un interés en una empresa o proyecto y que intervienen en él, ya sea de manera directa o indirecta. En el marco de este proyecto, se ha mantenido contacto con diversas empresas especializadas en sistemas de drones, a las cuales se les ha presentado los objetivos principales, centrados en promover el desarrollo de enjambres UAV destinados a la instrucción de oficiales tácticos en la Defensa Aérea.

Las siguientes empresas son las que aceptarían involucrarse en el proyecto:

Nombre de la Empresa	Función	Logotipo
Aerocamaras [63]	Formación de pilotos	
Ibericadron [64]	Servicio de reparación de drones	
Cegadrone [65]	Inspección técnica y consultoría	
Centro de Vuelos Experimentales ATLAS [66]	Validación plataformas UAV y dirección y coordinación de operaciones de vuelo	
SCR Drones [67]	Adquisición de Drones y Formación de pilotos	



BCN3D [68]	Impresoras 3D	 BCN3D
------------	---------------	--

Tabla 9: Stakeholders del proyecto. Fuente: Elaboración Propia



Anexo X Realización de piezas por impresión 3D

En caso de producirse la rotura de algún componente fungible de los diferentes UAV, si es posible, la reparación de ese componente se llevará a cabo en el 2º Escalón de Mantenimiento, tal y como se define en el punto 4.6.3. Mantenimiento. En dicho escalón serán responsables de la fabricación del repuesto mediante la impresión 3D del mismo, empleando programas de diseño asistido por ordenador.

El software principal previsto es SolidWorks [69], que permite modelar con precisión los elementos necesarios (Ver Figura 35). No obstante, también se considera el uso de Fusion 360 [70], dado que ofrece herramientas avanzadas de modelado paramétrico y simulación estructural, facilitando así la optimización de las piezas antes de su impresión.

Para garantizar la operatividad de este escalón, será imprescindible que el personal disponga de conocimientos adecuados en el manejo de estas aplicaciones de diseño.

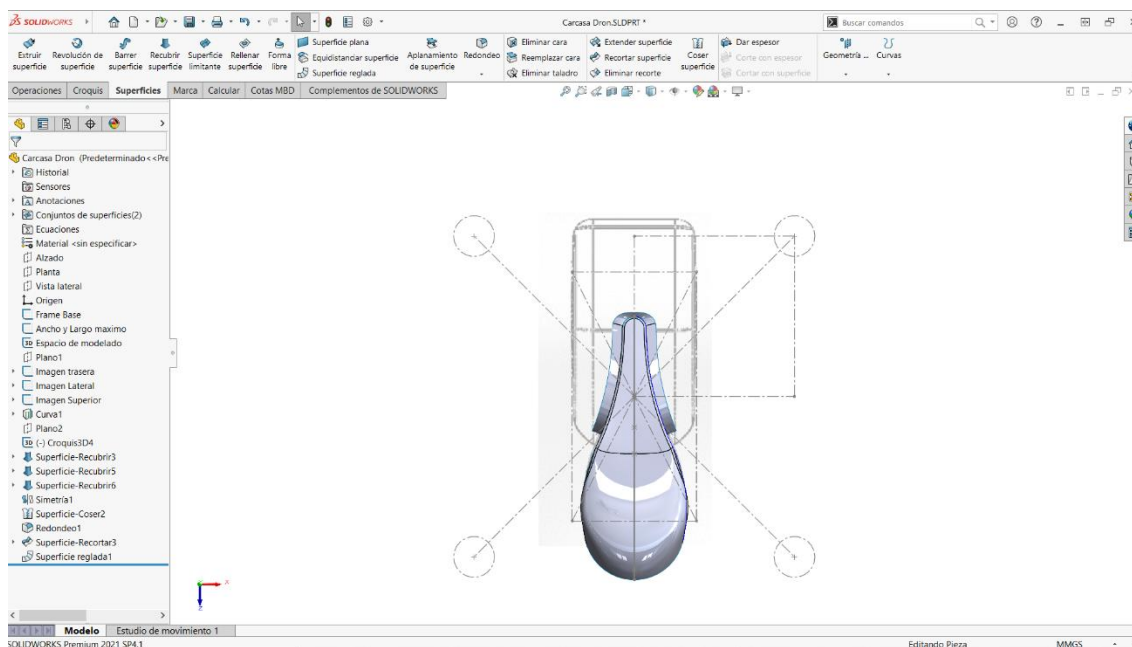


Figura 35: Ejemplo de parte de un dron realizado en SolidWorks. Fuente: [71]



Anexo XI Permisos de vuelo de UAV en diferentes ejercicios

En España, la normativa vigente sobre operaciones con UAS (Real Decreto 517/2024) exige permisos específicos para vuelos sobre zonas sensibles, incluyendo instalaciones industriales, infraestructuras críticas, hospitales o centros de salud, así como aquellas relacionadas con la seguridad del Estado y la Defensa Nacional. Para operar sobre estas zonas es necesario obtener la autorización previa del titular o gestor de la infraestructura correspondiente, o de la autoridad competente cuando sea el caso. En el caso particular de los Campos de Maniobras y Tiro (CMT), los permisos deben solicitarse al Ministerio de Defensa, a través del Ejército responsable de su gestión, y en coordinación con el Ejército del Aire si la operación afecta al espacio aéreo militar. Además, vuelos en entornos urbanos o sobre concentraciones de personas deben ser comunicados al Ministerio del Interior con al menos cinco días de antelación. En lo que respecta al Ejército del Aire, este tiene competencias sobre ciertas zonas restringidas al vuelo fotográfico (denominadas RVF), gestionadas por organismos como el CECAF, donde se requiere permiso especial para la captación de imágenes aéreas.

Asimismo, resulta imprescindible señalar el papel de ENAIRE, entidad pública empresarial dependiente del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y responsable de la gestión del espacio aéreo español y de los servicios de navegación aérea. Aunque no es la autoridad que concede permisos de vuelo a los UAS, ENAIRE desempeña una función esencial al publicar y mantener la información aeronáutica oficial (AIP España) y al proporcionar la plataforma ENAIRE Drones, una herramienta que permite consultar en tiempo real las restricciones y limitaciones del espacio aéreo nacional. De este modo, ENAIRE se constituye como un organismo clave para planificar operaciones con UAV, ya que garantiza que las unidades conozcan las zonas prohibidas, restringidas o condicionadas, y puedan coordinar sus solicitudes con las autoridades competentes, como la AESA, el Ministerio del Interior o el Ministerio de Defensa.

En el caso de operaciones con UAV que se desarrollen en espacio aéreo marítimo, es decir, sobre aguas jurisdiccionales españolas, se requiere una coordinación adicional con el Ministerio de Defensa, que ostenta la responsabilidad sobre la Defensa Aérea y marítima. ENAIRE refleja en su cartografía las restricciones aplicables en estas áreas, mientras que la AESA mantiene sus competencias regulatorias en operaciones civiles. Si la operación implica el despegue o aterrizaje desde buques o instalaciones portuarias, interviene también la Capitanía Marítima correspondiente. Esto convierte el espacio aéreo marítimo en una de las zonas más reguladas y sensibles, en la que resulta imprescindible una planificación previa y la coordinación interinstitucional para garantizar la seguridad y la legalidad de la operación.

El análisis de los permisos de vuelo refleja que no existe una respuesta única aplicable a todos los escenarios, sino que cada caso requiere la intervención de diferentes organismos competentes. Esta fragmentación normativa refuerza la importancia de disponer de formación especializada y de canales ágiles de comunicación entre las unidades y las autoridades, con el fin de evitar retrasos o limitaciones innecesarias durante los ejercicios.

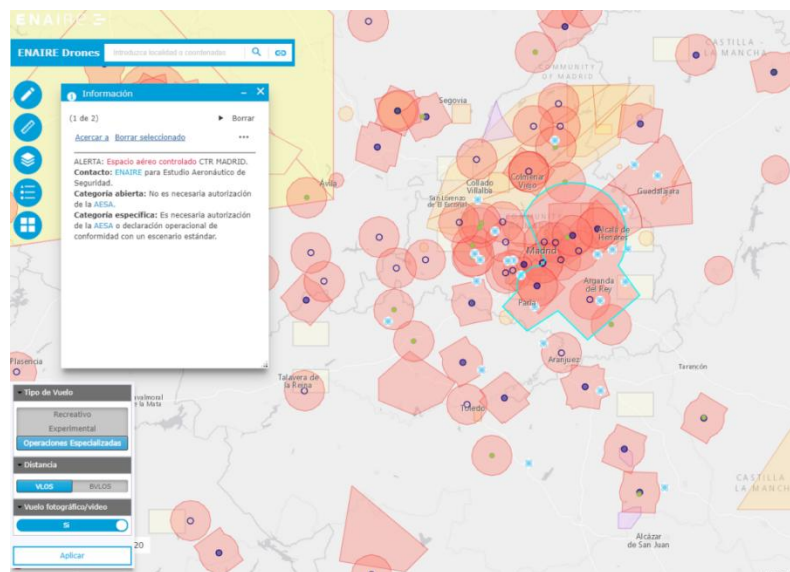


Figura 36: Restricciones de vuelo para UAV en el área de Madrid. Fuente: ENAIRE [140]