



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Análisis comparativo de sistemas de radar en ejércitos internacionales para la optimización de la alerta temprana contra UAS

Miguel Sánchez Peñas

Director académico: Coronel D. Luis Dendariena Ortiz de Zárate

Director militar: Capitán D. Iván Carricondo de la Fe

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

FC-0707-02



---

Miguel Sánchez Peñas

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al RACA 93, lugar donde he podido realizar las prácticas y tener mi primera toma de contacto con el día a día en las unidades.

Especialmente quería agradecer a la batería Mistral, donde me estuve desempeñando durante el mes y medio, por haberme acogido y tratado como uno más durante toda mi estancia y por su disposición a ayudarme con este trabajo o a enseñarme cosas de su día a día. En especial al capitán D. Iván Carricondo de la Fe, por su acogida y ejemplo diario y al teniente D. Juan Gámiz García por su implicación y ayuda a enfocar el proyecto.

También me gustaría mencionar a los suboficiales de la batería, que siempre han estado puestos para ayudarme con sus conocimientos, especialmente al sargento D. Esteban Velázquez Wallraf, cuya ayuda tanto técnica como teórica en el ámbito de los radares ha sido esencial para poder realizar este trabajo.

Además, quiero agradecer al Coronel D. Luis Dendariena Ortiz de Zárate por su dedicación, apoyo y disponibilidad a lo largo del desarrollo del trabajo, además de su implicación en el mismo.

Agradezco también a mi familia, a mi padre, mi madre y mi hermano, por haber sido mi pilar fundamental durante estos cinco largos años, mis logros siempre tendrán parte vuestra.

Por último, agradecer a mis amigos, tanto los de la academia como los de casa, por haber sido el sustento diario y la fuente de muchas alegrías y experiencias.



---

Miguel Sánchez Peñas



---

Miguel Sánchez Peñas

## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de sistemas de radar empleados en ejércitos internacionales con el fin de optimizar la alerta temprana frente a aeronaves no tripuladas (UAS). La creciente proliferación de drones en conflictos recientes, especialmente los denominados Low, Small and Slow (LSS), ha transformado el panorama de la defensa aérea, poniendo en evidencia las limitaciones de los radares convencionales para detectar amenazas de baja firma radar y vuelo rasante. Ante esta situación, resulta esencial evaluar las soluciones tecnológicas existentes y valorar su aplicabilidad en el marco operativo español, concretamente en las baterías Mistral del Mando de Artillería Antiaérea (MAAA).

La metodología utilizada combina un enfoque cualitativo y cuantitativo, integrando el análisis documental de fuentes doctrinales, técnicas y normativas con actividades empíricas (experimento, entrevista y encuesta). En primer lugar, se realizó una prueba de detección con el radar RAVEN 2D, perteneciente a la orgánica de la batería Mistral, para evaluar su capacidad ante drones civiles de pequeña sección radar. En segundo lugar, se llevó a cabo una entrevista profesional con un especialista en radares antiaéreos del RACA 93 y una encuesta al personal suboficial, con el fin de obtener una valoración operativa real sobre los sistemas empleados. Finalmente, se aplicó el método AHP (Analytic Hierarchy Process) para establecer una jerarquía objetiva de eficacia entre los radares estudiados: RAVEN, AUDES, IRIS, Giraffe 1X, LIDS y Falcon Shield.

Los resultados obtenidos evidencian que el RAVEN sigue siendo un sistema fiable frente a UAS de mayor tamaño, pero ineficaz ante amenazas LSS debido a su baja sensibilidad ante blancos de reducida sección radar, la influencia del clutter y la falta de algoritmos de clasificación avanzados. El AUDES se ha mostrado muy eficaz frente a drones LSS, gracias a su arquitectura multisensor con radar FMCW, sensores EO/IR e inhibidor RF direccional, aunque presenta limitaciones derivadas de su complejidad logística y escasa implantación en el Ejército de Tierra. El radar IRIS, por su parte, se identificó como el más equilibrado y eficaz, combinando portabilidad, bajo consumo y alta precisión mediante procesamiento micro-Doppler; actualmente está en servicio en las Fuerzas Armadas de los Países Bajos y Bélgica.

En conclusión, el estudio demuestra que las unidades Mistral disponen de una base tecnológica válida, pero necesitan una modernización progresiva hacia sensores tridimensionales multifrecuencia. La combinación de sistemas ligeros como el IRIS con plataformas multisensor tipo AUDES podría cerrar la brecha de detección actual frente a UAS LSS. Los resultados obtenidos responden plenamente a los objetivos propuestos, aportando una base sólida para orientar futuras decisiones de adquisición e integración de sistemas C-UAS dentro de la defensa antiaérea española.

## PALABRAS CLAVE

Radar, Defensa Antiaérea, UAS, Alerta Temprana.



---

Miguel Sánchez Peñas

## ABSTRACT

This Final Degree Project aims to perform a comparative analysis of radar systems used by international armed forces to optimize early warning capabilities against Unmanned Aerial Systems (UAS). The increasing proliferation of drones in recent conflicts, particularly those classified as Low, Small and Slow (LSS), has transformed the modern air defense landscape, revealing the limitations of conventional radars in detecting low-RCS and low-altitude aerial threats. Consequently, it is essential to evaluate the technological solutions currently available and assess their applicability within the Spanish operational framework, specifically in the Mistral Batteries of the Spanish Army's Air Defence Artillery Command (MAAA).

The methodology applied combines both qualitative and quantitative approaches, integrating documentary research of doctrinal, technical, and regulatory sources with empirical field activities such as an experiment, interview, and a survey. First, a detection test was conducted with the RAVEN 2D radar, organically assigned to the Mistral battery, to assess its ability to detect small civil drones. Secondly, a professional interview with an air defense radar specialist from the RACA 93 Regiment and a survey among sub-officers provided an operational perspective on the current systems. Finally, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied to establish an objective hierarchy of radar performance, evaluating the following systems: RAVEN, AUDES, IRIS, Giraffe 1X, LIDS, and Falcon Shield.

The results show that the RAVEN radar remains a reliable system against larger UAS but ineffective against LSS threats, mainly due to its low sensitivity to small radar cross-sections, ground clutter, and lack of advanced classification algorithms. The AUDES system proved highly effective against LSS drones, combining an FMCW radar, EO/IR sensors, and a directional RF jammer, though limited by its maintenance complexity, and scarce presence in the Spanish Army. Meanwhile, the IRIS radar, developed by Robin Radar Systems, was identified as the most balanced and efficient, offering high precision, portability, and micro-Doppler classification capabilities. It is currently employed by the Armed Forces of the Netherlands and Belgium, which highlights its operational maturity.

In conclusion, this study demonstrates that the Mistral batteries possess a solid technological base but require modernization toward 3D, multi-frequency radar systems. The combination of lightweight detection systems such as IRIS with multisensor solutions like AUDES would significantly improve early warning capabilities against LSS-type UAS. The results obtained fully meet the objectives proposed, providing a technical and operational framework for future decision-making regarding C-UAS system integration within the Spanish air defense network.

### KEYWORDS

Radar, Air Defence, UAS, Early Warning.



Miguel Sánchez Peñas

## INDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>V</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS</b> .....	<b>X</b>
<b>DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>2</b>
2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	2
2.2. METODOLOGÍA .....	2
<b>3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
3.1. Origen y evolución de los radares en la defensa aérea .....	4
3.2. Aparición de nuevas amenazas aéreas: proliferación de UAS en conflictos actuales...	6
3.3. Brechas identificadas en sistemas convencionales .....	8
3.4. Definición y clasificación de UAS .....	8
3.4.1. Definición y estructura de un UAS.....	8
3.4.2. Clasificación general de los UAS .....	9
3.4.3. Clasificación según tipo de ala .....	10
3.4.4. Los UAS LSS (Low, Small, Slow): una categoría de especial interés .....	11
3.5. Limitaciones y vulnerabilidades de los UAS .....	12
3.6. Concepto de alerta temprana en artillería antiaérea .....	12
3.7. Principios básicos del radar .....	13
3.7.1. Funcionamiento .....	13
3.7.2. Tipos de radar.....	13
3.7.3. Parámetros clave del radar .....	14
<b>4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....	<b>16</b>
4.1. Metodología de análisis .....	16
4.1.1. Enfoque metodológico general.....	16
4.1.2. Fuentes de información .....	17
4.1.3. Procedimiento de análisis.....	17
4.1.4. Justificación del enfoque .....	18



---

Miguel Sánchez Peñas

4.2.	Descripción técnica de los sistemas analizados.....	18
4.2.1.	Radar RAVEN 2D (España- Indra/ Ejército de Tierra) .....	19
4.2.2.	Sistema AUDS (Bligher- Reino Unido/ Ejército de tierra).....	20
4.2.3.	Radar IRIS (Países Bajos – Robin Radar Systems) .....	22
4.2.4.	Radar Giraffe 1X (Suecia- Saab AB).....	23
4.2.5.	Sistema LIDS (Estados Unidos- Low Slow Small Integrated Defeat System) .....	25
4.2.6.	Sistema Falcon shields (Reino Unido- Leonardo UK).....	26
4.3.	Experimento de campo: Prueba de detección de un UAS civil con radar RAVEN 3D.	28
4.4.	Entrevista profesional: valoración operativa de los sistemas AUDS y RAVEN.....	30
4.5.	Encuesta a suboficiales sobre la capacidad operativa del RAVEN .....	32
4.6.	Estudio multicriterio (Método AHP).....	32
4.6.1.	Definición de criterios y ponderación.....	33
4.6.2.	Resultados globales .....	33
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>35</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>36</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>38</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>38</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>40</b>
	<b>ANEXO III.....</b>	<b>43</b>



---

Miguel Sánchez Peñas

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sir Robert Watson-Watt, pionero del radar británico y responsable del desarrollo del sistema RDF en 1935. (Fuente: Parker Sanfuentes, 2000).....	4
Figura 2: : Instalación de antenas del sistema “Chain Home”. (Fuente: Parker Sanfuentes, 2000) .....	5
Figura 3: Antena de radar AESA. (Fuente: Zona militar, 2021).....	6
Figura 4: UAV MQ-1 Predator. (Fuente: Wikipedia, 2023).....	7
Figura 5: Radar RAVEN 2D (Fuente: elaboración propia).....	20
Figura 6: radar AUDES (Fuente: elaboración propia).....	21
Figura 7: radar IRIS (Fuente: Robin Radar Systems BV, 2020).....	23
Figura 8: Radar Giraffe 1X (Fuente: Saab AB, 2023).....	24
Figura 9: radar AN/TPQ-50 (Fuente: Northrop Grumman et al., 2021).....	26
Figura 10: radar KuMRFS (Ku) (Fuente: Northrop Grumman et al., 2021).....	26
Figura 11: sistema Falcon (Fuente: Leonardo UK Ltd., 2025).....	27
Figura 12: atributos sistema Falcon (Fuente: elaboración propia a partir de Leonardo UK Ltd., 2025).....	28
Figura 13: radar RAVEN (Fuente: elaboración propia).....	28
Figura 14: Pantalla terminal inteligente radar RAVEN (Fuente: elaboración propia).....	29
Figura 15: dron utilizado en el experimento (Fuente: elaboración propia).....	29
Figura 16: resultados de la pregunta 1 (Fuente: elaboración propia).....	40
Figura 17: resultados de la pregunta 2 (Fuene: elaboración propia).....	40
Figura 18: resultados de la pregunta 3 (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 19: resultados de la pregunta 4 (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 20: resultados de la pregunta 5 (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 21: resultados de la pregunta 6 (Fuente: elaboración propia).....	42
Figura 22: resultados de la pregunta 7 (Fuente: elaboración propia).....	42
Figura 23: resultados de la pregunta 8 (Fuente: elaboración propia).....	42
Figura 24: importancia de cada criterio (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS).....	43



---

Miguel Sánchez Peñas

Figura 25: importancia de los sistemas según alcance (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS).....	43
Figura 26: importancia de los sistemas según movilidad (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS).....	44
Figura 27: importancia de los sistemas según precisión (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS).....	44
Figura 28: importancia de los sistemas según integración (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS).....	45
Figura 29: importancia de los sistemas según coste (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS) .....	45
Figura 30: Porcentaje de peso de cada subcriterio (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS) .....	46
Figura 31: representación gráfica del resultado (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS) .....	46
Figura 32: prioridad final de los sistemas (Fuente. elaboración propia a partir de AHP-OS).....	47



---

Miguel Sánchez Peñas

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación Otan sobre UAS (Fuente: Elaboración propia a partir de NATO Standardization Office, 2019).....	9
Tabla 2: Clasificación OTAN según tipo de ala (Fuente: elaboración propia a partir de NATO Standardization Office, 2019).....	10
Tabla 3: Características UAS LSS (Fuente: Elaboración propia a partir de EDA, 2020) .....	11
Tabla 4: Atributos radar RAVEN (Fuente: elaboración propia a partir de Ministerio de Defensa MADOC 2008).....	19
Tabla 5: atributos radar AUDES ( Fuente: Blighter Surveillance Systems et al., 2017).....	22
Tabla 6: Atributos radar IRIS (Fuente: elaboración propia a partir de Robin Radar Systems BV, 2020) .....	23
Tabla 7:Atributos radar IRIS (Fuente: elaboración propia a partir de Robin Radar Systems BV, 2020) .....	24
Tabla 8: atributos sistema LIDS (Fuente: elaboración propia a partir de Northrop Grumman et al., 2021) .....	25



---

Miguel Sánchez Peñas

## **ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS**

AESA: Active Electronically Scanned Array – Antena de Barrido Electrónico Activo

AGL: Above Ground Level – Altura sobre el nivel del terreno

AHP: Analytic Hierarchy Process – Proceso Analítico Jerárquico

AUDS: Anti-UAV Defence System – Sistema de Defensa contra Vehículos Aéreos No Tripulados

BVLOS: Beyond Visual Line of Sight – Vuelo más allá del alcance visual del operador

C2: Command and Control – Mando y Control

C-UAS / C-UAV: Counter-Unmanned Aerial Systems / Vehicles – Sistemas de defensa contra aeronaves no tripuladas

C-RAM: Counter-Rocket, Artillery and Mortar – Sistema contra cohetes, artillería y morteros

CCDC: Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos – Órgano del Ministerio de Defensa encargado de prospectiva y análisis de capacidades

COAAAS-L: Centro de Operaciones de Artillería Antiaérea para Adquisición y Análisis de Señales – Ligerero

COAAAS-M: Centro de Operaciones de Artillería Antiaérea para Adquisición y Análisis de Señales – Medio

DGAM: Dirección General de Armamento y Material

DIEEE: Instituto Español de Estudios Estratégicos

EA: Ejército del Aire y del Espacio

EDA: European Defence Agency – Agencia Europea de Defensa

EO/IR: Electro-Optical / Infrared – Sensores electroópticos e infrarrojos

ET: Ejército de Tierra

EW: Electronic Warfare – Guerra Electrónica

FAAD C2: Forward Area Air Defense Command and Control – Sistema de Mando y Control de Defensa Antiaérea de Área Avanzada

FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave – Radar de onda continua modulada en frecuencia

GBAD: Ground Based Air Defence – Defensa Aérea Basada en Tierra

GNSS: Global Navigation Satellite System – Sistema Global de Navegación por Satélite

HALE: High Altitude Long Endurance – Vehículo aéreo de gran altitud y larga duración



---

Miguel Sánchez Peñas

IEEE: Instituto Español de Estudios Estratégicos

INS: Inertial Navigation System – Sistema de Navegación Inercial

IRIS: Radar 3D FMCW de la empresa Robin Radar Systems (Países Bajos)

ISR: Intelligence, Surveillance and Reconnaissance – Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento

KuMRFS: Ku-band Multi-Mission Radar Family of Systems – Familia de radares multifunción en banda Ku

L-band: Banda de frecuencias del espectro radar comprendida entre 1 y 2 GHz

LIDS: Low, Slow, Small Integrated Defeat System – Sistema Integrado de Neutralización de Drones Pequeños, Lentos y de Baja Altura

LOS: Line of Sight – Línea de visión directa

LSS: Low, Small and Slow – Clasificación de drones pequeños, lentos y de baja altitud

MADOC: Mando de Adiestramiento y Doctrina

MALE: Medium Altitude Long Endurance – Vehículo aéreo de media altitud y larga duración

MAAA: Mando de Artillería Antiaérea

MSHORAD / VSHORAD: Medium / Very Short Range Air Defence – Defensa Antiaérea de Medio / Muy Corto Alcance

NATO / OTAN: North Atlantic Treaty Organization / Organización del Tratado del Atlántico Norte

PD3-319: Publicación Doctrinal del MADOC sobre lucha y protección C-UAS LSS

RACA 93: Regimiento de Artillería de Campaña n.º 93

RCS: Radar Cross Section – Sección eficaz de radar

RF: Radio Frequency – Frecuencia de radio

RPAS: Remotely Piloted Aircraft System – Sistema de Aeronaves Pilotadas a Distancia

SCR: Signal Corps Radio – Designación de radares estadounidenses de la Segunda Guerra Mundial

SDG PLATIN: Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (DGAM)

STANAG: Standardization Agreement – Acuerdo de Normalización OTAN

TFG: Trabajo Fin de Grado

UAS: Unmanned Aerial System – Sistema Aéreo No Tripulado

UAV: Unmanned Aerial Vehicle – Vehículo Aéreo No Tripulado



---

Miguel Sánchez Peñas

VLOS: Visual Line of Sight – Vuelo dentro del alcance visual



---

Miguel Sánchez Peñas

# **DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Durante el desarrollo de este trabajo se han utilizado dos herramientas de inteligencia artificial con fines de apoyo académico, metodológico y de redacción.

Se utilizó ChatGPT-5, desarrollado por OpenAI para asistir en la redacción técnica del trabajo, así como para la elaboración de figuras comparativas y para sintetizar información. También se utilizó para realizar el resumen y abstract del trabajo.

También se empleó el modelo NotebookLM, desarrollado por Google, como herramienta de apoyo documental y búsqueda de información complementaria en fuentes abiertas de carácter técnico y doctrinal.



---

Miguel Sánchez Peñas

# 1. INTRODUCCIÓN

El control del espacio aéreo de un país es fundamental en las labores protección de la soberanía nacional y territorial. En el caso de España esta labor recae tanto en el Ejército del aire (EA) como en el ejército de tierra (ET). Ambos realizan la defensa aérea (AD) que se define como el conjunto de todas las medidas diseñadas para anular o reducir la eficacia de la acción aérea hostil, y dentro de estas actividades existe la defensa antiaérea (DAA) que es la contribución de las unidades de superficie a la defensa aérea. Por lo tanto, la artillería antiaérea (AAA) está formada por el conjunto de unidades del ejército de tierra que contribuyen a la defensa antiaérea.

En los últimos tiempos en conflictos como el de Nagorno Karabaj y el conflicto de Ucrania se ha popularizado el uso de aeronaves no tripuladas (UAS) lo que ha cambiado radicalmente el panorama militar y las tendencias de desarrollo tecnológico militar. Tiene numerosas maneras de ser utilizado como en reconocimiento, vigilancia, ataque o guerra electrónica (EW) y eso hace que sean un medio muy eficaz, impredecible y difícil de parar.

Por otro lado, el uso de los UAS reduce el riesgo humano ya que una misión que en conflictos anteriores debía ser llevada a cabo por un gran número de personas, en los conflictos actuales con un solo dron se puede multiplicar el daño eliminando el coste humano propio. Otra de las grandes ventajas que tienen es la baja firma radar (RCS) que los hace muy difíciles de detectar y su fácil despliegue en cualquier territorio de operaciones. Entre sus principales amenazas se encuentran su bajo coste en algunos casos ya que se pueden alterar UAS civiles para que realicen acciones militares, robo de información confidencial, actividades de espionaje o incluso el transporte de cargas explosivas para causar bajas humanas.

Es por ello que una de las mayores preocupaciones en los ejércitos internacionales en la actualidad es el desarrollo de radares de alerta temprana para activar contramedidas y poder mitigar al máximo los daños que pueden causar estos drones. Dentro de estos radares de alerta temprana existen radares que por la frecuencia en la que trabajan, además de otra serie de características, son específicos para la lucha contra los UAS y en la actualidad existen una gran variedad de modelos e innovación tecnológica. Es por ello que sería conveniente un análisis de las diferentes capacidades que tienen estos sistemas y su comparación para observar cuáles son más eficaces ante esta amenaza.

Debido a estas razones, mi trabajo de fin de grado (TFG) se centra en el análisis comparativo de diferentes radares internacionales cuya misión es combatir estos UAS, observando cuales son las características (alcance, frecuencia, movilidad, ...) y debilidades más importantes y sensibles.

Para ello en primer lugar se llevará a cabo un estudio de la historia de los UAS, su desarrollo y clasificación, así como de sus capacidades, para después explicar la importancia y el marco teórico de los radares de alerta temprana contra UAS, para posteriormente analizar y comparar una serie de radares tanto españoles como internacionales y poder extraer conclusiones sobre las capacidades que son más relevantes además de si España está realmente preparada para combatir esta amenaza.



---

Miguel Sánchez Peñas

## 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis comparativo de los diferentes sistemas radar que se usan a nivel internacional y nacional para la detección y alerta temprana frente a Unmanned Aerial Systems (UAS).

Para poder alcanzar este objetivo principal es necesario también cumplir con los objetivos secundarios.

En primer lugar, conocer los principales sistemas de radar utilizados en defensa antiaérea contra UAS.

En segundo lugar, se analizarán las diferentes características técnicas claves que poseen estos radares en la lucha contra las aeronaves no tripuladas tales como el alcance, la cobertura, frecuencia, movilidad, integración en sistemas de mando y control o capacidad de detección de las diferentes secciones radar.

Posteriormente comparar los diferentes radares seleccionados con el fin de identificar las ventajas e inconvenientes además de las áreas de mejora.

Finalmente valorar la capacidad de aplicación de los sistemas estudiados en el marco operativo español y valorar las posibles mejoras en el caso de que fueran necesarias.

El alcance del proyecto son aquellos radares utilizados a nivel internacional cuya información es accesible libremente y tienen eficacia contrastada en la lucha contra UAS, así como los radares utilizados por el ejército español.

Quedan fuera del alcance aquellos radares cuya información está clasificada o son ineficaces frente a la amenaza de los UAS.

### 2.2. METODOLOGÍA

Para poder obtener los resultados mencionados anteriormente se seguirá una metodología mixta, utilizando métodos tanto cualitativos como cuantitativos.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una exhaustiva búsqueda de información bibliográfica, en el estudio de documentos y artículos militares relacionados con el tema a tratar, así como manuales técnicos de fabricantes, normativa y doctrina OTAN. Esto ha permitido elaborar el marco conceptual y seleccionar los sistemas a estudiar.

Posteriormente se han utilizado herramientas cualitativas entre las que destacan:

- Entrevista a un sargento de la batería Mistral del RACA 93 que ocupa el puesto táctico de radarista y aparte de tener un gran conocimiento de la materia y los sistemas que posee el ejército español, ha sido desplegado con diferentes sistemas de radar.

También se utilizarán herramientas cuantitativas:

- Una encuesta estructurada dirigida a los suboficiales y oficiales del regimiento que han tenido contacto con los diferentes radares del ejército español orientados a conocer sus impresiones sobre estos sistemas.
- Se ha llevado a cabo un experimento para comprobar si el radar que hay disponible en la orgánica de una batería mistral es capaz de detectar un dron civil de poco tamaño.



---

Miguel Sánchez Peñas

- Se compararán los sistemas radar contra UAS mediante el proceso de análisis jerárquico (AHP). Este método funciona dividiendo el problema en diferentes criterios ponderados para poder evaluar las mejores opciones.



Miguel Sánchez Peñas

## 3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

### 3.1. Origen y evolución de los radares en la defensa aérea

La RAE define al Radar como un sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar la localización y velocidad de este, y estos cumplen una gran variedad de funciones dependiendo de las características específicas que tienen. En función de estas capacidades se pueden clasificar en diferentes grupos en función del número de dimensiones que detecta, según la antena y el barrido que realiza, según la frecuencia y banda de trabajo, según la función que realiza o según la plataforma en la que va colocado.

El origen de los Radar está íntimamente ligado al avance del electromagnetismo a lo largo del siglo XIX con los avances de Maxwell que en el 1864 formuló las ecuaciones que definen el comportamiento de las ondas electromagnéticas y con Hertz que en 1888 demostró la existencia de manera experimental de estas ondas, demostrando que se reflejaban contra superficies metálicas y que volaban a la velocidad de la luz.

El primer intento real que se realizó para intentar demostrar estos avances lo realizó Christian Hulsmeyer en 1904, que con un aparato de su invención fue capaz de detectar barcos a 3 km de distancia. Su primera intención era evitar accidentes marítimos, aunque no era capaz de detectar la distancia exacta.



*Ingeniero*  
*Sir Robert Watson-Watt.*

*Figura 1: Sir Robert Watson-Watt, pionero del radar británico y responsable del desarrollo del sistema RDF en 1935. (Fuente: Parker Sanfuentes, 2000)*

Posteriormente, Nikola Tesla teorizó en 1917 sobre los sistemas de radiodetección para detectar submarinos y en los años 20 dos científicos americanos llamados Albert Taylor y Leo Young detectaron interferencias de barcos en señales de radio, demostrando el principio de detección activa. En 1935, Robert Page desarrolló el primer radar pulsado, que era más preciso a la hora de calcular distancias.

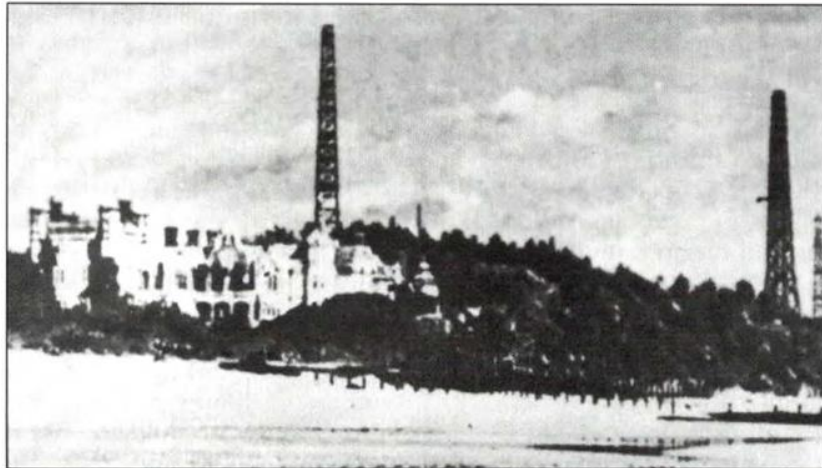
De manera simultánea, en Europa, Robert Watson-Watt estaba investigando la detección de las tormentas mediante las ondas de radio, y en 1935 junto con Arnold Wilkins demostró con el “experimento de Daventry” que un avión podía detectarse con la reflexión de las ondas electromagnéticas, marcando el inicio del radar británico.

Con el inicio de la segunda guerra mundial en 1939 se aceleró con creces el desarrollo de



Miguel Sánchez Peñas

este tipo de tecnología. Reino Unido construyó en 1938 la chain home, que se trataba de un sistema de grandes antenas distribuidas a lo largo de la costa sur y este, que operaba entre 20 y 30 MHz y con una potencia de 350kW. Su uso en la batalla de Inglaterra en 1940 fue crucial para la detección de aviones alemanes a una distancia de más de 100km permitiendo organizar la defensa antiaérea con eficacia. Posteriormente se desarrollaron versiones a más baja cota como la Chain Home Low además de otros sistemas de radares aerotransportados de detección y radares marítimos.



Zona de la costa este y sur de Gran Bretaña. Instalación de antena de Radar conocida como "Chain Home" 1938.

*Figura 2: : Instalación de antenas del sistema "Chain Home". (Fuente: Parker Sanfuentes, 2000)*

Por su parte, Alemania también desarrolló radares como el Freya en 1937, que contaba con un alcance de 100 km y 125MHz, y el Wurzburg que contaba con muy alta precisión en el control del tiro. Posteriormente desarrollaron sistemas como el Metox o el Naxos para detectar las emisiones enemigas, dando inicio así a la guerra electrónica. Estados Unidos llegó a desarrollar radares como el SCR-270 que fue capaz de detectar el ataque sobre Pearl Harbour pese a que fuera descartado por los jefes. El MIT creó el Radiation Laboratory de la que surgieron numerosos radares como el SCR-584 que fue muy exitoso para la artillería antiaérea.

En los años 40-50 el desarrollo no se enfocó tanto a la creación de nueva tecnología si no al perfeccionamiento del ya existente para mejorar la fiabilidad, reducir su tamaño y adaptar los radares al nuevo contexto bipolar mundial (EEUU vs URSS). Durante la guerra fría el avance del radar se aceleró notablemente propiciado por la amenaza de misiles, bombardeos estratégicos, la guerra electrónica y la necesidad de una vigilancia constante del espacio aéreo.

Tanto EEUU como la URSS construyeron redes extensas de alerta temprana que cubrían toda la extensión de sus fronteras y las rutas de llegada de misiles balísticos. Se trabajó en sistemas de muy largo alcance con antenas grandes y frecuencias altas enfocados en la detección de aeronaves a larga distancia.

Durante la guerra fría se intensificó también la guerra electrónica, con el desarrollo de contramedidas electrónicas para interferir en los radares enemigos como el jamming (emisión de ruido), el uso de chaff (lanzar virutas metálicas para dispersar la señal radar) o la supresión del radar. Esto propició que los radares comenzaran a contar con medios para combatir esto como las antenas con lobos múltiples, los cambios de frecuencia y filtros de interferencias.



Miguel Sánchez Peñas



Figura 3: Antena de radar AESA. (Fuente: Zona militar, 2021)

Los radares de uso militar en la actualidad han mostrado un salto cualitativo considerable en comparación con sus predecesores ya que estos destacan por su versatilidad de funciones, capaces de hacer vigilancia, seguimiento y control de objetivos. El desarrollo de antenas AESA y procesamiento digital avanzado permiten una mayor precisión, resistencia a contramedidas radar y permite el seguimiento de múltiples objetivos. Además, existe una tendencia a la reducción de su tamaño y el aumento de su movilidad para adaptarse a los conflictos actuales.

### **3.2. Aparición de nuevas amenazas aéreas: proliferación de UAS en conflictos actuales**

El fenómeno de las aeronaves no tripuladas tiene un origen histórico hace varios siglos, situándose en el año 1849, cuando fuerzas austriacas utilizaron globos incendiarios en el asedio de Venecia. Sin embargo, el verdadero bautismo de fuego de los UAS ocurrió en 1964 durante la guerra de Vietnam cuando Estados Unidos utilizó drones Ryan Firebee (Lightning bug) para misiones de reconocimiento, adquisición y localización de objetivos, y también para apoyo en guerra electrónica.

Posteriormente, Israel hizo uso de drones en 1982 para la operación Paz para Galilea, combinándolos con aeronaves convencionales para neutralizar las defensas aéreas sirias en el valle de la Beeka. Con esta acción quedó demostrado que los drones no eran útiles solo para observación y localización de objetivos, sino que también podían ser utilizados como señuelos y facilitadores de operaciones aéreas complejas, abriendo un nuevo mundo de posibilidades.

En los 90, los drones Predator marcaron un antes y un después. Su uso en la guerra de los Balcanes demostró su eficacia como herramientas de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) en conflictos regionales. Sin embargo, el verdadero cambio vino tras los atentados del 11S en Nueva York, tras los que dio comienzo la llamada "First Drone Age", que se caracterizó por el uso de drones armados por parte de unas pocas potencias como EEUU en conflictos como los de Irak y Afganistán, tanto en misiones antiterroristas como de apoyo aéreo.



Miguel Sánchez Peñas



*Figura 4: UAV MQ-1 Predator. (Fuente: Wikipedia, 2023)*

En la última década la situación ha cambiado radicalmente con la aparición de la Second Drone Age, que se define por la proliferación global de los drones, tanto de estados como de organizaciones terroristas y grupos armados. La expansión tecnológica y los avances en este campo permitió que actores con recursos limitados tuvieran acceso a capacidades aéreas que previamente eran exclusivas de las grandes potencias. El uso de drones de bajo coste, improvisados, lentos y de difícil detección (Low, Slow and Small UAS) se convirtió en algo recurrente en conflictos en Oriente Medio, Libia, Siria, Irak y el Sahel.

El conflicto del Nagorno-Karabaj entre Armenia y Azerbaiyán por la posesión del territorio del Nagorno-Karabaj, iniciado en 1994 pero ha tenido diferentes estallidos, siendo el último en 2023. Este conflicto marcó un hito en el uso de los drones. Azerbaiyán, apoyado por la tecnología turca e israelí, utilizó drones Baraktar TB2 y municiones merodeadoras para destruir sistemas blindados y sistemas de artillería antiaérea armenios, obteniendo así una ventaja táctica clave. Este conflicto fue el primer ejemplo claro en el que los drones se convirtieron en un arma clave en conflictos convencionales para tener una superioridad sobre el enemigo. De este conflicto se sacaron una serie de lecciones aprendidas como es mencionado en un informe del IEEE (Instituto Español de Estudios Estratégicos) por Delgado en 2021:

- La insuficiencia de sensores por parte de Armenia evidenció su falta de capacidad para controlar el espacio aéreo frente a drones y que se necesita una red moderna adaptada a medios de baja firma (RCS reducido).
- El uso de drones para neutralizar medios de artillería antiaérea de medio y largo alcance se demostró muy eficaz, debido a su coste muy inferior.
- Los UAS son vulnerables a la guerra electrónica, los sistemas perturbadores son esenciales en la lucha contra ellos.
- El uso masivo de imágenes de drones como propaganda, convirtió a estos sistemas en un vector no solo militar, sino también de influencia psicológica y mediática.

La guerra de Ucrania desde 2022 intensificó aún más este fenómeno. En ella se ha producido un uso masivo y cotidiano de drones comerciales modificados de forma casera para poder cargar explosivos. Ucrania, con la ayuda de numerosas empresas civiles, ha convertido los UAS en una parte esencial de su resistencia, mientras que Rusia ha frecuentado el uso de drones kamikazes iraníes como el Shahed-136. Este conflicto ha demostrado que los drones no son un mero apoyo, si no una parte fundamental de los conflictos actuales, con un gran impacto tanto destructivo como psicológico.

Hoy en día el impacto de los UAS en los conflictos contemporáneos es innegable, han transformado la doctrina existente obligando a replantear la defensa aérea y representan una herramienta barata capaz de destruir sistemas de gran coste como el Patriot o el Iron dom. También han permitido a grupos terroristas e insurgentes potenciar sus capacidades aéreas,



---

Miguel Sánchez Peñas

además de han provocado la vuelta a métodos de defensa pasiva que se consideraban obsoletas como el uso de trincheras, la ocultación, el uso de redes miméticas y la dispersión.

### **3.3. Brechas identificadas en sistemas convencionales**

Los sistemas de defensa utilizados por la artillería antiaérea muestran considerables limitaciones a la hora de enfrentarse a la nueva amenaza que representan los UAS.

En primer lugar, existe una gran limitación de detección debido a la reducida sección radar (RCS). Se señala que estos sistemas trabajan en la capa mas baja del espacio aéreo, fuera de la cobertura que ofrecen los sistemas de artillería antiaérea, con una RCS muy baja, baja velocidad y firma infrarroja casi inexistente. Esto implica que los UAS pasen totalmente desapercibidos para sistemas concebidos para detectar aeronaves de mayor tamaño.

A esto se le suma la dificultad que tienen estos sistemas para detectar vuelos de baja cota y en entornos urbanos, ya que los UAS son capaces de enmascararse con el terreno, edificios y árboles. Esto reduce drásticamente la eficacia de la vigilancia aérea en escenarios complejos.

Otro aspecto para tener en cuenta es la capacidad de saturación mediante enjambres. Los drones pueden emplearse en grandes cantidades con el objetivo de saturar las defensas aéreas mediante la superioridad numérica, desbordando así las capacidades de los sistemas de defensa.

Otro inconveniente es que los sistemas convencionales fueron fabricados para detectar helicópteros y aviones, y no para esta nueva amenaza. Los sistemas de defensa antiaérea existentes no pueden reconfigurarse para adaptarse a la lucha contra UAS.

Esto explica la tendencia a desarrollar nuevos sistemas de detección de UAS que ha seguido la industria armamentística en los últimos años.

### **3.4. Definición y clasificación de UAS**

Los sistemas aéreos no tripulados, conocidos internacionalmente como UAS (Unmanned Aerial Systems) o RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) han constituido uno de los mayores avances tecnológicos del último siglo. Su aparición ha cambiado totalmente la doctrina y como se combate a nivela antiaéreo.

El término UAS se utiliza para referirse al sistema completo, que incluye tanto la aeronave como los diferentes sistemas de control, comunicación y apoyo necesarios para llevar a cabo sus operaciones. Esta distinción es relevante ya que el término drone o vehículo no tripulado hace referencia únicamente a lo que es la plataforma aérea, mientras que UAS hace referencia a los distintos sistemas en su conjunto.

#### **3.4.1. Definición y estructura de un UAS**

Un UAS se compone por norma general, de tres segmentos principales

1. Segmento aéreo: comprende la aeronave que realiza la misión. Puede ser de ala fija, ala rotatoria o multirrotor. Su diseño depende del tipo de misión para el que es empleado. Estas aeronaves suelen tener integradas sistemas de navegación automática.



Miguel Sánchez Peñas

2. Segmento de superficie o estación de control: se trata del núcleo operativo desde el cual el operador controla y supervisa el vuelo, recibe datos y transmite órdenes. Puede encontrarse en tierra, embarcada o integrada en plataformas móviles. Puede incluir uno o varios operadores en función de la complejidad del sistema.
3. Enlace de comunicaciones o data link: es la encargada de permitir el continuo flujo de información entre la aeronave y la estación de control. Este enlace puede ser mediante radiofrecuencia, cable de fibra óptica o vía satélite. Se trata de la parte más vulnerable del sistema ya que es susceptible a ser detectado o interferido por los medios de guerra electrónica enemigos.
4. A estos tres sistemas se le une otros elementos complementarios como la carga útil, que incluye sensores, cámara, armamento, sistema de mando y control, y los medios logísticos y de apoyo, que son esenciales para el despliegue y mantenimiento del sistema.

### 3.4.2. Clasificación general de los UAS

La clasificación de los UAS no es universal, si no que depende del organismo que consultemos. El estándar de referencia es el STANAG 4670 de la OTAN, que organiza los UAS en función del peso máximo al despegue (MTOW), la altitud de operación y el radio de misión.

Esta clasificación lo que permite es diferenciar entre UAS de empleo táctico, diseñado para misiones de reconocimiento, observación o enlace, y los UAS de empleo estratégico, como los modelos MALE y HALE, que tienen capacidad de operar durante varios días y cubrir zonas geográficas amplias.

*Tabla 1: Clasificación Otan sobre UAS (Fuente: Elaboración propia a partir de NATO Standardization Office, 2019).*

<b>Clase</b>	<b>Categoría</b>	<b>Empleo habitual</b>	<b>Altura de operación normal</b>	<b>Radio de misión</b>
Clase I (>150kg)	Micro (<66 J)	Subunidades tácticas; lanzamiento manual	Hasta 200 ft AGL	Hasta 5 km (LOS)
	Mini (<15kg)	Subunidades tácticas; manual o catapulta	Hasta 3.000 ft AGL	Hasta 25 km (LOS)



Miguel Sánchez Peñas

	Small (<150kg)	Unidades tácticas; sistema de lanzamiento	Hasta 5.000 ft AGL	50 km (LOS)
Clase II (150–600 kg)	Táctico	Formación táctica	Hasta 15.000 ft AGL	200 km (BLOS)
Clase III (>600 kg)	MALE / HALE	Operacional / Estratégico	Hasta 45.000–65.000 ft MSL	Sin límite (BLOS)
	Ataque/Combate	Operacional / Estratégico	Igual a MALE/HALE	Sin límite (BLOS)

### 3.4.3. Clasificación según tipo de ala

Tabla 2: Clasificación OTAN según tipo de ala (Fuente: elaboración propia a partir de NATO Standardization Office, 2019)

Plataforma	Ventajas	Inconvenientes
Ala fija	Mayor autonomía y velocidad; idónea para largas distancias y misiones estratégicas.	Incapaz de mantener vuelo estacionario; maniobrabilidad limitada en espacios reducidos.
Ala rotatoria	Vuelo estacionario, gran maniobrabilidad y versatilidad en despegues/aterrizajes.	Menor autonomía; mantenimiento más costoso y mayor complejidad mecánica.
Multirrotores	Simplicidad mecánica, estabilidad, bajo coste; ideal para misiones ISR de corto alcance.	Baja autonomía y velocidad; menor resistencia a condiciones meteorológicas adversas.



Miguel Sánchez Peñas

#### 3.4.4. Los UAS LSS (Low, Small, Slow): una categoría de especial interés

Dentro de los UAS de clase I encontramos los LSS (Low, Slow, Small), que se caracterizan por su pequeño tamaño, baja velocidad y vuelo a baja cota. Aunque aparentemente son plataformas sencillas, son una gran amenaza en los conflictos modernos, debido a su bajo coste, facilidad de adquisición y la dificultad que presentan para ser detectados por los sistemas de defensa antiaérea.

Los UAS LSS son capaces de realizar misiones de reconocimiento, guerra electrónica o ataque, y pueden operar en todo tipo de entornos. Su detección resulta compleja debido a su baja RCS (Radar Cross Section) y su capacidad para volar a una velocidad reducida para esquivar obstáculos.

Estos UAS LSS pueden ser de ala rotatoria o fija, y su empleo en conflictos recientes como en Ucrania o Nagorno-Karabaj se ha demostrado muy eficaz a la hora de generar daños muy desproporcionados en comparación con su coste, especialmente mediante ataques de enjambre y ataques suicidas.

Tabla 3: Características UAS LSS (Fuente: Elaboración propia a partir de EDA, 2020)

Parámetro	Rango típico UAS LSS
Peso	2–25 kg
Velocidad	<100 nudos
Altitud	<5.000 ft AGL
Autonomía	1–3 h
Tipo de vuelo	VLOS / BVLOS
Empleo típico	ISR, guerra electrónica, ataque ligero



---

Miguel Sánchez Peñas

### **3.5. Limitaciones y vulnerabilidades de los UAS**

Pese a las grandes ventajas operativas que presentan los UAS, estos también presentan una serie d vulnerabilidades que han de tenerse en cuenta a la hora del empleo de las medidas C-UAS (Counter Unmanned Aerial Systems).

- Limitaciones tecnológicas: Dependen de baterías y motores eléctricos, y sus sistemas de navegación GNSS/INS son vulnerables a interferencias.
- Meteorología: Las condiciones ambientales (lluvia, viento, niebla o temperaturas extremas) afectan de manera significativa al rendimiento y estabilidad del vuelo.
- Entorno operativo: Los enlaces de radiofrecuencia pueden ser detectados o interferidos, limitando el uso de UAS donde el enemigo hace uso de su guerra electrónica.
- Dependencia del operador: En los sistemas de control remoto o por operador la fatiga o falta de entrenamiento del piloto pueden comprometer el éxito de la operación.

### **3.6. Concepto de alerta temprana en artillería antiaérea**

La alerta temprana es la capacidad que tiene un sistema de defensa antiaérea para detectar, identificar, y clasificar amenazas aéreas con la suficiente antelación para poder responder con las medidas eficaces para para detenerlas antes de que estas cumplan sus objetivos. En el contexto militar en el que nos encontramos, esta capacidad es esencial para mantener la supervivencia y capacidad operativa de las unidades.

El tiempo de reacción es uno de los factores más importantes dentro del proceso de la defensa antiaérea. Una detección temprana ante una amenaza aporta al sistema de mando y control (C2) el margen necesario para analizar y coordinar una respuesta proporcional y con los medios óptimos para ello. En el escenario actual donde proliferan las amenazas de tipo LSS, como los drones de bajo coste, el anticiparse a esta amenaza se ha convertido en un factor fundamental para anticiparse y poder responder de manera correcta a esta amenaza y no se sobrepasado o saturado.

El radar actúa como el sensor principal del sistema de alerta temprana, siendo el que se encarga de proporcionar la información inicial para la detección y el seguimiento. Su tarea es ofrecer una imagen completa de todo el espacio aéreo que le permite su alcance, incluso aquellas zonas fuera de su espacio a proteger. El desarrollo de radares tridimensionales, de uso específico para aplicaciones C-UAS, ha traído consigo un gran salto cualitativo permitiendo medir con precisión la altura y velocidad de los objetivos.

Para la alerta temprana también es muy importante que los sistemas de mando y control sean interoperables, ya que esto permite que el flujo de información entre los sensores y el sistema de C2 sea cuestión de segundos, garantizando así una respuesta inmediata frente a cualquier incursión aérea.

En definitiva, cuando hablamos de la alerta temprana se trata de la primera línea de defensa frente a las amenazas aéreas actuales. Su eficacia está directamente relacionada con la precisión y alcance de los radares que empleamos, y la rapidez con la que se procesan los datos y se elabora una respuesta eficaz. En el marco de la transformación de las fuerzas armadas



---

Miguel Sánchez Peñas

hacia la fuerza 2035, el desarrollo de sistemas de radar avanzados con capacidad C-UAS es un pilar esencial para asegurar la seguridad del espacio aéreo.

## 3.7. Principios básicos del radar

### 3.7.1. Funcionamiento

- El radar (radio detection and ranging) se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas con la intención de detectar la presencia de un objeto y saber su posición exacta.
- El sistema funciona enviando una onda electromagnética a través del medio en el que se encuentre hasta encontrar un objeto, momento en el que refleja una parte de la energía que vuelve al radar.
- El tiempo de retardo, que es el tiempo entre la señal que transmitimos y la señal que recibimos, nos permite calcular la distancia al objetivo y se calcula de la siguiente manera:

$$d = \frac{c \cdot t_d}{2}$$

Donde c es la velocidad de la luz y t el tiempo de retardo.

- Además, el radar es capaz de medir la frecuencia del eco que recibimos, de manera que podemos calcular la velocidad del blanco (efecto doppler).
- La ecuación radar relaciona la potencia transmitida y la potencia recibida:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Esta ecuación demuestra que para aumentar el alcance sería necesario incrementar la potencia transmitida.

- Por lo tanto, un radar permite detectar, localizar y seguir a un objetivo.

### 3.7.2. Tipos de radar

Existen diferentes clasificaciones en función de su configuración, forma de onda y tipo de interacción con el blanco.

*Según el emplazamiento del transmisor y receptor*

- Radar monoestático: el emisor y receptor están en el mismo lugar, es el más usado en la defensa aérea.
- Radar biestático: el emisor y receptor están separados.

*Según la forma de la onda transmitida*

- Radar de onda continua (CW): transmite de forma ininterrumpida. No es capaz de medir la distancia, pero sí la velocidad.



---

Miguel Sánchez Peñas

- Radar pulsado: emite pulsos de corta duración seguido de intervalos de silencio. Es el sistema clásico utilizado en radares de vigilancia ya que es preciso a la hora de medir la distancia.
- Radar de onda continua modulada (FMCW): combina una emisión continua con una modulación en frecuencia. Permite estimar la distancia y la velocidad simultáneamente, siendo común en los radares de corto alcance.

#### *Según la interacción con el blanco*

- Radar primario: detecta a los blancos sin necesidad de su cooperación, detectando los blancos reflejados.
- Radar secundario: emite una señal de interrogación y recibe una respuesta por parte del objetivo que tiene un transpondedor.

#### *Según el número y tipo de antena*

- Monoantena rotatoria: realiza un barrido de 360 grados para cubrir el espacio aéreo.
- Multiantena o phased array: utiliza conjuntos de antenas que emiten señales desfasadas entre sí.
- Sistemas MIMO (Multiple input multiple output): transmiten señales diferentes desde cada antena, permitiendo identificar varios blancos a la vez.

### 3.7.3. Parámetros clave del radar

#### *Sección radar cruzada (RCS- Radar Cross Section)*

- Representa el área equivalente que tendría un objeto si reflejara la misma potencia hacia el radar que el blanco real.
- Se mide en metros cuadrados y depende de la frecuencia, el tamaño, la forma, el material y el ángulo de incidencia.
- La RCS puede fluctuar con el tiempo y el ángulo de iluminación.

#### *Alcance*

- El alcance máximo viene determinado por la potencia transmitida, la ganancia de antena, la sensibilidad del receptor y la RCS del blanco.
- Duplicar la distancia de detección implica multiplicar por dieciséis la potencia transmitida, limitando la capacidad de los radares de baja potencia.
- Está expuesto a factores como la meteorología, la refracción o la reflexión del terreno.
- Los radares diseñados para vigilancia aérea suelen mantener un balance entre potencia, ganancia y frecuencia para maximizar cobertura sin perder resolución.

#### *Frecuencia*

- Los radares operan principalmente en el rango de microondas (300 MHz a 300 GHz).



---

Miguel Sánchez Peñas

- Se dividen en bandas con características especiales:
  - I. **L (1–2 GHz):** largo alcance, baja resolución, poco afectada por la lluvia.
  - II. **S (2–4 GHz):** buen equilibrio entre alcance y resolución, común en vigilancia aérea.
  - III. **C (4–8 GHz):** resolución media, tamaño de antena moderado.
  - IV. **X (8–12 GHz):** alta resolución y antenas compactas, aunque con mayor atenuación atmosférica.
  - V. **Ku/K/Ka (12–40 GHz):** resolución muy elevada, alcance limitado, sensibles a condiciones meteorológicas.
- La elección de la banda depende del tipo de misión a la que se empeñe el radar.

#### *Movilidad*

- Según el entorno y la aplicación, los radares se pueden clasificar en:
  - I. Fijos: instalados permanentemente en bases o estaciones de vigilancia aérea. Proporcionan cobertura continua y alta potencia.
  - II. Móviles: integrados en vehículos o remolques. Permiten despliegue táctico y rápida reubicación.
  - III. Desplegables/transportables: montados en contenedores o estructuras modulares; combinan capacidad de movimiento con cierta estabilidad operativa.
- En la defensa antiaérea moderna, son preferidos los radares móviles y desplegados 3D, ya que combinan el despliegue rápido con la cobertura volumétrica y enlace directo con los sistemas de mando y control.

#### *Clutter (ecos no deseados)*

- Se denomina clutter al conjunto de ecos no deseados que provienen del mar, edificios, árboles, pájaros u objetos fijos.
- Este clutter puede enmascarar objetivos reales como los drones, que debido a su bajo tamaño y capacidad de volar a baja cota pueden aprovecharse de este efecto.
- Existen diferentes tipos de clutter:
  1. Clutter de superficie: causado por el reflejo del suelo o del mar.
  2. Clutter volumétrico: generado por precipitaciones, nubes o partículas en suspensión.
  3. Clutter puntual: producido por objetos aislados como torres o edificaciones metálicas.
- Para mitigar este efecto, los radares utilizan el filtrado Doppler, que les permite distinguir movimiento real de reflejos estáticos.



## 4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.1. Metodología de análisis

En el siguiente apartado se va a llevar a cabo el desarrollo del proceso de la metodología aplicada para la evaluación y comparación de los diferentes sistemas de radar en el ámbito de la alerta temprana frente a aeronaves no tripuladas (UAS) que se han estudiado durante el proyecto.

Este análisis se ha estructurado a través de una combinación de métodos tanto cualitativos como cuantitativos, siguiendo un enfoque misto que ha permitido utilizar tanto la información obtenida de las fichas técnicas de los diferentes sistemas, así como la experiencia operativa real procedente de encuestas y entrevistas con profesionales vinculados al empleo de radares en unidades del ejército de tierra.

Esta metodología tiene como objetivo detectar que características técnicas y operativas resultan más importantes para optimizar la alerta temprana, especialmente en el contexto de la lucha contra UAS que tienen baja RCS, vuelan a baja cota y tienen capacidad de saturar el espacio aéreo.

Se trata de un estudio con un enfoque comparativo, que se sustenta en criterios uniformes para así valorar los diferentes sistemas estudiados bajo una misma estructura de análisis.

#### 4.1.1. Enfoque metodológico general

El enfoque del estudio realizado se basa en el método comparativo multicriterio, que es idóneo para el estudio realizado ya que sirve para evaluar tecnologías heterogéneas que comparten el mismo propósito operativo.

Se ha utilizado el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) que fue desarrollado por Thomas Saaty en 1980. Esta herramienta que es ampliamente utilizada en el ámbito militar y de las ingenierías sirve para la toma de decisiones compleja.

El AHP lo que permite es ponderar diferentes criterios según la relevancia que consideremos que ha de tener cada uno, de esta manera signa puntuaciones a cada radar y obtiene un resultado global que facilita la priorización de opciones tecnológicas.

Este enfoque ofrece varias ventajas en el marco del TFG:

- Permite comparar parámetros técnicos objetivos, como el alcance, la frecuencia o la movilidad, junto con otros factores subjetivos como la facilidad de uso o el mantenimiento.
- Es coherente con la metodología de análisis de sistemas utilizada por el MADOC en evaluaciones de material.
- Favorece la integración de datos empíricos obtenidos del trabajo de campo.

De esta manera, no se limita a una comparación técnica, sino que constituye un proceso de análisis integral, en el que se contrastan las capacidades técnicas con lo percibido en el empleo.



---

Miguel Sánchez Peñas

#### 4.1.2. Fuentes de información

El análisis se ha apoyado en dos tipos de fuentes complementarias:

Las fuentes primarias, que son las documentales y técnicas, que incluyen la información procedente de documentos oficiales, fichas técnicas, publicaciones doctrinales y artículos específicos de defensa en los que se han tratado temas sobre este tipo de tecnologías. Estas fuentes fueron utilizadas para extraer parámetros cuantificables que sirvieron como base de la matriz comparativa.

Por otro lado, las fuentes secundarias han sido el trabajo de campo propio, que ha servido para complementar la información obtenida en los documentos, que se basaron en tres actividades empíricas centradas en los sistemas RAVEN y AUDS.

Entre estas actividades se encuentran un pequeño experimento técnico para observar la capacidad del RAVEN para detectar drones civiles de poco tamaño, una entrevista con un sargento con experiencia manipulando ambos sistemas además de una encuesta dirigida al personal de la batería mistral del RACA 93 con el fin de conocer su percepción sobre fiabilidad detección, integración y mantenimiento.

#### 4.1.3. Procedimiento de análisis

El proceso de análisis se desarrolló en cinco fases consecutivas, asegurando coherencia entre la parte teórica y la empírica:

##### **Selección de sistemas**

Se eligieron seis radares en base a su relevancia internacional y su vinculación con programas C-UAS:

- Raven 2D
- AUDS
- Giraffe
- Falcon
- Robin
- LIDS

Los criterios utilizados para seleccionar fueron la disponibilidad de datos, el empleo real de estos medios por las fuerzas armadas de otros países y la representación tecnológica de cada país.

##### **Recopilación de datos técnicos**

Se extrajeron parámetros objetivos de las fichas técnicas obtenidas, como la banda de frecuencia, alcance, movilidad, rcs mínima detectable, y fueron completados con datos doctrinales del MADOC diferentes noticias y notas de prensa.

##### **Definición de criterios de comparación**



---

Miguel Sánchez Peñas

Se seleccionaron los siguientes criterios:

- Alcance efectivo de detección
- Sensibilidad ante bajo RCS
- Movilidad y rapidez de despliegue
- Integración con sistemas de mando y control C2
- Fiabilidad y mantenimiento
- Coste y sostenibilidad

#### **Evaluación multicriterio**

Se elaboró una matriz de comparación en la que cada radar fue puntuado de 1 a 5 en cada criterio, conforme a los datos que se habían recopilado. Las ponderaciones fueron posteriormente aplicadas para obtener una puntuación final ponderada, que permite clasificar los sistemas en función de su eficacia relativa.

#### **Validación empírica y análisis de resultados**

Los resultados obtenidos en el AHP fueron contrastados con el trabajo de campo realizado, en el caso del RAVEN y el AUDS.

Esto permitió analizar las convergencias y divergencias del modelo, para así destacar las fortalezas y limitaciones percibidas por los operadores reales.

Finalmente, se elaboraron tablas comparativas que sirven como base para la discusión y las conclusiones.

#### **4.1.4. Justificación del enfoque**

La elección de este modelo de metodología responde a las siguientes razones:

En primer lugar, es debido a que el método AHP es compatible con los procedimientos de priorización tecnológica que utiliza el MADOC, así como con el modelo de análisis de capacidades de la OTAN.

También debido a que combina datos objetivos con opiniones y percepciones reales que usuario, lo que refuerza la fiabilidad de las conclusiones.

Por último, otro factor es la aplicabilidad práctica, los resultados pueden ser empleados como referencia para la modernización de las baterías mistral o para futuras compras de rader C-UAS por parte el MAAA.

## **4.2. Descripción técnica de los sistemas analizados**

En el presente apartado se describe detalladamente los sistemas de radar estudiados en el análisis comparativo. Todos ellos representan la vanguardia del desarrollo tecnológico en el ámbito de la detección, seguimiento e identificación de posibles amenazas aéreas de baja cota, baja velocidad y que tienen una pequeña firma radar, que son las características de los UAS.

Se han seleccionado seis sistemas procedentes de diferentes países como España,



Miguel Sánchez Peñas

Reino Unido, Países Bajos, Suecia y Estados Unidos, para poder disponer de una muestra amplia representativa de países aliados de la OTAN. La información obtenida procede tanto de documentos académicos procedentes del MADOC y fichas técnicas de los diferentes fabricantes.

Cada descripción se articula en los siguientes ejes:

- Arquitectura y principio de funcionamiento
- Características técnicas esenciales
- Capacidades C-UAS específicas
- Ventajas y limitaciones

#### 4.2.1. Radar RAVEN 2D (España- Indra/ Ejército de Tierra)

El Raven es el radar de vigilancia aérea del Sistema COAAAS-L, desarrollado por Indra Sistemas S.A. Se trata del radar utilizado para detectar objetivos en las baterías Mistral, donde se encuentra orgánicamente dentro del ejército de tierra. Permite cubrir la baja y muy baja cota frente a amenazas convencionales y no tripuladas.

Este radar opera en banda X utilizando una tecnología Doppler pulsado, ofreciendo una cobertura azimutal de 360 grados y una elevación que se puede ajustar según el tipo de misión. Su alcance efectivo está alrededor de 20 km y proporciona una precisión angular cercana a  $\pm 0,3^\circ$ , y tiene la capacidad de realizar seguimiento simultáneo de varios blancos a la vez.

El sistema tiene modos de vigilancia sectorial y omnidireccional, además de comunicación a tiempo real con los puestos de tiro mistral. A su vez se puede integrar dentro del sistema de mando y control con un COAAAS-M e integrarse completamente con el RCS  $\geq 0,05 \text{ m}^2$  nacional.

En su función C-UAS, el RAVEN 2D es capaz de detectar UAS que tienen RCS  $\geq 0,05 \text{ m}^2$ , aunque su rendimiento disminuye contra UAS de pequeño tamaño y vuelo rasante. Pese a ello es bastante fiable y tiene un mantenimiento sencillo lo que lo convierte en un sensor de referencia en las unidades españolas.

Tabla 4: Atributos radar RAVEN (Fuente: elaboración propia a partir de Ministerio de Defensa MADOC 2008)

Tipo	Radar 3D doppler pulsado
Banda	X
Alcance efectivo	$\approx 20$ km



Miguel Sánchez Peñas

RCS mínima detectable	0,05 m <sup>2</sup>
Cobertura	360°
Integración C2	Total con COAAAS-L / Mistral
Plataforma	Móvil táctica
Fabricante	Indra Sistemas S.A.



Figura 5: Radar RAVEN 2D (Fuente: elaboración propia)

Ventajas: gran fiabilidad, integración doctrinal plena, resistencia a interferencias y mantenimiento nacional.

Limitaciones: sensibilidad reducida frente a UAS de pequeño tamaño y vuelos muy bajos.

#### 4.2.2. Sistema AUDS (Blighter- Reino Unido/ Ejército de tierra)



---

Miguel Sánchez Peñas

El AUDS (Anti-UAS Defense System) es una de las soluciones C-UAS más consolidadas dentro de la OTAN. Se trata de un sistema modular multisensor, creado para detectar, seguir, identificar y neutralizar drones en menos de 15 segundos desde que son detectados.

Está compuesto por tres subsistemas:

1. Radar Blighter A400, de tipo FMCW Doppler E-scan en banda Ku, con cobertura de 180 ° y alcance de entre 10 y 20 km. Detecta RCS inferiores a 0,01 m<sup>2</sup> y tiene elevada inmunidad a interferencias.
2. Sensor EO/IR Hawkeye System, que proporciona seguimiento visual y térmico mediante cámaras HD y térmicas, con telémetro láser.
3. Inhibidor RF direccional, capaz de interrumpir enlaces de mando y control, GNSS y vídeo de manera selectiva.

El sistema es transportable y escalable, pudiendo montarse en trípode, torre o vehículo.



*Figura 6: radar AUDS (Fuente: elaboración propia)*



Miguel Sánchez Peñas

Tabla 5: atributos radar AUDES ( Fuente: *Blighter Surveillance Systems et al., 2017*).

Radar	Blighter A400 FMCW E-scan
Banda	Ku (15–17 GHz)
Alcance efectivo	10–20 km
RCS mínima	0,01 m <sup>2</sup>
Cobertura	180° (360° opcional)
Neutralización	Inhibidor RF direccional multi-banda
Integración C2	Modular plug-and-fight
Plataformas	Estática o vehicular

Ventajas: detección precisa de micro UAS, es capaz de realizar detección-identificación- neutralización, y ha sido comprobado en despliegues OTAN.

Limitaciones: Tiene menor movilidad táctica y necesita un personal especializado.

#### 4.2.3. Radar IRIS (Países Bajos – Robin Radar Systems)

El IRIS es un radar 3D FMCW de estado sólido desarrollado por Robin Radar Systems para la detección de pequeños UAS. Destaca por lo compacto que es y su bajo Swap, que significa bajo tamaño, peso y necesidad de energía, lo que permite su instalación en trípodes, mástiles o vehículos ligeros.

Opera en banda X y tiene un alcance instrumentado de 5 km. Su cobertura completa es de 360° x 60° y garantiza vigilancia en entornos con alto clutter. Emplea algoritmos de micro-Doppler para distinguir drones de aves, lo que disminuye considerablemente las falsas alarmas.

Su mantenimiento es reducido y tiene un despliegue rápido, lo que lo convierte en una herramienta ideal para misiones de seguridad de infraestructuras críticas o aeropuertos.



Miguel Sánchez Peñas

Tabla 6: Atributos radar IRIS (Fuente: elaboración propia a partir de Robin Radar Systems BV, 2020)

Tipo	Radar 3D FMCW solid state
Banda	X
Alcance	5 km
Cobertura	360° × 60°
Peso	25 kg
Potencia	2 × 12 W
Clasificación	Automática micro-Doppler
Integración	Interfaces abiertas (XML/ASTERIX)



Figura 7: radar IRIS ( Fuente: Robin Radar Systems BV, 2020).

Ventajas: fácil portabilidad, clasificación automática, bajo coste operativo y rápido despliegue.

Limitaciones: alcance limitado y menor resistencia a interferencias en escenarios militares intensos.

#### 4.2.4. Radar Giraffe 1X (Suecia- Saab AB)

El Giraffe 1 X es un radar 3D AESA multi-haz de banda X que pertenece a la familia de



Miguel Sánchez Peñas

radares giraffe de SAAb. Su antena rotatoria que gira a 60rpm le proporciona una cobertura de 360°, detectando amenazas aéreas de todo tipo: aeronaves, helicópteros, misiles, proyectiles RAM y UAS.

Su alcance máximo es de 75 km y tiene capacidad de seguir a más de 600 blanco simultáneos. Incorpora dos modos especializados:

- Drone tracker, para detectar y clasificar micro-UAS
- RAM Sense, para predicción de trayectorias balísticas

Está diseñado para integrarse en redes GBAD/VSHORAD/MSHORAD y puede ser montado sobre plataformas 4x4, contenedores o instalaciones fijas. También puede ser transportado por avión.

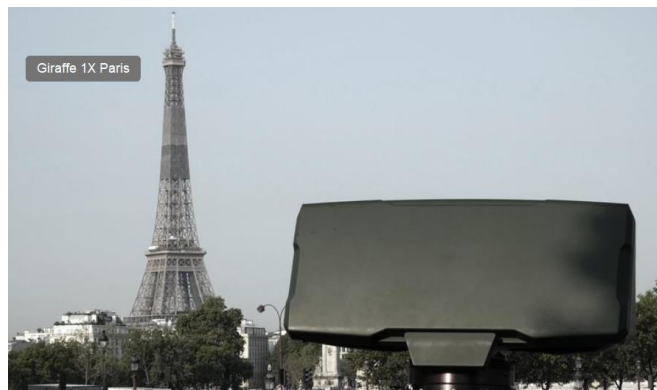


Figura 8: Radar Giraffe 1X (Fuente: Saab AB, 2023)

Tabla 7: Atributos radar IRIS (Fuente: elaboración propia a partir de Robin Radar Systems BV, 2020)

Tipo	Radar 3D AESA multi-beam
Banda	X
Alcance	75 km
Cobertura	360° (60 rpm)
Seguimiento	> 600 blancos
Actualización	1 Hz



Miguel Sánchez Peñas

Modos	Drone Tracker / RAM Sense
Integración C2	Total GBAD/MSHORAD

Ventajas: tiene cobertura extendida, precisión 3D y es capaz de detectar micro-UAS y RAM, además de tener buena movilidad.

Limitaciones: tiene un alto coste y el mantenimiento es complejo.

#### 4.2.5. Sistema LIDS (Estados Unidos- Low Slow Small Integrated Defeat System)

El LIDS es la solución C-UAS integrada del ejército de los Estados Unidos. Está diseñada para detectar, identificar y neutralizar drones pequeños mediante una arquitectura de sensores y efectores coordinados por el sistema de mando FAAD C2.

Su núcleo de detección combina el radar AN/TPQ-50 (L-band phased array) junto con los Ku-band Multi-Mission Radars (KuMRFS), llegando a alcanzar más de 35 km y cobertura aérea de 360°.

Estos radares se complementan con sensores pasivos eo/IR y módulos de Electronic Warfare para detección de contramedidas de enlaces RF. Como actuador tiene el coyote block2 junto con un interceptor, que es un micro misil reutilizable.

La arquitectura FAAD C2, con enlace link-16, permite la interoperabilidad total con otros sistemas de defensa antiaérea estadounidenses y aliados.

Tabla 8: atributos sistema LIDS (Fuente: elaboración propia a partir de Northrop Grumman et al., 2021)

Tipo	Sistema C-UAS integrado multi-sensor
Radares	AN/TPQ-50 (L) / KuMRFS (Ku)
Alcance	> 35 km
Cobertura	360°
Funciones	Detección-Identificación-Neutralización
C2	FAAD C2 (Link-16)



Miguel Sánchez Peñas

Efectores	EW módulos / Coyote Block 2+
Despliegue	Desde 2017 (CENTCOM)



Figura 9: radar AN/TPQ-50 (Fuente: Northrop Grumman et al., 2021).



Figura 10: radar KuMRFS (Ku) (Fuente: Northrop Grumman et al., 2021).

Ventajas: cobertura amplia, modularidad e interoperabilidad OTAN. Además, tiene capacidad C-RAM.

Limitaciones: Tiene alta complejidad logística y elevado coste de sostenimiento.

#### 4.2.6. Sistema Falcon shields (Reino Unido- Leonardo UK)

El Falcon shield es un sistema C-UAS modular, escalable y desplegable desarrollado para contrarrestar amenazas low, slow and small.



Miguel Sánchez Peñas

Integra sensores activos como un radar de 360°, pasivos y sensores EO/IR. Tiene también capacidad de ataque electrónico de baja colateralidad gestionado por el entorno C2SA (Command, Control and Situational Awareness).

Tiene interfaces Asterix que permiten operar de forma independiente, integrándose con redes de defensa aérea o infraestructuras civiles.

Puede configurarse como una instalación fija, sistema transportable o vehículo, adaptándose a las diferentes misiones en las que puede ser empleado.



Figura 11: sistema Falcon (Fuente: Leonardo UK Ltd., 2025).

Tipo	Sistema C-UAS multisensor modular
Sensores	Radar 360° / ESM / EO-IR NERIO-ULR
Banda radar	Variable (X o S)
Cobertura	360° o sectorial
Alcance estimado	10–20 km
C2	C2SA (Command & Control & SA)
Plataforma	Fija / Móvil / MSV



Miguel Sánchez Peñas

Fabricante	Leonardo UK Ltd.
------------	------------------

Figura 12: atributos sistema Falcon (Fuente: elaboración propia a partir de Leonardo UK Ltd., 2025).

### 4.3. Experimento de campo: Prueba de detección de un UAS civil con radar RAVEN 3D

Con el objetivo de evaluar de manera empírica la capacidad que tiene el RAVEN 3D que se encuentra orgánicamente en las baterías Mistral para detectar un vehículo aéreo no tripulado de fabricación civil y de pequeño tamaño se llevó a cabo el siguiente experimento. El propósito concreto era comprobar, si en condiciones reales de despliegue, el RAVEN era capaz de detectar, rastrear y proporcionar datos útiles sobre un dron civil de reducida sección eficaz radar (RCS).



Figura 13: radar RAVEN (Fuente: elaboración propia)

#### Material y equipo

- Radar: RAVEN 3D, perteneciente a la batería Mistral, configuración estándar de despliegue para vigilancia aérea de baja y media cota.
- Plataforma objetivo: UAS civil, tamaño reducido, estructura ligera.
- Condiciones del entorno: Se realizó dentro del acuartelamiento Los Rodeos, donde se encuentra el RACA 93, el terreno tenía cierto clutter- vegetación y relieve- además de la presencia de las infraestructuras de la propia unidad. También hay que tener en cuenta la presencia de un aeropuerto en las proximidades.



Miguel Sánchez Peñas



Figura 14: Pantalla terminal inteligente radar RAVEN (Fuente: elaboración propia)

### Realización del experimento

La prueba se llevó a cabo en el área de instrucción de la batería Mistral, empleando el radar RAVEN 3D. Se coordinó previamente con el jefe de la batería y el personal de seguridad, garantizando que en todo momento se cumplieran las medidas de seguridad oportunas.

El objetivo era observar si el radar era capaz de detectar un UAS civil de pequeño tamaño. Para ello el dron realizó varias pasadas a baja altura, en diferentes sentidos y a diferentes distancias respecto a la posición del radar, simulando posibles trayectorias de vuelo hostil.

Durante cada pasada se registraron las observaciones visuales y los resultados mostrados en la pantalla del radar, de especial manera si se observaba alguna traza. Se repitió este proceso en distintos vuelos para comprobar la consistencia de los resultados y descartar posibles errores puntuales.



Figura 15: dron utilizado en el experimento (Fuente: elaboración propia).



---

Miguel Sánchez Peñas

## Resultados

- En las pasadas realizadas, el RAVEN 3D no generó detección ni track del UAS civil casero.
- En ningún caso se registró una pista consolidada en la consola que permitiese proporcionar datos en azimuth/elevación o velocidad del objetivo comparable son las que se obtienen con blancos de mayor RCS.
- Las observaciones visuales confirmaban que el UAS sobrevoló las zonas que se habían marcado, pese a que la detección por parte del RAVEN seguía sin producirse.

## Análisis y discusión

- RCS extremadamente baja del objetivo Los UAS caseros pequeños presentan una RCS muy reducida, lo que disminuye la probabilidad de que un radar diseñado para detectar blancos de mayor firma como aviones o helicópteros registre un eco significativo. El experimento confirma que, en condiciones reales, este factor es determinante y lleva a la no detección.
- Baja cota y clutter del terreno: Las pasadas se realizaron a baja altitud, donde el clutter degrada la relación señal/ruido. Esta combinación dificulta la separación del eco del dron del fondo, agravando la no detección.
- Ángulo y aspecto del dron: La orientación del dron respecto a la antena influye en su capacidad de detección, y en nuestras pruebas incluso cambiando la orientación de este no se consiguió ninguna detección.
- Condiciones ambientales: Aunque las condiciones ambientales no fueron extremas durante la prueba, la presencia de viento puede aumentar la inestabilidad del eco, contribuyendo a variaciones que dificultan aún más la detección de blancos marginales.

## Conclusiones obtenidas

1. El RAVEN 3D, en la configuración y en las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento, no detecta de forma fiable un UAS civil de tamaño reducido y baja RCS cuando estos operan a baja cota
2. La batería Mistral no puede confiar únicamente en el RAVEN para la alerta temprana frente a amenazas de UAS micro/mini; lo cual deja una brecha en su capacidad C-UAS de pequeño tamaño y bajo coste.
3. Las limitaciones que se han observado son coherentes con el conocimiento teórico que tenemos sobre el radar RAVEN 3D, al ser un radar convencional tiene dificultades para detectar UAS de pequeña RCS que vuelan a baja cota.

## 4.4. Entrevista profesional: valoración operativa de los sistemas AUDS y RAVEN

Con el fin de complementar tanto el trabajo experimental como el conocimiento teórico obtenido a partir de los manuales, se realizó una entrevista al Sargento de Artillería D. Esteban Velázquez Wallraf, especialista en radares y conocedor directo del empleo en operaciones de los sistemas AUDS y RAVEN 3D dentro del ejército de tierra. Esta entrevista permitió comparar



---

Miguel Sánchez Peñas

los resultados obtenidos en el experimento con la experiencia de un profesional, aportando así un punto de vista actual sobre el estado de estos sistemas ante las amenazas emergentes como los UAS.

El sargento Wallraf explicó que el sistema AUDS es un sistema de origen británico, introducido al ejército estadounidense en 2016, siendo el primer sistema acreditado específicamente contra RPAS. Está caracterizado por su modularidad y versatilidad, ya que puede operar en configuraciones fijas para proteger infraestructuras críticas y en plataformas móviles que acompañan a unidades desplegadas o convoyes.

El entrevistado subrayó también que el AUDS fue concebido para contrarrestar amenazas tipo LSS, esto se refiere a aeronaves de baja velocidad, altitud y tamaño que resultan extremadamente difíciles de detectar con radares tradicionales. Es por esto que el sistema británico destaca por integrar sensores complementarios como el SENDEZ o el AEROSCOPE que proporcionan capacidad de alerta temprana y permiten tener una respuesta inmediata ante los drones ligeros.

En cuanto a la incorporación de este sistema al ejército español, el sargento Wallraf señaló que su primer aterrizaje fue en el RAAA 71, donde se formó al personal para operar estos sistemas en zonas de operaciones. Mencionó que el AUDS ha sido desplegado en misiones internacionales como Irak Mali o Afganistán, donde se ha mostrado eficaz en la protección permanente de las instalaciones y unidades desplegadas, ofreciendo una cobertura las 24 horas del día.

Por otra parte, describió el RAVEN como un sistema de alerta y vigilancia integrado dentro de la batería Mistral, cuyo principal cometido es la detección de aeronaves a baja y muy baja cota. Tiene un alcance aproximado de 20 km, lo que le permite proporcionar información bidimensional, pero no dispone de capacidad tridimensional ni tiene los algoritmos avanzados necesarios para el seguimiento de drones.

El sargento explicó que el RAVEN puede detectar UAS de clase 2 y 3 según la clasificación OTAN, esto se refiere a aquellos que tienen masa superior a 250 kilos, pero no está diseñado para detectar amenazas más pequeñas, que son las que hoy constituyen el grueso de los drones empleados en los conflictos convencionales y asimétricos. Su origen se remonta a los años 80, siendo de fabricación neerlandesa e introducido en España en los 2000. Actualmente se utiliza en operaciones como Libre Hidalgo en el Líbano para la protección de posiciones y puntos sensibles.

Cuando se le preguntó por la vigencia del RAVEN en los conflictos actuales, el sargento Wallraf consideró que pese a seguir cumpliendo funciones útiles de vigilancia aérea, resulta obsoleto frente a las amenazas de última generación. Los drones actuales, que en muchos casos tienen un peso inferior a 5 kilos y perfiles de vuelo rasante, son capaces de escapar fácilmente a su capacidad de detección. En el mejor de los casos, señala que el radar podría mostrar plots débiles o señales no confirmadas, insuficientes para generar una alerta útil.

Finalmente, el entrevistado insistió en que era necesario una renovación tecnológica en el ámbito de la defensa antiaérea. Según valoraba, es imprescindible incorporar radares multifrecuencia, sistemas AESA y sensores combinados (EO/IR, RF, acústicos) que sean capaces de detectar, identificar y clasificar amenazas pequeñas y de baja firma radar. En su opinión, solo mediante una integración multisensor se logrará una alerta temprana eficaz frente al fenómeno emergente de los UAS y sus variantes, como los enjambres de drones.



---

Miguel Sánchez Peñas

Para ver la entrevista completa, consultar ANEXO I.

#### **4.5. Encuesta a suboficiales sobre la capacidad operativa del RAVEN**

Se realizó una encuesta dirigida a los suboficiales de la batería Mistral del RACA 93, con el objetivo de conocer su percepción sobre distintas capacidades operativas que tiene el radar RAVEN frente a amenazas UAS. La muestra fue de 8 participantes y el cuestionario utilizó una escala de 5 puntos. Las preguntas abordaron la detección de drones pequeños, la capacidad de seguimiento a baja cota, cobertura angular, rendimiento en presencia de interferencias, facilidad para desplegar, movilidad táctica, facilidad de usar su interfaz y la confianza global en el sistema.

Las respuestas siguieron una línea clara y coherente:

- Respecto a la detección y seguimiento de UAS de pequeño tamaño, la percepción era mayoritariamente negativa o ambivalente.
- En cuanto a cobertura angular y rendimiento en entornos con interferencias, predominan las respuestas neutrales, lo que indica experiencia mixta o incertidumbre operacional en estos temas.
- En el plano táctico y estratégico, las valoraciones son claramente positivas. Se refuerza muy positivamente el despliegue, movilidad e interfaz del usuario, que obtuvieron puntuaciones altas, reflejando que el sistema es bien apreciado por su operatividad y facilidad de uso.
- Sin embargo, la confianza global en la eficacia del radar RAVEN para combatir amenazas como los UAS de pequeño tamaño resulta baja.

De estos resultados se extraen las siguientes conclusiones operativas: (1) existe una brecha real en la detección y seguimiento de los micro/mini-UAS por parte del RAVEN en su configuración actual, ya que no lo cubre de manera fiable. (2) El sistema mantiene ventajas prácticas importantes como el despliegue y la movilidad que facilitan su empleo en operaciones. (3) La solución más adecuada para mitigar la brecha identificada pasa por una integración multisensor o por la realización de pruebas conjuntas que muestren una mejora operativa.

Se debe señalar que la muestra es limitada ya que es tan solo de 8 usuarios y de carácter no probabilístico, por lo que las conclusiones obtenidas en el muestreo deben interpretarse como percepción operativa interna de la unidad.

Para consultar las preguntas y resultados de la encuesta, consultar ANEXO II.

#### **4.6. Estudio multicriterio (Método AHP)**

Con el objetivo de realizar una evaluación objetiva y jerarquizada de los diferentes sistemas radar analizados durante este proyecto, se ha empleado el método Analytic Hierarchy Process (AHP).

El AHP permite cuantificar criterios cualitativos comparando por pares, obteniendo así



Miguel Sánchez Peñas

finalmente una priorización ponderada de las alternativas. Este procedimiento es especialmente útil en el ámbito militar, ya que las decisiones de adquisición de nuevos sistemas se basan en múltiples factores tanto técnicos como operativos que no siempre son directamente medibles.

Para realizar este método se ha utilizado la herramienta AHP-OS (AHP Online System), que se trata de una plataforma gratuita que automatiza el cálculo de matrices, pesos relativos y ratios de consistencia necesarios para asegurar así la validez matemática del proceso y la trazabilidad de los resultados. Esta herramienta permite introducir criterios de evaluación, comparar cada sistema entre los demás y obtener una jerarquía final de prioridades, tanto para cada criterio en particular como de forma global.

#### 4.6.1. Definición de criterios y ponderación

Los criterios empleados se han definido en base a los factores más importantes en la eficacia de un radar destinado a la detección y alerta temprana frente a las amenazas UAS. Estos criterios son:

- Alcance: capacidad de detección efectiva frente a objetivos de baja sección radar.
- Movilidad: grado de despliegue, transporte y rapidez operativa.
- Precisión (resolución angular y RCS): capacidad para discriminar blancos pequeños o de baja firma.
- Integración C2: compatibilidad con sistemas de mando y control.
- Coste: valoración global de adquisición, mantenimiento y sostenibilidad.

Tras realizar la comparación por pares se obtuvieron los siguientes pesos:

#### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	Alcance	48.9%	1
2	Movilidad	9.1%	4
3	Precisión	23.5%	2
4	Integración C2	14.3%	3
5	coste	4.2%	5

Se obtiene de esta ponderación que el alcance constituye el criterio más determinante seguido por la precisión y la integración C2, lo cual resulta coherente con la naturaleza del estudio, que está centrado en la eficiencia de detección y coordinación frente a UAS.

#### 4.6.2. Resultados globales

Cada uno de los seis sistemas ha sido evaluado individualmente por criterio mediante comparaciones por pares. A partir de estos resultados, y tras integrarlos dentro de una matriz jerárquica global, se obtuvieron los pesos finales que determinan la clasificación de los sistemas estudiados.



---

Miguel Sánchez Peñas

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	7.6%	5
2	AUDS	6.7%	6
3	IRIS-T SLM Radar	29.7%	1
4	Giraffe 1X	13.3%	4
5	LIDS	20.5%	3
6	Falcon Shield	22.3%	2

El análisis evidencia que el radar Iris ofrece el mejor equilibrio entre los atributos de alcance, precisión, movilidad, integración C2 y coste.

Los sistemas Falcon y LIDS también presentan buenos rendimientos, especialmente en la detección de blancos de baja firma radar y la interoperabilidad. Por otro lado, RAVEN y Giraffe 1X destacan por su portabilidad y enlace C2.

Finalmente, AUDS se muestra como una solución táctica de corto alcance más adecuada para la defensa puntual.

Para más información sobre el desarrollo del método AHP consultar Anexo III.



## 5. CONCLUSIONES

Una vez se ha desarrollado todo el proceso de investigación, análisis técnico y metodología, se puede afirmar que los objetivos que fueron planteados al inicio del proyecto se han cumplido satisfactoriamente. El estudio ha permitido comparar rigurosamente distintos sistemas de radar empleados internacionalmente para la alerta temprana frente a aeronaves no tripuladas, aportando una visión clara sobre su eficacia operativa y su posible integración dentro de la defensa aérea española.

El análisis realizado demuestra que el radar RAVEN, que se encuentra actualmente en dotación dentro de las baterías Mistral, continúa siendo un sistema fiable frente a UAS de mayor tamaño, ya que ofrece una cobertura eficaz en baja y muy baja cota, además de mantener plena integración con el sistema de mando y control COAAS-I. Sin embargo, presenta grandes limitaciones frente a la amenaza LSS, como se comprobó en el experimento de detección. Esto se debe a su baja sensibilidad ante blancos de reducida sección radar y la carencia de algoritmos avanzados de clasificación, lo que impide una detección eficaz ante estas amenazas.

Por otro lado, el sistema AUDES, se ha mostrado como una solución C-UAS altamente eficaz ante los drones LSS, combinando un radar FMCW de alta precisión, un sensor electroóptico y un inhibidor RF direccional que permite realizar detección, identificación y neutralización en un tiempo muy limitado. Sin embargo, presenta limitaciones como su complejidad de mantenimiento y la necesidad de personal especializado para su operación. Además, su presencia dentro del ejército de tierra no está muy extendida todavía, lo que limita su potencial pese a su probada eficacia en misiones como Irak o Mali.

De entre los sistemas evaluados, el radar IRIS de la empresa Robyn Radar Systems se ha identificado como el más equilibrado y eficaz, ya que combina gran precisión, movilidad y bajo consumo además de su capacidad de discriminación de blancos mediante algoritmos micro-Doppler. Su diseño compacto y rápida capacidad para desplegar lo convierten en una opción excelente para reforzar la alerta temprana. Actualmente, este sistema ya está siendo empleado por las fuerzas armadas de los Países Bajos y Bélgica para la protección de infraestructuras críticas y bases militares.

Combinando los resultados obtenidos, podemos concluir que la batería Mistral cuenta con una tecnología válida como base, pero necesita una modernización hacia sistemas tridimensionales que complementen al RAVEN y proporcionen una cobertura efectiva ante amenazas LSS. La combinación de radares ligeros como el IRIS con sistemas de neutralización tipo AUDES permitiría cerrar la brecha de detección existente y dotar a las unidades de una capacidad C-UAS integral y adaptable a diferentes escenarios.

En definitiva, el trabajo pone de manifiesto que la evolución de la amenaza UAS exige una respuesta rápida basada en la innovación tecnológica y la interoperabilidad. España dispone de la base doctrinal y técnica que se necesita para avanzar hacia una defensa aérea moderna que garantice la protección efectiva de nuestro espacio aéreo y la seguridad de las fuerzas desplegadas en el entorno operativo actual.



Miguel Sánchez Peñas

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NATO Standardization Office. (2019). *STANAG 4670: Unmanned Aircraft Systems (UAS) Classification and Minimum Requirements for UAS Airworthiness*. Brussels: NATO Standardization Office.
- European Defence Agency. (2020). *Countering Low, Small and Slow (LSS) Unmanned Aerial Systems – Technical Report*. Brussels: European Defence Agency.
- European Union Aviation Safety Agency. (2020). *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and 2019/945)*. Cologne: EASA.
- Ministerio de Defensa – MADOC. (2008). *MI6-342: Radar RAVEN. Sistema COAAAS-L*. Granada: Mando de Adiestramiento y Doctrina del Ejército de Tierra.
- Blighter Surveillance Systems, Chess Dynamics & Enterprise Control Systems. (2017). *AUDS: Anti-UAV Defence System Overview*. Saffron Walden, UK: Blighter Surveillance Systems.
- Northrop Grumman, Raytheon, Leonardo DRS & SRC Inc. (2021). *Low, Slow, Small UAS Integrated Defeat System (LIDS) Family of Systems Overview*. Approved for Public Release, U.S. Army.
- Leonardo UK Ltd. (2025). *Falcon Shield: Counter-Uncrewed Aerial Systems (C-UAS)*. Basildon, UK: Leonardo Electronics.
- Saab AB. (2023). *Giraffe 1X System Description (Document ID: 1551-FAPM3010020/STD, Issue I)*. Linköping, Sweden: Saab AB.
- Robin Radar Systems BV. (2020). *IRIS® | ELVIRA® Drone Detection Radar*. The Hague, Netherlands: Robin Radar Systems BV.
- Blighter Surveillance Systems, Chess Dynamics, & Enterprise Control Systems. (2019). *AUDS: Anti-UAV Defence System – Technical Datasheet (02-10-19)*. Saffron Walden, UK: Blighter Surveillance Systems.
- León Serrano, G. (2024). *Evolución tecnológica de los enjambres de drones en el ámbito de la Defensa*. Academia de las Ciencias y las Artes Militares, Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar.
- Parker Sanfuentes, J. (2000). *Historia del radar*. *Revista de Marina*, 1/2000, Armada de Chile.
- Pascual, P. (2002). *El radar en la Segunda Guerra Mundial*. *Revista General de Marina*, noviembre 2002.
- Autor desconocido. (s.f.). *Diseño de un receptor analógico para un sistema de radar meteorológico*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ministerio de Defensa – Dirección General de Armamento y Material (DGAM). (2020). *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa, n.º 65 (2.º trimestre 2020)*. Madrid: Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDG PLATIN). ISSN 2444-4839.
- Marín Delgado, J. A. (2021). *Guerra de drones en el Cáucaso Sur: Lecciones aprendidas de Nagorno Karabaj (DIEEEO 21-2021)*. Madrid: Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE).



---

Miguel Sánchez Peñas

Marín Delgado, J. A. (2023). *Lecciones aprendidas del empleo de UAS en Armenia y Azerbaiyán*. Madrid: Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE).

Martínez Vázquez, C. L. (2023). *El desafío de los sistemas de aeronaves no tripuladas a la protección de la fuerza*. En L. A. Hernández García (Ed.), *La protección de la fuerza ante las nuevas amenazas tecnológicas* (pp. 23–41). Madrid: Ministerio de Defensa.

Ministerio de Defensa – Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC). (2024). *Limitaciones de los radares de defensa aérea frente a amenazas LSS*. Granada: MADOC.

Ministerio de Defensa – Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC). (2025). *Publicación Doctrinal PD3-319: Lucha y protección C-UAS LSS*. Granada: Centro Geográfico del Ejército.

Bolaños Alonso, L. F. (2024, octubre). *Concienciación amenaza guerra electrónica / C-UAV: Conflicto de Ucrania*. Conferencia impartida en la Comandancia General de Melilla, Regimiento de Guerra Electrónica nº 32.

Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos (CCDC). (2023). *La protección de la fuerza ante las nuevas amenazas tecnológicas*. Madrid: Ministerio de Defensa, Imprenta del Ministerio de Defensa.

Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos (CCDC). (2023). *La protección de la fuerza ante las nuevas amenazas tecnológicas*. Madrid: Ministerio de Defensa, Imprenta del Ministerio de Defensa.

*US Army Program Executive Office Missiles & Space, FY2023 budget justification*

*UK MoD DSTL Counter-UAS programme (2019); Leonardo Defence press kit*

*Blighter Surveillance Systems y Chess Dynamics (2018), contratos UK MoD*

Datos orientativos del *FLIR R20SS* y *RAVEN 3D* (Microflir, exhibiciones AUSA / Eurosatory, 2022)

*Bundeswehr procurement reports 2022–2023; Diehl Defence*



---

Miguel Sánchez Peñas

## ANEXOS

### ANEXO I

En el siguiente anexo se muestra la entrevista completa realizada al sargento D. Esteban Velázquez Wallraf, experto en radares de la batería Mistral del RACA 93.

El objetivo principal de esta entrevista fue conocer las impresiones que tenía el sargento acerca de los dos sistemas de radar con los que había trabajado de manera directa, el AUDS y el RAVEN, además de escuchar su experiencia operativa, ampliar nuestros conocimientos sobre los sistemas y conocer cuáles eran las principales limitaciones de los sistemas, así como su vista a futuro.

A continuación, se muestran las preguntas en el orden que fueron hechas, seguidas de la respuesta dada por el sargento:

**Para comenzar, ¿podría explicarnos brevemente qué es el sistema AUDS y cuál fue su origen?**

El AUDS es un sistema de defensa antiaérea creado por empresas británicas, que se utilizó por primera vez por el Ejército estadounidense en 2016. Fue el primer sistema acreditado contra RPAS. Puede emplearse tanto en posiciones estáticas para la defensa de puntos críticos como en configuraciones móviles, como sistemas vehiculares, destinados a proteger fuerzas móviles y convoyes.

**¿Qué tipo de amenazas está diseñado para contrarrestar este sistema?**

Está diseñado para operar en entornos donde la amenaza de drones del tipo *Low, Slow, Small* (LSS o EDSS) está presente. Este tipo de aeronaves son especialmente difíciles de detectar mediante sistemas tradicionales como el radar RAVEN 2D.

**¿Podría detallar algunas de las características técnicas más destacadas del AUDS?**

El sistema tiene un alcance aproximado de 10 kilómetros y resulta bastante manejable por parte del operador. Gracias a la integración de elementos complementarios como el SENDEX o el AEROSCOPE, puede ofrecer una alerta temprana eficaz sobre puntos críticos.

**¿Cómo fue su incorporación en las Fuerzas Armadas españolas?**

Cuando el Ejército español decidió adquirir este sistema, estableció en el Regimiento de Artillería Antiaérea nº 71 su centro de formación especializado, con el objetivo de preparar al personal



---

Miguel Sánchez Peñas

para su despliegue en zonas de operaciones.

### **¿En qué escenarios operativos se ha empleado el AUDS hasta ahora?**

Este sistema ha sido desplegado en zonas como Irak, Mali y Afganistán, ya que ofrece una protección constante las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

### **Pasando a otro de los sistemas en uso, ¿qué puede contarnos sobre el radar RAVEN?**

El radar RAVEN es un subsistema de alerta y vigilancia de artillería antiaérea que permite la detección e identificación de aeronaves de baja y muy baja cota. Posee un alcance de unos 20 kilómetros y proporciona información bidimensional, es decir, dirección y distancia del objetivo.

### **¿Qué capacidades tiene frente a la detección de UAS o drones?**

Permite la identificación de drones o UAVs de clase 2 y 3 según la clasificación de la OTAN. La clase 2 incluye drones entre 150 y 600 kg, y la clase 3 aquellos de más de 600 kg. Sin embargo, no está diseñado para amenazas más pequeñas y ligeras, que son las predominantes en los conflictos modernos.

### **¿Cuál es el origen y trayectoria de este radar dentro del Ejército español?**

Es un radar fabricado por una empresa neerlandesa a finales de los años 80, que llegó al Ejército español a principios de los 2000. Actualmente se emplea, por ejemplo, en la Operación Libre Hidalgo en el Líbano, para proteger puntos críticos como el puesto de mando o zonas con poca visibilidad.

### **¿Diría que el RAVEN sigue siendo útil en la guerra moderna?**

Aunque sigue siendo útil para tareas de vigilancia y cobertura en determinadas condiciones, se considera bastante obsoleto para las necesidades de la guerra actual. Hoy en día, los drones más comunes son mucho más pequeños —en ocasiones de menos de 5 kg—, con cargas explosivas y difíciles de detectar por este tipo de radares. El RAVEN solo podría captar “plots” o señales débiles, sin ofrecer información de calidad sobre la amenaza.

### **En ese sentido, ¿cuál sería su valoración sobre la necesidad de renovación tecnológica en este campo?**

Resulta imprescindible actualizar los sistemas de detección para adaptarlos a las amenazas de nueva generación. La incorporación de radares más avanzados y sensores multifrecuencia es clave para garantizar una alerta temprana eficaz frente a UAS y microdrones.



Miguel Sánchez Peñas

## ANEXO II

La siguiente encuesta ha sido realizada para conocer la impresión que tienen los suboficiales de la batería Mistral del RACA 93 acerca de la capacidad y eficacia del radar RAVEN en la lucha contra UAS, especialmente los LSS que tienen pequeño tamaño.

El rango de respuestas abarca de 1 a 5, siendo 1 totalmente en desacuerdo con las afirmaciones hechas y el 5 totalmente de acuerdo con las mismas.

El ámbito de conocimiento del sistema por parte de los encuestados era elevado.

A continuación se muestran por orden las preguntas realizadas, con el porcentaje de respuestas adquirido en cada una de ellas:

El RAVEN detecta drones pequeños (FPV, comerciales) con fiabilidad suficiente.

8 respuestas

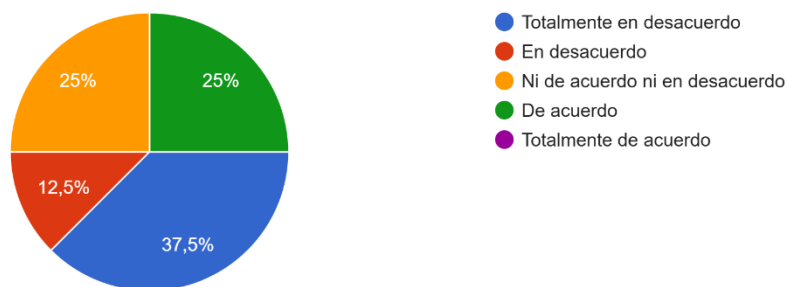


Figura 16: resultados de la pregunta 1 (Fuente: elaboración propia).

Mantiene un seguimiento estable de drones a baja altura y baja firma radar.

8 respuestas

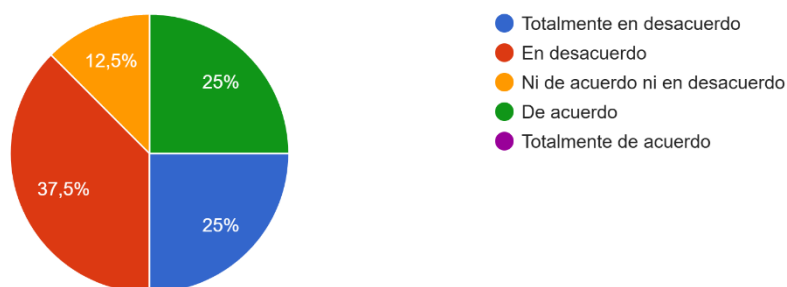


Figura 17: resultados de la pregunta 2 (Fuene: elaboración propia).



Miguel Sánchez Peñas

La cobertura angular del RAVEN es adecuada para operaciones contra UAS.

8 respuestas

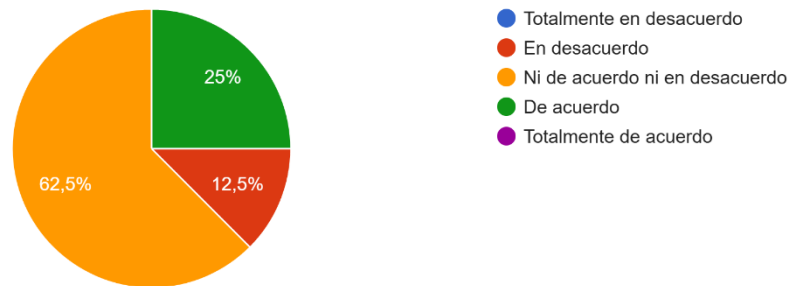


Figura 18: resultados de la pregunta 3 (Fuente: elaboración propia).

El sistema mantiene un rendimiento aceptable en entornos con interferencias electrónicas.

8 respuestas

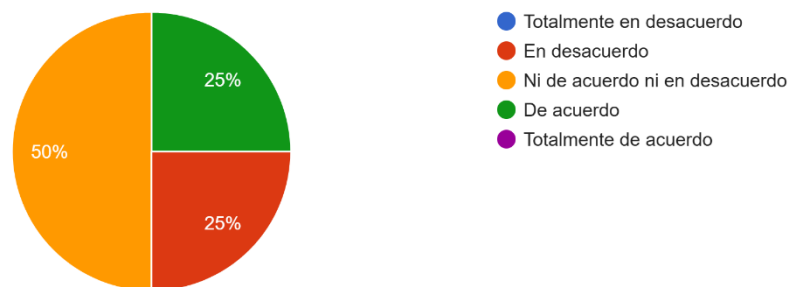


Figura 19: resultados de la pregunta 4 (Fuente: elaboración propia).

El despliegue del RAVEN es rápido y sencillo en condiciones operativas.

8 respuestas

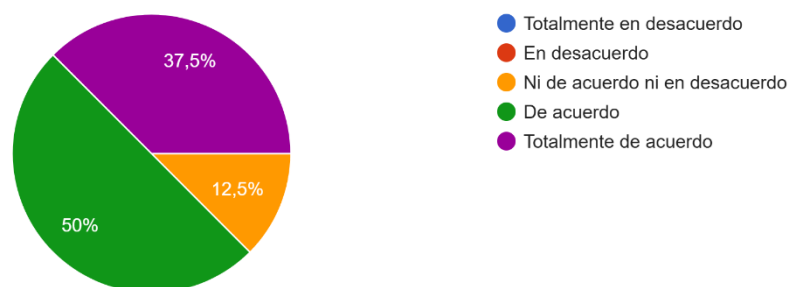


Figura 20: resultados de la pregunta 5 (Fuente: elaboración propia).



Miguel Sánchez Peñas

La movilidad del sistema permite su empleo en distintos escenarios (campo abierto, urbano, infraestructuras críticas).

8 respuestas

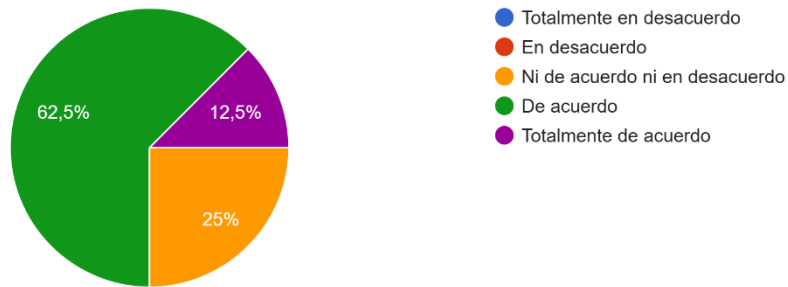


Figura 21: resultados de la pregunta 6 (Fuente: elaboración propia).

La interfaz de usuario es clara e intuitiva para los operadores.

8 respuestas

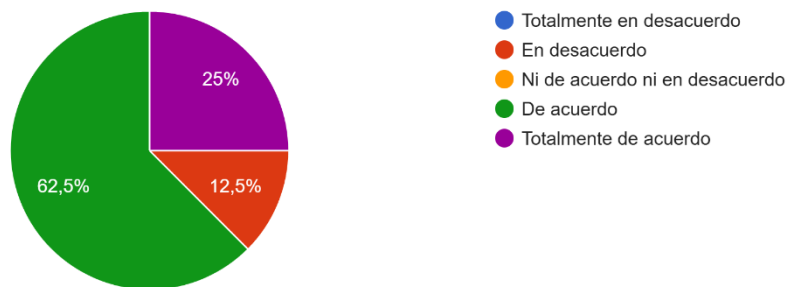


Figura 22: resultados de la pregunta 7 (Fuente: elaboración propia).

Confío en la eficacia global del RAVEN para proteger el área asignada frente a amenazas UAS.

8 respuestas

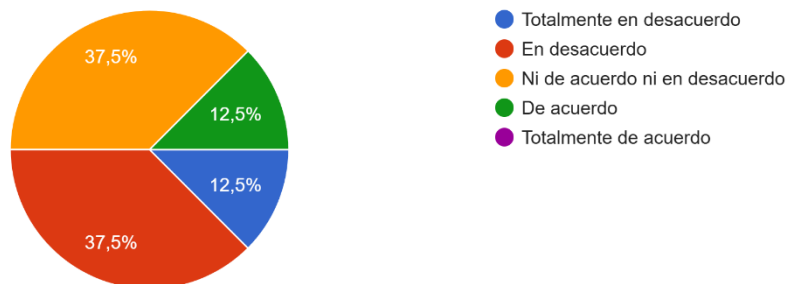


Figura 23: resultados de la pregunta 8 (Fuente: elaboración propia).



Miguel Sánchez Peñas

## ANEXO III

A continuación, se presenta la tabla de comparación por pares entre los cinco criterios elegidos para realizar el estudio. Esta matriz constituye la base del modelo AHP y refleja la relevancia asignada a cada factor.

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	Alcance	48.9%	1
2	Movilidad	9.1%	4
3	Precisión	23.5%	2
4	Integración C2	14.3%	3
5	coste	4.2%	5

Figura 24: importancia de cada criterio (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

De seguido se incluyen las tablas generadas con los resultados de cada subcriterio:

#### Alcance

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	3.3%	6
2	AUDS	3.9%	5
3	IRIS-T SLM Radar	43.4%	1
4	Giraffe 1X	6.9%	4
5	LIDS	17.7%	3
6	Falcon Shield	24.8%	2

Figura 25: importancia de los sistemas según alcance (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)



Miguel Sánchez Peñas

## Movilidad

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	30.7%	2
2	AUDS	17.1%	3
3	IRIS-T SLM Radar	4.3%	5
4	Giraffe 1X	36.8%	1
5	LIDS	7.6%	4
6	Falcon Shield	3.5%	6

Figura 26: importancia de los sistemas según movilidad (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

## Precisión

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	2.7%	6
2	AUDS	6.0%	5
3	IRIS-T SLM Radar	20.5%	3
4	Giraffe 1X	20.3%	4
5	LIDS	27.4%	1
6	Falcon Shield	23.1%	2

Figura 27: importancia de los sistemas según precisión (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)



Miguel Sánchez Peñas

## Integración

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	2.5%	6
2	AUDS	5.4%	5
3	IRIS-T SLM Radar	22.2%	3
4	Giraffe 1X	8.9%	4
5	LIDS	30.9%	1
6	Falcon Shield	30.1%	2

Figura 28: importancia de los sistemas según integración (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

## Coste

### Prioridades resultantes

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	51.0%	1
2	AUDS	24.1%	2
3	IRIS-T SLM Radar	3.5%	6
4	Giraffe 1X	11.9%	3
5	LIDS	5.8%	4
6	Falcon Shield	3.7%	5

Figura 29: importancia de los sistemas según coste (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

Estos resultados individuales son esenciales para comprender cómo cada criterio influye en el resultado final.

A continuación, se muestra la jerarquía completa obtenida, con todas las ponderaciones aplicadas y los pesos globales de cada radar.



Miguel Sánchez Peñas

Este cuadro evidencia que los valores de cada criterio se combinan para producir la prioridad total de cada sistema. Además, hemos de tener en cuenta que la coherencia de los resultados confirma la consistencia del modelo ya que tiene un ratio de consistencia de  $< 0,1$ .

Jerarquía con alternativas										
No	Node	Criterio	Glb Prio.	Compara r	RAVEN	AUDS	IRIS-T SLM Radar	Giraffe 1X	LIDS	Falcon Shield
1.	AHP-comparación	Alcance	48.9%	AHP	0.033	0.039	0.434	0.069	0.177	0.248
2.		Movilidad	9.1%	AHP	0.307	0.171	0.043	0.368	0.076	0.035
3.		Precisión	23.5%	AHP	0.027	0.060	0.205	0.203	0.274	0.231
4.		Integración C2	14.3%	AHP	0.025	0.054	0.222	0.089	0.309	0.301
5.		coste	4.2%	AHP	0.510	0.241	0.035	0.119	0.058	0.037
Peso total de alternativas:					0.076	0.067	0.297	0.133	0.205	0.223
Se completan todas las evaluaciones.										

Figura 30: Porcentaje de peso de cada subcriterio (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

La siguiente gráfica de barras resume visualmente las prioridades finales, en donde el IRIS-T alcanza un 29.7 %, seguido del Falcon Shield (22.3 %) y el LIDS (20.5 %). Esta gráfica facilita la interpretación inmediata de los resultados y la comparación entre los sistemas.

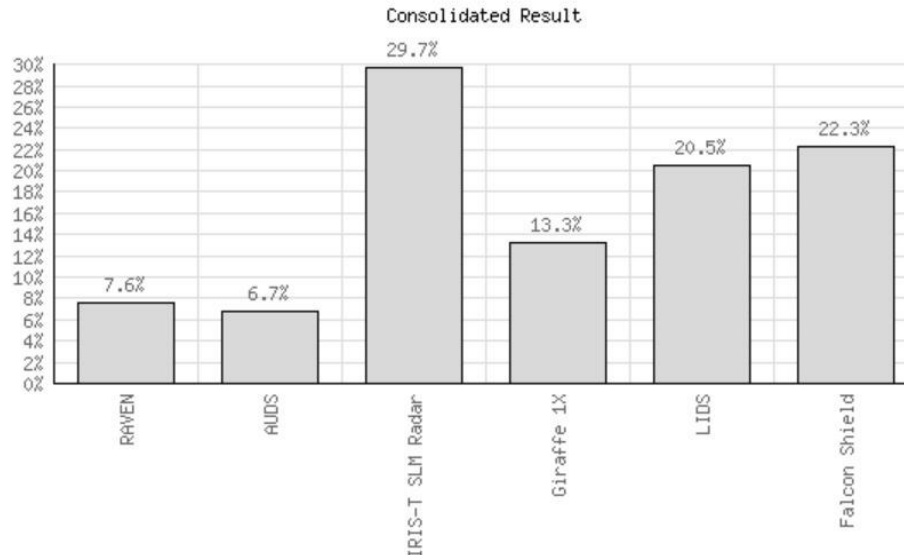


Figura 31: representación gráfica del resultado (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)

Finalmente se recogen los valores de prioridad y el orden jerárquico resultante del proceso AHP. Este documento constituye la síntesis numérica final y sirve como punto de inicio para las conclusiones operativas extraídas del estudio.



---

Miguel Sánchez Peñas

Cat		Prioridad	Rank
1	RAVEN	7.6%	5
2	AUDS	6.7%	6
3	IRIS-T SLM Radar	29.7%	1
4	Giraffe 1X	13.3%	4
5	LIDS	20.5%	3
6	Falcon Shield	22.3%	2

Figura 32: prioridad final de los sistemas (Fuente: elaboración propia a partir de AHP-OS)