

Trabajo Fin de Grado

Sistema Hawk. Análisis de la capacidad de los radares para detectar amenazas low radar cross section.

Autor

Blas Escudero Martín

Director/es

Director académico: D. Francisco Javier Luzón Marco

Director militar: CAP. D. Jaime García Guerrero.

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022-2023



Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a todo el personal del Grupo de Artillería Antiaérea II/74, por las facilidades en todos los aspectos que hemos recibido los Alféreces de prácticas y la estupenda acogida que hemos recibido por parte de toda la unidad, gracias a su mando, el Teniente Coronel D. José María Contreras Merino.

En segundo lugar, me gustaría reconocer el gran apoyo que he obtenido por parte de mi tutor militar accidental y POC de las prácticas, el Capitán D. Jaime García Guerrero, parte fundamental para la estructuración, búsqueda de información, contactos y desarrollo del trabajo que nos atañe. Con su ayuda todo ha sido mucho más sencillo.

De la misma manera y especialmente, quiero agradecer a la 4ª Batería del GAAA II/74, por la gran labor que realizan a diario, por haberme acogido como a uno más de la batería desde el primer día y por haber estado siempre disponibles para todo lo necesario. Especial mención a mi Teniente D. Manuel Francisco Diéguez López, por su gran tutorización individual, Subtenientes de la sección de mantenimiento, Suboficiales jefes de aparatos y a todo el personal de tropa de la batería ya que, sin su ayuda, este trabajo no hubiera salido adelante, y lo más importante, no me hubiera llevado tan grata experiencia y conocimientos del sistema HAWK y de la unidad.

No con menos importancia, me gustaría agradecer al resto del personal de otras baterías del grupo que, agregados a la 4ª batería para la realización de las jornadas de instrucción y maniobras, han supuesto un apoyo también fundamental para la vida diaria y para la adquisición de conocimientos, especial mención al Teniente D. Jesús Valero Gutiérrez.

Finalmente, no por ello menos importantes, agradecer a toda mi familia por el apoyo incansable y constante sacrificio y comprensión durante todos los años que suponen la consecución de este hito en mi carrera profesional de egresar Teniente del Ejército de Tierra, así como los años previos de preparación y estudio para conseguir esta meta. También mencionar a mis amigos y compañeros de carrera, gracias a ellos todo es mucho más sencillo y cómodo de conseguir.



RESUMEN

Los sistemas de armas de artillería antiaérea se están erigiendo como sistemas de defensa fundamentales para el desarrollo de un conflicto bélico, como se está reflejando en el conflicto que atañe actualmente a Rusia y Ucrania. En función de las capacidades de estos sistemas, se pueden obtener una gran ventaja táctica en el desarrollo del combate y la defensa, por lo tanto, el disponer de este tipo de sistemas con características de tecnología punteras es una de las constantes preocupaciones de los ejércitos mundiales.

Durante la realización de este trabajo, se analizan las capacidades de uno de nuestros sistemas de artillería antiaérea más antiguos todavía en dotación, el sistema HAWK, adquirido en los años 60 por parte de nuestro ejército. Mas concretamente, el trabajo se centra en estudiar las capacidades de este sistema en la detección de aeronaves de baja sección recta radar (Radar Cross Section, RCS), dato en la mayoría de las ocasiones muy difícil de calcular debido a la gran cantidad de variables que afectan a su cálculo, y de carácter confidencial debido a su gran importancia para la detección y la superioridad táctica que supondría su conocimiento.

Por lo tanto, para el análisis de estas capacidades, al no disponer de muchos datos técnicos por lo expuesto, se basa el estudio en las experiencias prácticas obtenidas durante la realización de distintas jornadas de instrucción por mi parte, y de maniobras de tiro de entrenamiento realizadas por el RAAA 74 a lo largo de los años. Obtenidas estas experiencias y las carencias del sistema expuestas por mandos y operadores durante una entrevista grupal, se realiza un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) en el que se exponen las limitaciones principales del sistema, llegando a la conclusión de que se deben mejorar sus capacidades en el ámbito de la RC, debido a la antigüedad del sistema y al avance tecnológico de las aeronaves y misiles actuales en este ámbito.

Obtenidas las conclusiones de necesidad de mejora del sistema, se exponen y explican alternativas tanto de implementos para el sistema actual, como pueden ser medidores de RCS o sistemas Anti-dron del ejército, así como para la sustitución de los radares de los que dispone el sistema HAWK por otro de los radares en dotación actualmente en el ET en otros sistemas de armas, como pueden ser el PATRIOT o el NASAMS. Para lo segundo, se utilizan las herramientas RADAR CHART y el método AHP para obtener la mejor de las alternativas posibles dentro de nuestra dotación para sustituir los radares HAWK.

Finalmente, tras el estudio anterior, y llegar a la conclusión de que la mejor solución es sustituir los radares actuales del sistema, tanto en el RADAR CHART como en el método AHP se llega a la conclusión de que sustituyendo los radares actuales del sistema HAWK por el radar del sistema de armas PATRIOT, se dotaría el sistema de una mejora sustancial en cuanto a capacidades de detección de sistemas con baja RCS, y la implementación de este, basándose en temas de personal, mantenimiento y logística, sería relativamente sencilla.

PALABRAS CLAVE

SISTEMA HAWK, RADAR, DETECCIÓN, SECCION RECTA RADAR



ABSTRACT

Anti-aircraft artillery weapon systems are emerging as fundamental defense systems for the development of a warlike conflict, as is being shown in the conflict that currently concerns Russia and Ukraine. Depending on the capabilities of these systems, a great tactical advantage can be obtained in the development of combat and defense, therefore, having this type of system with cutting-edge technology characteristics is one of the constant concerns of the global armies.

During the realization of this work, the capabilities of one of our oldest anti-aircraft artillery systems still in use, the HAWK system, acquired in the 60s by our army, are analyzed. More specifically, the work focuses on studying the capabilities of this system in the detection of aircraft with a low radar cross section (RCS), a fact that is in most cases very difficult to calculate due to the large number of variables that affect its calculation, and its confidential nature due to its great importance for detection and the tactical superiority that its knowledge would imply.

Therefore, for the analysis of these capabilities, as there is not much technical data available due to the above, the study is based on the practical experiences obtained during the performance of different training sessions on my part, and training shooting maneuvers carried out by the RAAA 74 over the years. Having obtained these experiences and the shortcomings of the system exposed by army commands and operators during a group interview, a SWOT analysis (Weaknesses, Threats, Strengths and Opportunities) is carried out in which the main limitations of the system are exposed, reaching the conclusion that we must improve their capabilities in the field of RCS, due to the age of the system and the technological progress of current aircraft and missiles in this field.

Obtained the conclusions of the need to improve the system, alternatives are exposed and explained both for implements for the current system, such as RCS meters or Army Anti-drone systems, as well as for the replacement of the radars available to the HAWK system by another of the radars currently provided in the ET in other weapons systems, such as PATRIOT or NASAMS. For the second, the RADAR CHART tools and the AHP method are used to obtain the best of the possible alternatives within our endowment to replace the HAWK radars.

Finally, after the previous study, and reaching the conclusion that the best solution is to replace the current radars of the system, both in the RADAR CHART and in the AHP method, it is concluded that replacing the current radars of the HAWK system with the radar of the PATRIOT weapon system, the system would be provided with a substantial improvement in terms of detection capabilities for systems with low RCS, and its implementation, based on personnel, maintenance and logistics issues, would be relatively simple.

KEYWORDS

HAWK SYSTEM, RADAR, DETECTION, RADAR CROSS SECTION



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	4
2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE	4
2.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA	4
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA HAWK	6
3.2. SECCIÓN RECTA RADAR.....	8
3.2.1. OBTENCIÓN DE LA SECCIÓN RECTA RADAR	8
3.2.2. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE LA RCS.....	11
3.2.3. EJEMPLOS DE RCS	12
3.3. SISTEMAS DE MEDIDA DE RCS DISPONIBLES EN LAS FUERZAS ARMADAS. ...	13
3.3.1. SISTEMAS DE MEDIDA DE RCS.....	13
3.3.2. RADARES	14
3.3.3. OTROS SISTEMAS ESPECIFICOS PARA DETECCION DE UAVs.	17
4. ANÁLISIS DEL SISTEMA HAWK.....	22
4.1. ENTREVISTAS.	22
4.2. EXPERIENCIAS OBTENIDAS.	23
4.2.1. BLANCOS AÉREOS.....	23
4.2.2. CAZAS EUROFIGHTER.	26
4.3. ANÁLISIS DAFO SISTEMA HAWK	28
5. POSIBLES IMPLEMENTACIONES AL SISTEMA HAWK.	30
5.1.1. MEDIDORES DE RCS.	30
5.1.2. OTROS SISTEMAS.....	30
6. ALTERNATIVAS PARA MEJORA DEL SISTEMA	31
6.1.1. RADAR CHART	33



6.1.2. MÉTODO AHP (ANALYTIC HIERACHY PROCESS)	34
7. CONCLUSIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
ANEXO I BLANCOS AÉREOS	44
ANEXO II MÉTODO AHP	47



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema Identificación aeronave por parte de un radar. Fuente: [4]	2
Figura 2. Elementos Batería Hawk en despliegue. Fuente: Curso Operador Hawk.[9].....	6
Figura 3. Radar PAR. Fuente: Elaboración propia.....	7
Figura 4. Radar CWAR. Fuente: Elaboración propia.	7
Figura 5. Radar HIPIR. Fuente: Elaboración propia.	8
Figura 6. Diagrama radial RCS de un caza. Fuente: [11]	9
Figura 7. Calculo computacional de RCS de objetos simples. Fuente: [10]	9
Figura 8. Medidor de RCS VNA Máster. Fuente: [12].....	10
Figura 9. RCS de distintos objetos medidos con Radar de imagen. Fuente: [12].....	10
Figura 10. Sistema SGSE-9 del INTA. Fuente: [13].....	10
Figura 11. Gráfico reducción de RCS usando materiales RAM. Fuente: [15]	11
Figura 12. Radar RAC-3D. Fuente: [17].....	14
Figura 13. Radar AN/MPQ-63 SENTINEL. Fuente: [18].....	15
Figura 14. Radar AN/MPQ-53 PATRIOT. Fuente: [19].....	15
Figura 15. Radar RAVEN. Fuente: [20].....	16
Figura 16. Dirección de tiro SKYDOR. Fuente: [21].....	17
Figura 17. Subsistemas del sistema CERVUS. Fuente: [22].....	18
Figura 18. Maletín DJI AEROSCOPE. Fuente: [24].....	20
Figura 19. AUDS BLIGHTER. Fuente: [25].....	21
Figura 20. Tabla comparativa blancos aéreos. Fuente: Elaboración propia adaptación de [27] 23	
Figura 21. Campo de tiro de Médano del Loro. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps.....	24
Figura 22. Matriz DAFO. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 23. Radar Chart. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 24. Esquema Relaciones AHP. Fuente: Elaboración propia a partir de [32].....	35
Figura 25. Escala Saaty. Fuente: [7]	35



Figura 26. Modelo Scrab III. Fuente: www.scrdrones.com	44
Figura 27. Blanco Aéreo ALBA. Fuente: [27]	45
Figura 28. Blanco aéreo Banshee. Fuente: [33]	46
Figura 29. Etapa 2, evaluación de criterios. Fuente: Software AHP.....	47
Figura 30. Etapa 3. Evaluación de alternativas. Fuente: Software AHP.....	48
Figura 31. Etapa 4: Jerarquización de las alternativas. Fuente: Software AHP.	48



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evolución y comparativa de RCS. Fuente: Elaboración propia a partir de [5].....	3
Tabla 2. RCS de distintos objetos. Fuente: Elaboración propia a partir de [5].	12
Tabla 3. Características DJI AEROSCOPE. Fuente: Elaboración propia a partir de [24]	19
Tabla 4. Características AUDS BLIGHTER. Fuente: Elaboración propia a partir de [25]	21
Tabla 5. Vuelos y resultados para los modelos de blancos aéreos. Fuente: Elaboración propia.	25
Tabla 6. Características principales Eurofighter Typhoon. Fuente: Elaboración propia a partir de [28].....	26
Tabla 7. Pasadas aéreas y resultados. Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 8. Tabla de criterios tenidos en cuenta y valores de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia a partir de [2], [18], [19], [29]–[31].	32
Tabla 9. Tabla pareada Criterios. Fuente: Elaboración propia.	36
Tabla 10. Tabla de relación de pesos y R.I. Fuente: Elaboración propia.	36
Tabla 11. Tablas pareadas Alternativas/ Criterio. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 12. Tablas pareadas Alternativas/ Criterio. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 13. Tabla de jerarquización de alternativas. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 14. Especificaciones técnicas Scrab III. Fuente: [27]	44
Tabla 15. Especificaciones técnicas ALBA. Fuente: [27].....	45
Tabla 16. Especificaciones técnicas modelo Banshee. Fuente: [33].....	46
Tabla 17. Etapa 1. Comparativa de peso de los criterios. Fuente: Elaboración propia.	47



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.

AAA	<i>Artillería Antiaérea</i>
ABT	<i>Amenaza aérea convencional de última generación (Air breathing Threat)</i>
ADS	<i>Sistema de Defensa Aérea (Air Defence System)</i>
AHP	<i>Analytic Hierachy Process</i>
BCP	<i>Puesto de Mando de Batería (Battery Command Post)</i>
C-RAM	<i>Counter Rocket, Artillery and Mortar</i>
COAAAS	<i>Centro de Operaciones de Artillería Antiaérea Semiautomático. Existe en la versión ligera (COAAAS-L) y media (COAAAS-M) diferenciándose en la cantidad de sistemas de armas y radares a integrar.</i>
CWAR	<i>Radar de Adquisición de Onda Continua (Continuous Wave Acquisition Radar)</i>
DA	<i>Defensa Aérea</i>
DAFO	<i>Debilidades Amenazas Fortalezas y Oportunidades</i>
DGAM	<i>Dirección General de Armamento y Material</i>
DIAR	<i>Demostrador Instrumental en Alta Resolución</i>
EA	<i>Ejército del Aire</i>
ECM	<i>Contramedidas Electrónicas (Electronic Counter Measures)</i>
EE.UU	<i>Estados Unidos de América (United States of America)</i>
ET	<i>Ejército de Tierra</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HAWK	<i>Homing All the Way Killer</i>
HIPIR	<i>Radar Iluminador de Alta Potencia (High Power)</i>



	<i>Illuminator Radar)</i>
IFF	<i>Identificador amigo-enemigo (Identification Friend or Foe)</i>
INTA	<i>Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.</i>
LASHED	<i>Low Altitude Simultaneous HAWK Engagement</i>
NASAMS	<i>Sistema Misil Superficie Aire Avanzado Noruego (Norwegian Advanced Surface to Air Missile System)</i>
OTAN	<i>Organización del Tratado Atlántico Norte (North Atlantic Treaty Organization, NATO)</i>
PAR	<i>Radar de Adquisición de Pulsos (Pulse Acquisition Radar)</i>
PATRIOT	<i>Phased Array Tracking to Intercept of Targets</i>
RAAA	<i>Regimiento de Artillería Antiaérea</i>
RAM	<i>Radar Absorbing Materials</i>
RCS	<i>Sección recta radar o firma radar.</i>
RPAS	<i>Sistema Aéreo Controlado de Forma Remota (Remotely Piloted Aircraft System)</i>
SAM	<i>Misiles tierra-aire (Surface-Air Missile)</i>
SCR	<i>Sistemas de Control Remoto S.A: Empresa española productora de sistemas aéreos no pilotados.</i>
SHORAD	<i>Defensa Aérea de Corto Alcance (Short Range Air Defence)</i>
TBM	<i>Misil Táctico Balístico (Tactical Ballistic Missile)</i>
UAV	<i>Vehículo Aéreo no Tripulado (Unmanned Aerial Vehicle)</i>



1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de la defensa aérea del territorio nacional y aumentar las capacidades operativas del Ejército de Tierra (ET), en 1965 se adquirió el sistema SAM (Surface-Air Missile, misil tierra-aire) HAWK (Homing All the Way Killer), primer sistema de tales características del ET[1]. Se adquirieron en aquel año doce lanzadores originales a EE.UU (Estados Unidos de América), para posteriormente, en una segunda tanda de adquisición en 1990, adquirir otra docena de lanzadores de segunda mano también a EE.UU. Actualmente todo el sistema HAWK se encuentran en servicio bajo el Mando de Artillería Antiaérea (MAAA), donde se encuadra el Regimiento de Artillería Antiaérea N.º 74 (RAAA 74).

El sistema HAWK [2] es un sistema antiaéreo de media altura SHORAD (Short Range Air Defense) comercializado por la empresa estadounidense Raytheon¹ con un alcance de unos 40km y un techo de 18km, por lo que se considera de medio-largo alcance, para dar cobertura a media, baja y muy baja cota². Dispone de una capacidad de combate que le permite hacer frente a aeronaves convencionales de tipo ala fija y ala rotatoria ABT (Air Breifing Threat). Sus principales capacidades son detectar, identificar, seguir y destruir objetivos a baja y media altura. Dispone además de la capacidad de realizar fuego en todas direcciones sin necesidad de modificar el despliegue, entrando en posición de fuego en unos 15 minutos aproximadamente. El sistema HAWK está compuesto por distintos elementos que le permiten desarrollar el combate de forma aislada si fuera el caso, estos componentes son:

- Puesto de mando BCP (Battery Command Post).
- Radares de búsqueda PAR (Pulse Acquisition Radar) y CWAR (Continuous Wave Acquisition Radar). Al disponer de dos y de distinta forma de trabajo, hace al sistema menos vulnerable a las ECM (Electronic Counter Measures) de las aeronaves enemigas.
- Radares de seguimiento HIPIR (High Power Illuminator Radar).
- Lanzadores con capacidad de 3 misiles MIM-23 cada uno.

En relación a las capacidades de detección de amenazas que dispone el sistema HAWK, uno de los conceptos y variables más importantes es la RCS (Radar Cross Section) o sección recta radar. La sección recta radar (RCS), también denominada firma radar o sección transversal del radar [3] es un parámetro de campo lejano³ medido en metros cuadrados (m^2) o decibelios (dB) que define cómo de detectable es un objeto para un radar, en función de las propiedades de reflexión de este.

¹ Raytheon Company: Empresa de defensa militar estadounidense creada en 1922 que comercializa material militar a nivel internacional.

² Clasificación en función de la altura máxima posible del sistema de armas. Baja-muy baja cota se considera a entre 0 y 3km.

³ Campo lejano [34]: Los campos electromagnéticos alrededor de la antena o aparato radiante se definen como campo lejano o cercano en función de la distancia al generador de ondas en términos de longitud de onda. El campo cercano es el más próximo al generador, donde la onda es predominantemente eléctrica o magnética, mientras que, en el campo lejano, más alejado del generador, la onda predominante es la eléctrica.



Se podría decir que es el área del objeto que es captada mediante el receptor radar, al ser reflejada por el objeto la radiación emitida inicialmente por el radar, por lo que en realidad mide la potencia equivalente de la onda incidente interceptada o absorbida por el propio objeto, como se puede ver en la figura 1. Esta área no tiene por qué coincidir con el área propia física del objeto, ya que depende de infinidad de parámetros como pueden ser:

- **Tipo de material del blanco.** Existen materiales absorbentes como los denominados RAM⁴ (Radar Absorbing Materials)[4] que reducen considerablemente la RCS de cualquier objeto.
- **Forma.** Las superficies perpendiculares a la onda incidente afectan a la onda reflejada y por tanto a la RCS.
- **Frecuencia de trabajo del radar.**
- **La dirección de la iluminación.** El ángulo de incidencia de la onda emitida por el radar en el blanco, así como el ángulo de la superficie iluminada, influye en la RCS.

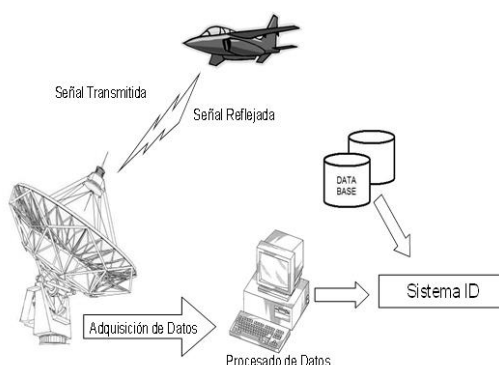


Figura 1. Esquema Identificación aeronave por parte de un radar. Fuente: [4]

Debido al avance tecnológico, así como un especial interés operativo por parte de todos los ejércitos del mundo por ocultar y tratar que sus aeronaves, misiles y drones sean lo menos detectables posible para radares enemigos, se ha conseguido reducir la RCS de estos hasta unos niveles del orden de 1000 veces menor a los valores iniciales de hace unos años (ver Tabla 1). De hecho, en la actualidad existen distintos métodos para reducir la RCS como son la utilización de materiales RAM antes nombrados o de pinturas que absorben la radiación electromagnética recibida.

⁴ Materiales RAM (Radar Absorbing Materials)[4]: Materiales que permiten camuflar blancos, ya que absorben las ondas electromagnéticas emitidas por el radar, de tal forma que éstas no son reflejadas por el blanco y permiten que el radar no las detecte. Algunos ejemplos de estos materiales son la espuma de poliuretano con partículas de carbono o siliconas, uretanos con partículas de hierro, pinturas con aleaciones de metal o materiales con pequeños circuitos que absorben la energía incidente.



OBJETO	RCS [m^2]
<i>Caza F-4 Phantom (año 1958)</i>	<i>100</i>
<i>Pájaro</i>	<i>0.01</i>
<i>Avión de combate F-117 Nighthawk (1983)</i>	<i>0.003</i>

Tabla 1. Evolución y comparativa de RCS. Fuente: Elaboración propia a partir de [5]

Respecto al sistema HAWK y su capacidad de detección de RCS se debe tener en cuenta que el sistema originariamente se creó en una época en la que el avance en tecnología y reducción de RCS no era una preocupación por parte de los fabricantes armamentísticos y de aeronaves. Por ello, aunque el sistema ha ido recibiendo a lo largo de los años distintos programas de mejora, al no estar fabricado con el fin y las características que nos atañen, las capacidades del sistema para la detección de RCS no han sido mejoradas sustancialmente. En la ficha técnica del sistema Hawk [2] se detalla que este es capaz de detectar una RCS de $2,4m^2$ a 60km de distancia con el radar CWAR, y a 89,6km con el radar PAR. Comparando estos valores con los catos de RCS de la tabla 1 se detecta claramente una carencia en el sistema HAWK en el nivel de detección de aeronaves con baja RCS.

Como se verá en más detalle en el siguiente apartado de objetivos, el presente trabajo parte de esta esperable dificultad del sistema HAWK para detectar aeronaves de baja RCS, realizando un análisis las capacidades del sistema HAWK y en caso necesario, buscar soluciones para poder dar respuesta por parte del sistema HAWK a las amenazas de baja RCS.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este trabajo es analizar las capacidades del sistema HAWK respecto a la detección de aeronaves con baja RCS, y en el caso en el que se observaran deficiencias, buscar sistemas para implementar y mejorar sus capacidades o proponer la sustitución, llegado al caso, de alguno de sus radares de búsqueda. Para ello se procederá a estructurar el trabajo teniendo en cuenta los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar las capacidades y deficiencias del sistema HAWK, en particular para la detección de aeronaves con baja RCS.
- Buscar posibles implementos al sistema que mejoren sus capacidades sin sustituir ninguno de los elementos que lo componen y estudiar su viabilidad.
- Estudiar la viabilidad de sustituir los radares de búsqueda del sistema HAWK por otro radar de los ya disponibles en otros sistemas de armas del ET, comparando los distintos radares entre ellos y con el radar del sistema HAWK para obtener un resultado de si fuese beneficioso la sustitución de este para mejorar sus capacidades.

La realización del trabajo se fundamentará en el estudio técnico y operativo de despliegue de los radares del sistema HAWK, así como de los radares de otros sistemas de armas disponibles en el ET. El estudio económico de las alternativas no se puede abordar debido a la poca información encontrada al respecto por su confidencialidad.

De la infinidad de radares existentes en el mercado, el estudio sobre las alternativas de sustitución del radar HAWK por otro radar se centrará únicamente en los radares ya instaurados en el ET, debido a que el estudio previo en cuanto a su viabilidad al que se sometió a dichos radares en el momento de su adquisición, se supone motivo de peso suficiente como para considerarlos como las mejores opciones de las que se dispone actualmente, ya que sería más sencillo su implementación en cuanto a personal, logística y mantenimiento.

2.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA

Para facilitar la comprensión del trabajo, en este punto se van a exponer tanto la estructuración global del mismo como las distintas metodologías que se han aplicado para obtener la información y resultados reflejados en los apartados posteriores.

En el primer apartado del trabajo, la introducción, se han expuesto tanto las características principales del sistema HAWK como sus elementos más importantes, la definición de sección recta radar y los parámetros que afectan a su valor y cálculo. Posteriormente, en el apartado 2.1, se han detallado los objetivos que se plantean conseguir durante la realización del trabajo, así como el alcance del mismo.

En el apartado 3, de antecedentes y marco teórico, se profundizará en los elementos que componen el sistema HAWK, detallando las características más importantes de los mismos, así como en los distintos métodos de cálculo y aparatos para la obtención del valor de la sección recta radar y las distintas técnicas que existen en la actualidad para reducir su valor y complicar así la detección de los sistemas de armas. Además, se expondrá una tabla comparativa a modo ilustrativo, de cómo han ido evolucionando las aeronaves y sistemas de armas en el ámbito de la reducción de la sección recta radar.



En el apartado 4, se realizará el análisis de las capacidades del sistema HAWK con respecto a la detección de aeronaves con baja RCS. Para la realización del análisis de las capacidades del sistema, se tendrán en cuenta las siguientes partes:

- Se partirá del estudio de las características técnicas del propio sistema HAWK en base a los manuales del sistema.
- Se expondrá el resultado de las experiencias obtenidas durante la realización del ejercicio de tiro de instrucción en el año 2020 por parte del RAAA 74 en base al informe final del ejercicio, así como los resultados reales obtenidos por mi parte en la jornada de instrucción continuada en colaboración con el EA en la base aérea de Morón de la Frontera.
- Se realizará un análisis DAFO (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades) con la realización de una entrevista grupal con mandos y operadores del RAAA 74.

En el apartado 5, tras haber analizado las limitaciones y deficiencias del sistema, se analizarán posibles implementaciones de aparatos de medida RCS, detección de UAS y otros sistemas que pudieran incrementar las capacidades actuales del sistema y dotarlo de un mayor nivel de operatividad y detección.

A continuación de esto, en el apartado 6, se analizarán posibles radares candidatos ya disponibles en el ET para sustituir los radares de detección del sistema HAWK. De los posibles candidatos se estudiarán sus características técnicas y tiempo de despliegue para, posteriormente, utilizando dos herramientas de análisis y selección multicriterio, RADAR CHART[6] y método AHP[7] (Analytic Hierachy Process), obtener el mejor radar candidato. Con ambas herramientas se obtiene de una forma objetiva la mejor alternativa posible, si existe, a los radares del sistema HAWK. El método AHP se realizará mediante la utilización de la herramienta software[8] desarrollada por la Academia Logística del ET proporcionada por el Teniente Coronel del arma de caballería D. Carlos Ruiz López para estudiar este método.

Finalmente, en el apartado 7, se expondrán las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo, teniendo en cuenta todo el estudio realizado y la experiencia a pie de campo obtenida durante la realización del periodo de prácticas en la unidad RAAA 74.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA HAWK

En un despliegue de batería al uso, los equipos que componen el sistema serían los que se representan en la Figura 2.

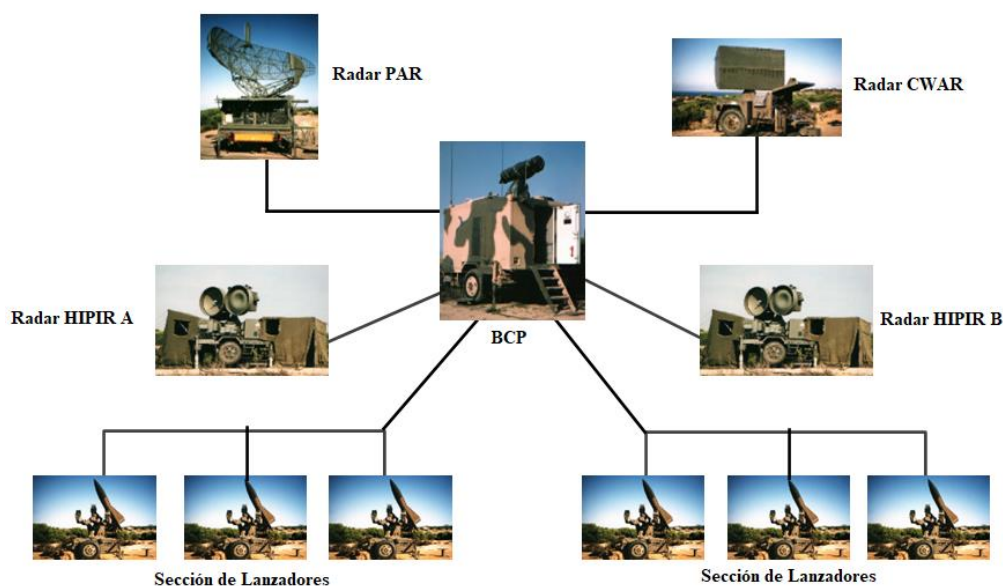


Figura 2. Elementos Batería Hawk en despliegue. Fuente: Curso Operador Hawk.[9]

A continuación, se procede a detallar las características y funciones de aquellos elementos que componen un despliegue de batería y que son relevantes para la comprensión de este TFG.

- **BCP (Battery Command Post):** Puesto de mando y combate que contiene todos los controles e indicadores para el control táctico de la batería y donde se recoge toda la información procedente de los radares de la batería, así como la de los radares de escalón superior⁵. Además, en ella se generan las ordenes de fuego, el cálculo de predicción de punto futuro de las aeronaves objetivo, y el control remoto tanto de los lanzadores de misiles como de los diferentes radares.

Desde la BCP se gestionan las comunicaciones internas y externas a la batería y se ubica en el techo el identificador amigo-enemigo (IFF- Identification Friend or Foe) con el que se le capacita a identificar las aeronaves como enemigas o amigas a una distancia de 370km.

⁵ Se denomina escalón superior en este caso a los equipos del COAAS-M, de entidad Grupo.



El sistema dispone de tres tipos de radares:

- **PAR (Pulse Acquisition Radar)** (Figura 3): Radar de adquisición por impulsos con un alcance de 100km y se utiliza para la adquisición de objetivos a media altura⁶. Proporciona datos de azimut, distancia y velocidad de las aeronaves.



Figura 3. Radar PAR. Fuente: Elaboración propia.

- **CWAR (Continuous Wave Acquisition Radar)** (Figura 4): Radar de adquisición de onda continua a baja y muy baja cota con un alcance de 80km. Proporciona datos de azimut, distancia y velocidad de las aeronaves.



Figura 4. Radar CWAR. Fuente: Elaboración propia.

- **HIPIR (High Power Illuminator Radar)** (Figura 5): Radar de seguimiento y tiro que se emplea a muy baja, baja y media altura y con un alcance de 90km. Dispone de capacidad de seguimiento óptico a través de una cámara, caso en el cual funcionaría en modo pasivo⁷. Proporciona datos precisos sobre el blanco que se fija para su seguimiento. Proporciona un dato aproximado de altura del objetivo, así como la predicción de punto futuro del objetivo.

⁶ Se considera media altura a una altura sobre el suelo de entre 3 y 18 kilómetros.

⁷ Se refiere a un modo de seguimiento en el que no se emite radiación radar, por lo tanto, no es perceptible por ninguna aeronave.



Figura 5. Radar HIPIR. Fuente: Elaboración propia.

3.2. SECCIÓN RECTA RADAR.

En este apartado se detallarán los distintos métodos existentes para determinar la sección recta radar tanto de una forma teórica como con distintos aparatos de medición existentes en el mercado y en las Fuerzas Armadas.

3.2.1. OBTENCIÓN DE LA SECCIÓN RECTA RADAR

- CÁLCULO TEÓRICO

El método teórico de cálculo teórico de la RCS se realiza mediante la aplicación de ecuaciones como la que se exponen a continuación (Ecuación 1) obtenidas de [10], en la que podemos observar que la RCS es un valor que se obtiene al hacer el límite de la función que tiene en cuenta el área de superficie de una esfera multiplicado por el cociente de las densidades de potencia de emisión radar que inciden y se reflejan sobre el objetivo:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_s}{S_i} \quad (1)$$

Donde:

- r : distancia entre el objeto y el radar.
- S_s : Densidad de potencia reflejada medida en el radar.
- S_i : Densidad de potencia incidente medida en el objeto.

Aplicando la anterior ecuación (1), el valor de RCS se mide en metros cuadrados y se aproxima el valor de la RCS del objeto al valor que tendría el eco (reflexión de la onda radar) de una esfera perfecta de metal de sección transversal igual al valor obtenido de RCS. El valor gráfico radial de la RCS de las distintas zonas de un caza se puede visualizar en la figura 6.

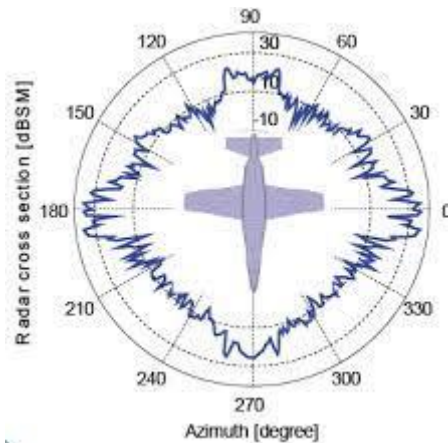


Figura 6. Diagrama radial RCS de un caza. Fuente: [11]

• CÁLCULO PRÁCTICO

El cálculo de la sección recta radar se puede realizar de forma práctica con la utilización de distintos métodos y aparatos [12] que se enumeran a continuación.

- **Cálculo computacional.** La sección recta radar se puede calcular solo para objetos simples, en los que se realiza una ratio de las dimensiones estructurales y de la longitud de onda del radar para determinar la RCS de estos, representados en la figura 7.

<p>SPHERE</p> $\sigma_{\max} = \pi r^2$	<p>CORNER</p> $\sigma_{\max} = \frac{8\pi w^2 h^2}{\lambda^2}$ <p>Dihedral Corner Reflector</p>
<p>CYLINDER</p> $\sigma_{\max} = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}$	$\sigma_{\max} = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$ <p>Trihedral Corner Reflectors</p>
<p>FLAT PLATE</p> $\sigma_{\max} = \frac{4\pi w^2 h^2}{\lambda^2}$	$\sigma_{\max} = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2}$
<p>TILTED PLATE</p> <p>Same as above for what reflects away from the plate and could be zero reflected to radar</p>	$\sigma_{\max} = \frac{15.6\pi L^4}{3\lambda^2}$

Figura 7. Cálculo computacional de RCS de objetos simples. Fuente: [10]

- **VNAs (Vector Network Analyzer):** Analizadores vectoriales de redes, con los que se puede calcular la RCS de distintos objetos o aeronaves. Uno de los modelos con los que se puede realizar el cálculo es el modelo VNA Máster MS2028C representado en la figura 8, de la firma Anritsu.



Figura 8. Medidor de RCS VNA Máster. Fuente: [12]

- **Radares de imagen.** En modelos como el RCS11, se utilizan ondas milimétricas para el cálculo de la RCS, la cual se puede observar en la figura 9 por contraste de colores en distintos objetos, siendo los valores más altos de RCS de color rojizo.

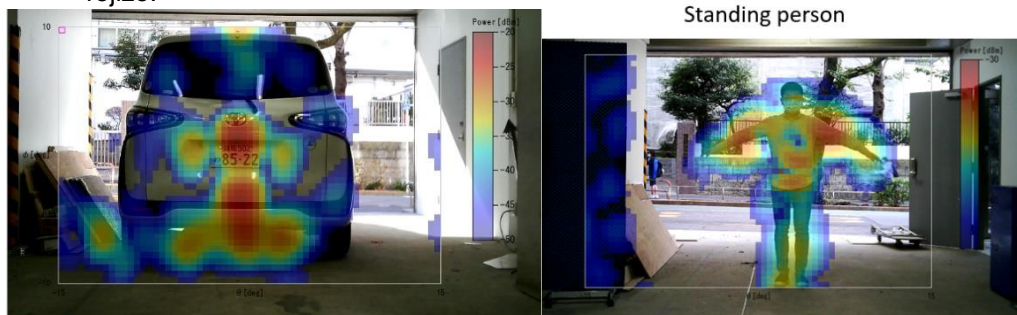


Figura 9. RCS de distintos objetos medidos con Radar de imagen. Fuente: [12]

- **Sistemas de Campo Compacto** [13]. El INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) dispone de instalaciones para la medida de parámetros radar y RCS con el sistema SGSE-9 representado en la figura 10.

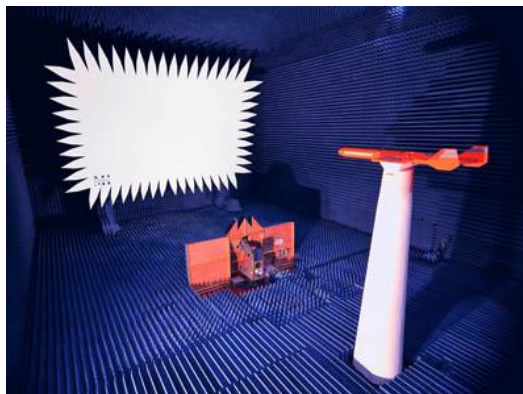


Figura 10. Sistema SGSE-9 del INTA. Fuente: [13]



3.2.2. TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE LA RCS.

Debido a la existencia y constante mejora de los sistemas de detección radar, se han desarrollado algunas técnicas para reducir la RCS de los diferentes objetos con el fin de no ser detectados por los sistemas radar. Las técnicas empleadas para ello [14] son:

- **Método de “Shaping”:** Consiste en redireccionar la dirección de la onda incidente en el objeto procedente del radar en dirección diferente a la de incidencia, para ello se utilizan superficies curvas y triangulares en las zonas de mayor reflejo de ondas, como pueden ser la cola o las salidas de aire de aviones y helicópteros. Aunque todo ello conlleva a una reducción de la RCS, también supone un mayor coste, pérdida de aerodinámica de los aparatos, así como un aumento en las horas de mantenimiento de estos.
- **Uso de materiales RAM (Radar Absorbing Materials):** A lo largo de la historia se han utilizado infinidad de materiales para la construcción de aviones, Materiales capaces de reducir la RCS de los aparatos en función de la frecuencia con la que son incididos. Algunos de los materiales más utilizados son:
 - *Pintura de bolas de hierro:* Consigue que la radiación sea absorbida y transformada en calor gracias a la ferrita,
 - *Gomaespuma:* Mediante la difracción y la absorción consigue la reducción de la RCS en función de la frecuencia con la que es iluminado.
 - *Pantallas Salisbury:* Mediante el uso de conductores eléctricos y magnéticos provoca en su interior una interferencia destructiva de las ondas incidentes, un método similar al utilizado en las lentes de las cámaras fotográficas para evitar el reflejo de la luz.

En la figura 11 se puede observar la reducción de RCS que se ha producido en un barco tras la aplicación de materiales RAM a distintas partes del barco. En línea roja se observa la RCS anterior a la aplicación de estos, y la línea azul muestra los nuevos valores de RCS tras la aplicación de los materiales RAM[15].

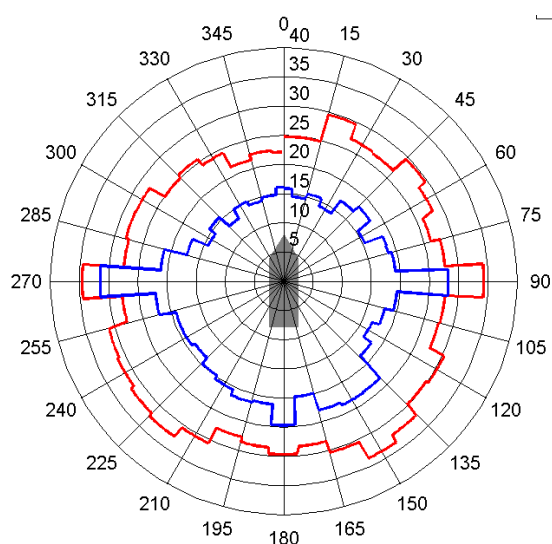


Figura 11. Gráfico reducción de RCS usando materiales RAM. Fuente: [15]



3.2.3. EJEMPLOS DE RCS

Algunos ejemplos de RCS de aviones/ misiles, así como de diferentes objetos se reflejan en la siguiente tabla (Tabla 2) [5] a modo de obtener una idea inicial de las magnitudes de estos. La información acerca del dato de RCS de los distintos aeronaves, misiles o barcos es de **extrema confidencialidad** debido a su alto interés táctico, sin embargo, de modelos usuales y muy conocidos se conoce una aproximación de este.

OBJETO	RCS [m^2]
<i>Caza F-4 Phantom (año 1958)</i>	<i>100</i>
<i>Caza F-16 Falcon (1970)</i>	<i>5</i>
<i>Caza F-18(1980)</i>	<i>1</i>
<i>Caza Eurofighter Typhoon (1994)</i>	<i>0.1</i>
<i>Avión de combate F-117 Nighthawk (1983)</i>	<i>0.003</i>
<i>Misil AGM-129 ACM</i>	<i>0.001</i>
<i>Hombre</i>	<i>1</i>
<i>Pájaro</i>	<i>0.01</i>
<i>Vehículo terrestre</i>	<i>50-100</i>

Tabla 2. RCS de distintos objetos. Fuente: Elaboración propia a partir de [5].

Como podemos observar en la tabla anterior, la innovación en la tecnología, así como en el diseño de nuevos materiales de fabricación han permitido la reducción de la sección recta radar de los aviones y misiles llevándolos a términos similares e incluso 10 veces menores a la sección recta radar que tendría un pájaro, por ejemplo. Por lo que podemos ya adelantar la complejidad actual para detectar aviones y misiles de última generación debido al avance tecnológico, así como a las técnicas de reducción de sección recta radar, que se han detallado previamente.



3.3. SISTEMAS DE MEDIDA DE RCS DISPONIBLES EN LAS FUERZAS ARMADAS.

Debido a la gran importancia táctica que supone el conocer la capacidad de los distintos sistemas de armas, vehículos, aeronaves y buques de España a la hora de ser detectables por parte de otros radares, la DGAM (Dirección General de Adquisición de Material), junto con los organismos específicos de los distintos ejércitos, han estado en constante estudio de las formas de analizar y reducir la RCS del material español. Con este objetivo, se han ido desarrollando diferentes sistemas de medida de RCS a lo largo de los años para poder estudiar y ensayar la reducción de esta. Algunos de estos programas se exponen a continuación.

3.3.1. SISTEMAS DE MEDIDA DE RCS

Dentro de las Fuerzas Armadas, más concretamente en la Armada, se han desarrollado a lo largo de los años distintos sistemas de medición de RCS para avanzar en el estudio y la reducción de ésta en los buques disponibles, con el fin de capacitar a la fuerza de un menor grado de detección por parte del enemigo. Estos sistemas han ido mejorando y en la actualidad se pueden utilizar para medir la firma radar de cualquier tipo de aeronave, vehículo u elemento disponible en las Fuerzas Armadas del que se desee disponer esta información

- **SISTEMA DE MEDIDA RCS LIBRA**

Sistema de medida de RCS [15] desarrollado por la Armada Española, INDRA sistemas, y la Universidad de Vigo en 2002, con el objetivo de disponer de la capacidad de medir la RCS de los buques de la Armada en España (anteriormente se llevaban los buques a EE. UU o Alemania) y así poder experimentar aplicando técnicas de reducción de la firma radar de estos.

El sistema puede hacer la medición de la RCS de forma global (basado en frecuencia, forma del objeto y polarización de la onda incidente) o con alta resolución, con la cual se diferencian las diferentes partes del objeto con sus respectivas RCS.

- **SISTEMA DIAR**

El sistema de medición DIAR (Demostrador Instrumental en Alta Resolución) [16] es fruto de la continuación en el desarrollo del sistema LIBRA antes mencionado, suponiendo un gran avance y mejora respecto al mismo. El sistema DIAR fue finalizado en el año 2016.

Este nuevo sistema permite identificar de forma individual los elementos de los buques muchos más fácilmente y preciso que con el sistema anterior. Además, el tiempo de medición se reduce notablemente, e identifica los elementos del buque que mayor RCS reflejan.



Ilustración 1. Sistema DIAR sobre vehículo civil. Fuente: [16]



Para una detección más específica de aeronaves en vuelo, el ET dispone tanto de radares más avanzados disponibles en otros sistemas de armas para la detección de aeronaves convencionales, así como con equipos especiales para la detección de UAV (Unmanned Aerial Vehicle) y drones. A continuación, se procederá a exponer las características técnicas generales de los distintos radares y aparatos del ejército de tierra para identificar un posible sustituto para los radares de detección del sistema Hawk, con el fin de mejorar las capacidades de éste en tema de detección de aeronaves con baja sección radar.

3.3.2. RADARES

Existen infinidad de radares de uso militar en el mercado, muchos de ellos seguramente capaces de mejorar las prestaciones de los radares del sistema Hawk respecto al umbral de detección RCS. Sin embargo, para el estudio de una posible alternativa para la sustitución de estos, nos vamos a centrar en estudiar los radares de los que dispone el ET en dotación en sus diferentes sistemas de armas y unidades, debido a la relativa sencillez de sustitución, así como que son radares ya estudiados y comparados por las Fuerzas Armadas en ámbitos como el coste, logística, país al que se adquieren y un largo etcétera de variables ya tenidas en cuenta.

Los datos técnicos de los distintos radares y sistemas expuestos a continuación han sido obtenidos de los manuales propios de cada radar y sistema.

- **RADAR RAC-3D**

Radar (Figura 12) de exploración en tres dimensiones fabricado por la empresa de defensa francesa Thomson-CSF, es el radar utilizado por el escalón superior COAAAS-M (Centro de Operaciones de Artillería Antiaérea Semiautomático Medio), que proporciona datos de distancia, azimut y altura, detectando objetos a media, baja y muy baja altura. Destaca por sus grandes dimensiones, así como por la altura de su mástil y el gran alcance de detección.



Figura 12. Radar RAC-3D. Fuente: [17]



- **RADAR AN/MPQ-64F1 SENTINEL**

Radar (Figura 13) fabricado por la empresa estadounidense Raytheon Company, es el radar del sistema de armas NASAMS (Norwegian Advanced Surface to Air Missile System) capaz de detectar, identificar y seguir más de 60 trazas simultáneamente. Detecta aeronaves convencionales en movimiento o en estático (caso de helicópteros).



Figura 13. Radar AN/MPQ-63 SENTINEL. Fuente: [18]

- **RADAR AN/MPQ-53 PATRIOT**

El radar (Figura 14) del sistema de armas PATRIOT (Phased Array Tracking Radar to Intercept Of Target), el AN/MPQ-53, también fabricado por la norteamericana Raytheon Company, realiza las funciones de búsqueda, identificación, guía de misiles y funciones de guerra electrónica.



Figura 14. Radar AN/MPQ-53 PATRIOT. Fuente: [19]



- **RADAR RAVEN**

Radar (Figura 15) en 2D de onda continua con baja potencia de emisión fabricado por la empresa alemana ahora denominada Thales, que se utiliza en el COAAAS-L, por lo que es ideal para su integración con baterías mistral y cañón 35/90⁸. Dispone de la capacidad de detectar múltiples blancos en una misma orientación, así como de identificar si son de ala fija o ala rotatoria.



Figura 15. Radar RAVEN. Fuente: [20]

- **DIRECCIÓN DE TIRO SKYDOR**

Dirección de tiro⁹ del sistema de armas cañón 35/90 (Figura 16) fabricado por la empresa española Navantia para la defensa contra aeronaves a baja y muy baja cota, proporcionando datos de distancia del objetivo, orientación y velocidad. Dispone también de un apuntador óptico, y una cámara de televisión que permite el seguimiento pasivo de los blancos.

⁸ 35/90 Sistema de defensa aérea de doble cañón de 35mm adquiridos por España en 1970 para la defensa contra aeronaves a baja y muy baja altura.

⁹ Dirección de tiro: Sistema con funciones de detección y seguimiento de objetivos, al igual que los radares, calculando además su trayectoria y el punto futuro que ocupará el blanco objetivo, con el fin de poder realizar un disparo efectivo a esa posición futura.



Figura 16. Dirección de tiro SKYDOR. Fuente: [21]

3.3.3. OTROS SISTEMAS ESPECIFICOS PARA DETECCION DE UAVs.

Para la detección de drones y UAVs, el Ejército dispone de una unidad especializada en este cometido, el RAAA71 de Madrid, que dispone de material para la detección de estos de una manera eficaz, así como el estar en preparación constante y adquisición de conocimientos y experiencias para mejorar los sistemas de detección y derribo de éstos. El material con este cometido del que dispone actualmente este regimiento se detalla a continuación para identificar su utilidad, así como para exponer una alternativa a la búsqueda de áreas reflejadas por las aeronaves basada en detección de radiofrecuencias de enlace o mediante la negación de posicionamiento GPS.

- **Sistema CERVUS**

Sistema más avanzado [22] actualmente del ET de control de equipos remotos y vehículos no tripulados de vigilancia electrónica desarrollado por empresas españolas del ámbito militar, contando con el apoyo de unidades de guerra electrónica del ET, cuyo método de detección y neutralización de RPAS (Remotely Piloted Aerial System) se basa en el control del método de posicionamiento GNSS (Global Navigation Satellite System) del aparato, dentro de la concienciación ante amenazas de este tipo, denominadas NAVWAR¹⁰.

De esta forma, el sistema al completo intenta detectar las señales cercanas (hasta 4km) de posicionamiento GPS, procediendo a la clasificación y seguimiento de estas, y en el caso de ser necesario, a su inhibición mediante interferencias con un fusil de radio frecuencia. Con esto se consigue que el RPAS no conozca su posición actual, y, por lo tanto, aun teniendo una ruta prefijada de ataque (sin control remoto), el aparato no sea capaz de ubicarse en el terreno y llegar a su objetivo. Permite el seguimiento de drones sin RCS hasta una distancia de 500m. Se puede conformar el sistema según la forma en la que el subsistema de inhibición es establecido, portado por un operador (alcance 500m), en forma de maleta sobre vehículo (alcance 2km) y de forma fija sobre vehículo (alcance de 5km).

¹⁰ Definido por la OTAN como las medidas técnicas para asegurar y proteger la superioridad en la navegación y el posicionamiento de nuestras fuerzas, así como para degradar las del adversario.



Del mismo modo, mediante otro subsistema, permite que nuestros propios drones sean capaces de operar a pesar de recibir inhibiciones de posicionamiento, por ejemplo, mediante el subsistema de dron cautivo, por el cual el dron está enlazado al operador por cable y permite ser operado hasta a 120 metros de altura para, por ejemplo, obtener una observación avanzada del terreno. Sus características y componentes principales se exponen en la figura 17.

El sistema ha sido desplegado en la misión EUTM Mali ¹¹en este mismo año para la protección del personal y la base allí presente.[22]



Figura 17. Subsistemas del sistema CERVUS. Fuente: [22]

- **Maleta de detección DJI AEROSCOPE**

La maleta de detección DJI AEROSCOPE [23], es un sistema portátil (figura 18) cuya función se centra en la fase de detección e identificación de drones. Es bastante intuitivo y solo es necesario una persona para operarlo con facilidad. Al ser portátil, permite ser trasladado de manera rápida y ponerlo en funcionamiento en corto espacio de tiempo, además de poder usarse en movimiento. Este sistema es capaz de detectar la mayoría del espectro de UAS de carácter civil de la marca DJI, siendo alrededor del 85 % de los UAS del mercado de esta empresa.

La fase de detección la realiza mediante monitoreo y análisis del espectro RF, identificando la comunicación entre la estación de control (mando remoto) y el UAS. Cuando detecta que un UAS se introduce en nuestra zona de interés, es capaz de obtener la información de la ruta de vuelo, la velocidad, el rumbo y la latitud, además del punto de despegue, con lo que obtendríamos el punto origen y localización del radio operador.

¹¹ *EUTM MALI: European Union Training Mission Mali (Mali): las tropas españolas tienen la misión de adiestrar al Ejército maliense en entrenamiento militar y asesoramiento de mando y control.*



El AEROSCOPE se encuentra actualmente o se ha desplegado en multitud de misiones internacionales en las que ha participado el Ejército Español como son la A/I (SOTG)¹², RSM (FOE)¹³, EUTM MALI y la Operación L-H¹⁴.

Dispone de baterías para su funcionamiento, por lo que le permite estar activo durante un largo periodo de tiempo. Como se puede ver en la tabla 3, opera en las frecuencias de 2,4 GHz y 5,8 GHz al igual que los drones, y su alcance efectivo es de 5 km, lo que hace posible detectar al UAS a una distancia suficiente para que este no suponga una amenaza y poder combatirlo.

DJI AEROSCOPE	
<i>Dimensiones</i>	<i>405x327x175 mm</i>
<i>Peso</i>	<i>8.5 kg</i>
<i>Rango de temperatura</i>	<i>-20°C a 40°C</i>
<i>Autonomía</i>	<i>90 min</i>
<i>Frecuencias de inhibición</i>	<i>2.4 y 5.8 GHz</i>
<i>Alcance</i>	<i>5 km</i>

Tabla 3. Características DJI AEROSCOPE. Fuente: Elaboración propia a partir de [24]

¹² A/I (SOTG): Apoyo a Irak – Inherent Resolve (Bagdad, Irak): militares españoles llevan a cabo en el Baghdad Diplomatic Support Center el adiestramiento de unidades del servicio contraterrorista iraquí.

¹³ RSM (FOE): *Resolute Support (Afganistán): la misión tiene las tareas de asistencia, entrenamiento y asesoramiento de las fuerzas de defensa y seguridad afganas, llevadas a cabo por las Fuerzas de Operaciones Especiales. (En la actualidad ya no tenemos personal en Afganistán)*

¹⁴ L-H: Operación “Libre Hidalgo” (Líbano): Los militares españoles realizan patrullas a pie y en vehículo, para vigilar permanentemente la línea de separación entre Líbano e Israel.



Figura 18. Maletín DJI AEROSCOPE. Fuente: [24]

- **Sistema Fijo AUDS BLIGHTER**

El sistema C-RPAS fijo AUDS Blighter [25] (Anti-UAV Defense System) (figura 19) está diseñado para detectar, identificar y neutralizar los UAS que puedan ser una amenaza para nuestras fuerzas. Este sistema es capaz de combinar las 3 fases (detección, seguimiento e inhibición) de tal forma que es capaz de detectar remotamente UAS mediante un radar, posteriormente rastrearlo y clasificarlo antes de llevar a cabo su inhibición. El radar que usa está en funcionamiento 24 horas al día y es capaz de detectar UAS de pequeño tamaño (incluso si se encuentran cerca de edificaciones), además de funcionar en cualquier condición climatológica.

Tras la detección se procede a la identificación del objeto, para esto, el sistema tiene una cámara de alta resolución con 30 aumentos, además de una cámara térmica de alta sensibilidad, que es capaz de identificar y clasificar el UAS junto con la información proporcionada por el radar. Una vez que se haya decidido que el UAS es una amenaza, el operador puede neutralizar a la aeronave mediante el inhibidor de radiofrecuencias en tres bandas, a través de antenas direccionales.

En estos momentos el Ejército de Tierra no tiene este sistema en dotación propia, pero si ha estado trabajando con él en la Operación A/I en Besmayah, Irak. El sistema lo utilizó el contingente español en la base “Gran Capitán”, cedido por la coalición internacional militar.

Al tener un alcance de 10 Km se convierte en el sistema más completo que usa el Ejército de tierra en estos momentos en detección de drones con radiofrecuencia. Sus características principales se exponen en la tabla 4.



AUDS BLIGHTER	
<i>Rango de Tª</i>	-32°C a 49°C
<i>Rango de Apertura</i>	180/360°
<i>Cámara</i>	HD 2.3 Mega Pixel
<i>Zoom Óptico</i>	30x
<i>Frecuencias de inhibición</i>	433 MHz, 2,4 y 5,8 GHz, Ku-band ¹⁵
<i>Alcance del radar</i>	10km
<i>RCS mínima</i>	0.01

Tabla 4. Características AUDS BLIGHTER. Fuente: Elaboración propia a partir de [25]



Figura 19. AUDS BLIGHTER. Fuente: [25]

¹⁵Porción del espectro electromagnético en el rango de las microondas que va de los 12 a los 18 GHz. La banda Ku se usa principalmente en las comunicaciones satelitales, siendo la televisión uno de sus principales usos.



4. ANÁLISIS DEL SISTEMA HAWK.

4.1. ENTREVISTAS.

Para realizar un análisis de las capacidades y deficiencias del sistema HAWK, se han realizado entrevistas personales con los distintos mandos, personal de tropa y operadores del sistema Hawk. La entrevista se realizó en una reunión grupal durante una jornada de instrucción continuada realizada durante mi periodo de prácticas en el RAAA 74, contando con la presencia del capitán jefe de la batería, el teniente jefe de la sección de armas y los distintos suboficiales y tropa operadores de los sistemas en los que estaba encuadrado, un total de 10 personas. Se realizó por mi parte un pequeño cuestionario de preguntas acerca del sistema HAWK, preguntas con las cuales se han obtenido las deficiencias principales del mismo basadas en la experiencia del personal durante todos sus años de servicio en la unidad. Los resultados obtenidos están relacionados con el largo periodo de tiempo de servicio que lleva el sistema en funcionamiento, tiempo en el que han ido surgiendo problemas de distinta índole, sobre todo en el tema técnico y en el logístico, ambos expuestos a posteriori en la Matriz DAFO (Punto 4.3).

En el aspecto técnico, los problemas y deficiencias principales del sistema Hawk son los siguientes:

- Descatalogación del sistema por parte de EE.UU tras la captura de una batería Hawk en Irak.
- Capacidad para combatir aeronaves convencionales, pero no amenazas C-RAM (Counter Rocket, Artillery and Mortar), misiles balísticos tácticos TBM (Tactical Ballistic Missile) o drones comerciales.
- Tiempo de despliegue elevado.
- La eficacia del sistema ha ido disminuyendo debido a que el enemigo se ha ido instruyendo en las contramedidas, así como por el avance tecnológico.
- Pocas mejoras a nivel técnico.

En el aspecto logístico, las principales deficiencias del sistema se pueden enumerar como las siguientes:

- Se necesita gran cantidad de camiones y vehículos de transporte para el sistema, por lo que los camiones, así como los conductores con capacitación para llevarlos, se convierten en un recurso crítico de la unidad.
- El número de averías incrementa con el tiempo, debido al paso de los años sobre el material y sistemas.
- El tiempo que hay que dedicarle a mantenimiento preventivo y correctivo es muy elevado.
- La escasez de repuestos debido a la descatalogación del sistema genera que las reparaciones se alarguen en el tiempo y que su coste cada vez sea más elevado.



4.2. EXPERIENCIAS OBTENIDAS.

Durante la realización, a lo largo de los años de vida del sistema Hawk, de maniobras y tiros de entrenamiento con munición de guerra, se han necesitado diferentes tipos de blancos aéreos para realizar una instrucción lo más real posible. Con el objetivo de instruir a los operadores de los distintos aparatos componentes del sistema Hawk, así como para detectar las capacidades y carencias del sistema, se han ido probando a lo largo de los años distintos blancos aéreos objetivo, los cuales se describen en el Anexo I. Se va a exponer el resultado obtenido durante la realización de un tiro de instrucción en el año 2020, en relación con la capacidad que ha obtenido el radar para detectarlos y hacerles fuego. Toda esta información ha sido obtenida de los informes post-ejercicios realizados de forma interna por el RAAA74 [26].

4.2.1. BLANCOS AÉREOS.

En la figura 20 se expone una comparativa de los distintos blancos aéreos utilizados para instrucción durante los ejercicios realizados en función de la velocidad máxima alcanzada, la altura máxima y en color de fondo, la autonomía de estos.

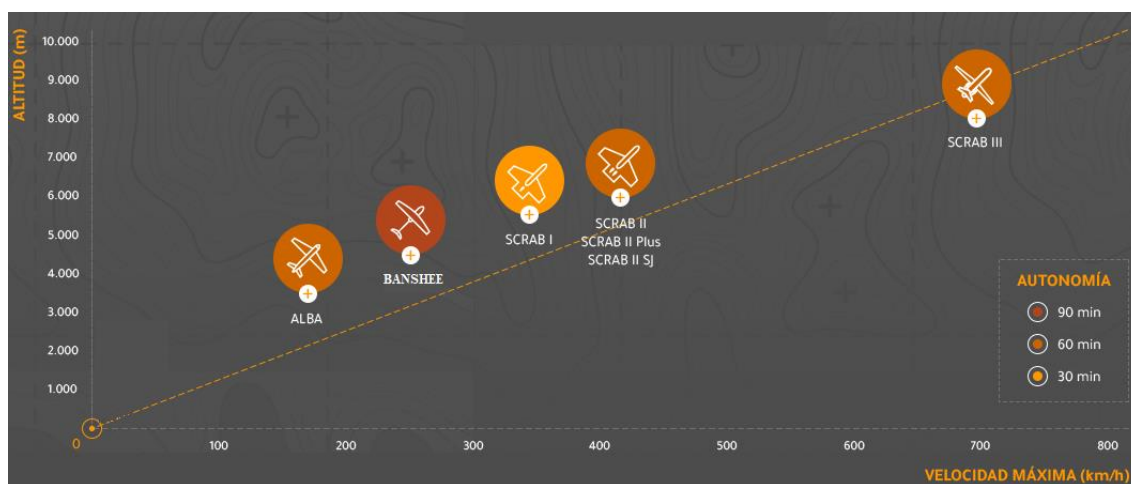


Figura 20. Tabla comparativa blancos aéreos. Fuente: Elaboración propia adaptación de [27]

Como podemos observar en la figura 20, el modelo Scrab III es el modelo de mejores especificaciones técnicas de los tratados, por lo tanto, es el que tiene más capacidades para adaptarse a distintas situaciones de vuelo que puedan ser planteadas para simulación en los ejercicios de tiro.

Para la adquisición de los datos técnicos de RCS de los distintos blancos aéreos, se solicitó a los fabricantes vía email la posibilidad de obtener los mismos. La respuesta en este sentido por parte de SCR (Sistemas de Control Remoto S.A) y QINETIC ha sido negativa, debido a la confidencialidad de estos, por una parte, y a la complejidad y variabilidad de este dato en función del radar disponible, la distancia del blanco y las condiciones meteorológicas entre otras variables.



Basándome en los planes de vuelos prefijados y establecidos para los blancos aéreos durante realización de distintos ejercicios de tiro y maniobras por parte del RAA74, expongo las capacidades técnicas del sistema Hawk para la detección de estos blancos de una forma práctica. Debido a la confidencialidad de los datos técnicos y específicos de RCS de los distintos blancos, así como la complejidad de su cálculo teórico, se basa el estudio en esta experiencia práctica durante uno de los ejercicios realizados en el campo de maniobras de Médano del Loro (Provincia de Huelva)(Figura 21) entre el 7 y el 12 de noviembre de 2020.

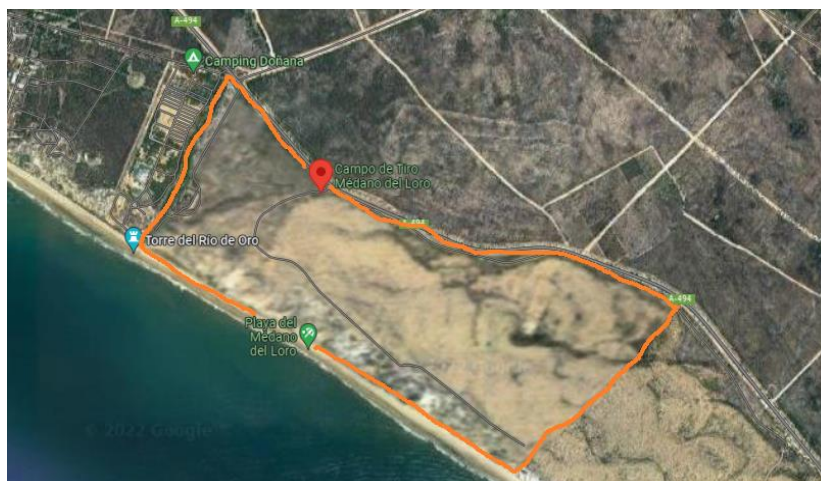


Figura 21. Campo de tiro de Médano del Loro. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps.

El ejercicio se realizó durante una semana en el citado campo de maniobras, con el fin de desarrollar el ejercicio de tiro anual, en este caso, en el año 2020. En este ejercicio se dispararon 4 misiles Hawk con sus correspondientes blancos aéreos. A continuación, en la tabla 5, se exponen los planes de vuelo preestablecidos para los distintos blancos aéreos, así como el resultado de si fueron detectados o no por los radares del Hawk.

VUELO Y BLANCO	RESULTADO
Modelo ALBA. Plan de vuelo en el que el blanco se alejaba a una distancia de 50 km, volaba a una altura de 2500 metros y a una velocidad de 40 m/s. La trayectoria prefijada se realizaba de forma orbital alrededor del asentamiento y a 50km de distancia.	Se podía identificar y seguir perfectamente la trayectoria del blanco, procediéndose a su derribo
Modelo ALBA. Plan de vuelo en el que el blanco se alejaba a una distancia de 55 km, volaba a una altura de 2200 metros y a una velocidad de 45 m/s. La trayectoria se realizaba en dirección hacia el asentamiento realizando cambios de dirección durante el mismo.	Se podía identificar y seguir con algo más de dificultad la trayectoria del blanco debido a sus menores dimensiones frontales. Se procedió a su derribo a una distancia de 35km.



<p>Modelo SCRAB I. Plan de vuelo en el que el blanco se alejaba a una distancia de 70 km, volaba a una altura de 4300 metros y a una velocidad de 80 m/s. La trayectoria prefijada se realizaba de manera paralela a la línea de costa.</p>	<p>Al ser un blanco mayor, se podía identificar y seguir sin ningún problema para los radares Hawk. Se procedió a su derribo sin ninguna complicación.</p>
<p>Modelo SCRAB II. Plan de vuelo en el que el blanco se alejaba a una distancia de 90 km, volaba a una altura de 5000 metros y a una velocidad de 90 m/s. La trayectoria se realizaba y modificaba a gusto de los operadores de blanco aprovechando la mayor autonomía de este modelo. Se procedía a acercar la aeronave al asentamiento y realizar cambios de trayectoria, incluso realizando maniobras de escape y alejamiento.</p>	<p>En esta ocasión los radares Hawk detectaron la aeronave a una distancia de 65 km del asentamiento. Se identificaba y seguía la trayectoria de la aeronave, y se procedió a su derribo en alejamiento aprovechando la autonomía del aparato para experimentar en detección.</p>

Tabla 5. Vuelos y resultados para los modelos de blancos aéreos. Fuente: Elaboración propia.

Como era de esperar, todos los blancos aéreos son perfectamente identificados por el sistema, al ser este principalmente el objetivo de dichos blancos, además de incrementar las capacidades del sistema con las capacidades del radar del escalón superior. Según las experiencias recibidas, en algunas ocasiones a los blancos se les ponen distintos espejos y piezas para realizar pruebas y comprobar la reflexión de las ondas radar y visualizar en pantalla si son mejor o peor detectables por el radar. Por lo tanto, se puede concluir que incluso con los blancos preparados para su detección, hay que incrementar sus capacidades de reflexión con los modelos más avanzados para proceder a su mejor detección.



4.2.2. CAZAS EUROFIGHTER.

El caza Eurofighter es un caza polivalente de gran maniobrabilidad que se desarrolló por un consorcio de países europeos (Italia, Reino Unido, Alemania y España entre otros) en los años 90. Las características principales del modelo Eurofighter, adquirido por España en el año 2004, se muestran en la tabla 6.

EUROFIGHTER TYPHOON	
<i>Envergadura</i>	<i>11,09 m</i>
<i>Longitud</i>	<i>15,97 m</i>
<i>Peso máximo al despegue</i>	<i>22800 kg</i>
<i>Motorización</i>	<i>Motor Eurojet ej200</i>
<i>Techo operativo</i>	<i>19812 m</i>
<i>Velocidad máxima</i>	<i>Mach 2</i>
<i>Autonomía</i>	<i>3500 km</i>
<i>RCS</i>	<i>0.1 m²</i>

Tabla 6. Características principales Eurofighter Typhoon. Fuente: Elaboración propia a partir de [28]

Durante la realización de las prácticas en la unidad, se realizó una jornada de instrucción continuada en la base aérea de Morón de la Frontera (Provincia de Sevilla) con la colaboración del EA (Ejército del Aire), en la que tuve la oportunidad de participar. En la realización de esta jornada de instrucción, se realizaron distintas pasadas aéreas por parte de los cazas de dotación en esa base, el modelo Eurofighter Typhoon.

Durante la realización de las distintas pasadas aéreas de los cazas, me dispuse a analizar las capacidades de detección del sistema Hawk de estas aeronaves, teniendo en cuenta en cada una de las pasadas, el plan de vuelo fijado previamente entre los pilotos y el teniente jefe de batería, y las distintas contramedidas de decepción que realizaban las aeronaves. Teniendo además el dato teórico de la RCS, pude comprobar y visualizar la capacidad del sistema con respecto a estas aeronaves. Los resultados obtenidos durante mi estudio se reflejan en la tabla 7.



PASADAS AEREAS	RESULTADO
<i>Pasada con trabajo en pareja de cazas a media cota con o sin separación. Fijada para realizarse a la hora fijada +15 minutos.</i>	<i>Los cazas se alejaron a una distancia mayor de 100 km del asentamiento. En la pantalla de detección no se diferenciaban las trazas del resto de aeronaves que había en el espacio aéreo, por lo que era muy difícil identificarlas debido al gran número de aeronaves en el aire. Finalmente pasaron por encima del asentamiento sin haber conseguido identificarlas.</i>
<i>Pasada con trabajo en pareja de cazas a baja cota con o sin separación. Fijada para realizarse a la hora fijada +30 minutos.</i>	<i>En esta ocasión los cazas se alejaron a una distancia de 80km. Tras mucho trabajo de búsqueda e identificación se pudo identificar y seguir a una de las aeronaves hasta que se pudo visualizar con la cámara de visión del radar de seguimiento a una distancia de 40km durante un corto periodo de tiempo, debido a que la aeronave se escondía entre las nubes y se perdía el seguimiento visual.</i>
<i>Separación de la pareja de cazas y ataque por diferentes ejes individualmente. Se realizó esta pasada en la hora fijada +45 minutos.</i>	<i>En esta ocasión fue muy difícil el tratar de enganchar con el radar de seguimiento a los dos cazas. Las nubes dificultaban mucho su identificación visual y se pudo seguir a una de ellas por efecto Doppler, pero a una distancia de 20km, muy cercano al asentamiento.</i>
<i>Tráficos de cañón sobre el asentamiento (con separación en el tiempo) tras una maniobra pop-up¹⁶. A la hora fijada más 1 hora.</i>	<i>En esta ocasión, al ir a baja altura y por debajo de las nubes, se pudo identificar y seguir a ambas aeronaves separadas en el tiempo a una distancia de 30 km.</i>

Tabla 7. Pasadas aéreas y resultados. Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la tabla 12, en las distintas pasadas la identificación de los cazas era muy compleja debido por una parte al gran volumen de aeronaves de otra índole que había en vuelo, por la climatología, ya que era un día nublado, y por la capacidad de los cazas de realizar contramedidas y ser vistos a una distancia muy cercana.

Con los resultados obtenidos podemos llegar a la conclusión de que era muy difícil seguir el vuelo de las aeronaves e identificarlas, y que cuando esto sucedía, era a una distancia no muy alejada del asentamiento, con lo que el tiempo de alerta y de respuesta era bastante reducido.

Además, hay que tener en cuenta que se contaba con el apoyo del COAAAS-M, que con su radar RAC-3D, proporcionaba la información de las trazas a la BCP y las detectaba e identificaba mucho antes que los radares del sistema HAWK. Por lo tanto, se puede decir que el sistema adquiriría las capacidades de detección en gran parte también a través del radar RAC-3D y no de sus propios medios radares.

¹⁶ Maniobra pop-up: La aeronave se acerca a baja cota y en el instante de ataque se frena para lanzar el misil, el cual sale hacia arriba y adelante. Finalmente, la aeronave sube en vertical rápidamente tras haber realizado el lanzamiento.



4.3. ANÁLISIS DAFO SISTEMA HAWK

Tras analizar las características técnicas estudiadas del sistema HAWK, así como las experiencias obtenidas en la realización de los distintos ejercicios de instrucción y jornadas continuadas con los blancos aéreos y el caza Eurofighter y las entrevistas realizadas al personal del RAAA 74 expuestas anteriormente, se va a realizar un análisis DAFO con su correspondiente matriz (Figura 22) en la que se podrán observar las carencias y fortalezas del sistema,

- Debilidades:
 - Nos encontramos ante un sistema de armas desarrollado en los años 60, por lo que la tecnología de la que dispone es bastante anticuada respecto a los nuevos sistemas de armas.
 - Debido a esta misma razón, la interoperabilidad e integración del sistema Hawk con los sistemas de armas modernos de otros ejércitos e incluso de nuestro propio ejército (Sistema PATRIOT) es un problema a la hora de la formación por ejemplo de una UDAA (Unidad de Defensa Antiaérea).
 - No permite combatir amenazas no convencionales como pueden ser drones, así como aeronaves con baja RCS.
 - El despliegue de una unidad Hawk requiere de una gran cantidad de apoyo logístico y de personal.
 - El tiempo de despliegue es muy elevado, así como la puesta en funcionamiento y las comprobaciones previas que hay que realizar al sistema.
 - Los repuestos del sistema son cada vez más complicados de reponer.
 - Las trazas de los cazas modernos con baja RCS son detectadas a corta distancia.
 - Los radares del sistema, sin el apoyo del radar RAC-3D del COAAAS-M, tienen carencias en detección e identificación de aeronaves.
- Amenazas:
 - Debido a su antigüedad, es un sistema muy establecido en el ámbito de la DAA (Defensa Antiaérea), por lo tanto, el conocimiento del sistema por parte de otros ejércitos es elevado.
 - La constante innovación de los sistemas de armas, aeronaves, proyectiles y misiles balísticos que suponen una vulnerabilidad para el sistema.
 - EE. UU (su fabricante) abandonó el uso del sistema tras la guerra de Irak (año 2001) debido a la captura por parte de la insurgencia de una unidad que operaba el sistema Hawk, lo que lleva a una merma considerable en la modernización y actualización del sistema de armas.
- Fortalezas:
 - Debido a la cantidad de años que lleva en servicio el sistema Hawk, los conocimientos del personal operador de este son elevados, y por tanto disponen de un gran conocimiento del sistema.
 - Muy eficaz combatiendo amenazas convencionales de todo tipo.



- Al disponer de 3 tipos de radares distintos, es muy complicado para las aeronaves enemigas el efectuar contramedidas ya que deberían de hacerlas de distinto tipo a la vez.
- Oportunidades:
 - Con los recientes conflictos armados que están surgiendo, se ha demostrado que la DAA es muy importante para cualquier ejército moderno, por lo tanto, la innovación en los sistemas de armas, así como la incorporación de nuevos sistemas, se antoja crucial.
 - Mayor inversión en la DAA por parte de los ejércitos.
 - Compras colectivas a nivel OTAN (Organización del Tratado Atlántico Norte) que pueden favorecer y aportar oportunidades ventajosas para España.
 - Implementación de nuevos radares con más capacidades al sistema Hawk.
 - Incremento futuro del gasto en Defensa por parte del Gobierno Español que puede llevar a buscar nuevas implementaciones al sistema Hawk.



Figura 22. Matriz DAFO. Fuente: Elaboración propia.



5. POSIBLES IMPLEMENTACIONES AL SISTEMA HAWK.

Para mejorar las capacidades de detección del sistema Hawk de aeronaves con baja RCS, se va a analizar la posible implementación de alguno de los dispositivos estudiados anteriormente o disponibles en el mercado sin cambiar ningún aparato o componente actual del sistema.

5.1.1. MEDIDORES DE RCS.

En el punto 3.2.2 se han enumerado los diferentes aparatos capaces de detectar y medir la RCS de distintos objetos, como son los VNAs, radares de imagen o sistemas de campo compacto. Con el fin de mejorar el sistema Hawk se estudia la utilización de estos medidores de RCS con el fin de detectar las aeronaves, sin la necesidad de hacer el cálculo de su RCS.

Respecto a la implementación de un VNA o un radar de imagen, la principal razón y por la cual se descarta su implementación es el rango de alcance de medida del que disponen estos aparatos. Observando las especificaciones técnicas de diferentes dispositivos comerciales, podemos observar que el alcance de medida de estos sistemas es del orden de <150 metros, por lo tanto, no tiene sentido el aplicar un sistema de medida VNA para detectar aeronaves con alcance del sistema Hawk.

5.1.2. OTROS SISTEMAS

La viabilidad de implementación de otros sistemas estudiados anteriormente para incrementar las capacidades del sistema Hawk para la detección de aeronaves con baja RCS, como pueden ser el maletín DJI, el AUDS-Blighter o el sistema CERVUS, es compatible con el criterio de defensa de fuerzas, es decir, se pueden llegar a implementar, pero únicamente para proteger el despliegue del sistema Hawk y dotarlo de capacidades contra UAS. La implementación como medida para capacitar al sistema con alguna mejora sustancial de capacidades es poco viable debido a que el alcance de estos sistemas es del orden de 5 a 10km, por lo que no se dispondría de una alerta lo suficientemente temprana como para poder realizar una acción ofensiva contra las aeronaves detectadas, que fundamentalmente serían drones, cuyo derribo con un misil Hawk no tendría sentido. Si que pudiera ser que alguno de estos sistemas, como podría ser el CERVUS (el más avanzado y completo de ellos), detectara alguna aeronave de mayor tamaño como cazas modernos o con tecnología furtiva o stealth¹⁷, pero el tiempo del que dispondríamos para acometer la amenaza sería muy reducido y tendríamos que estar en un nivel de alerta de combate alto para poder tener alguna posibilidad de derribar la amenaza.

Por lo tanto, aunque el sistema CERVUS pudiera implementarse al despliegue de una unidad Hawk, las capacidades que aumentarían del despliegue serían más bien capacidades de autoprotección y contra UAS más que capacidades añadidas de combate, por lo que se llega a la conclusión de que la mejor opción sería el reemplazo o actualización de los radares del sistema Hawk como medida más conveniente para aumentar las capacidades generales del sistema.

¹⁷ Caza furtivo o Stealth. Caza diseñado para absorber y desviar la radiación recibida mediante las técnicas de reducción de RCS estudiadas expuestas en este trabajo.



6. ALTERNATIVAS PARA MEJORA DEL SISTEMA

Como se ha expuesto anteriormente, la mejor forma de mejorar las capacidades del sistema Hawk es la de actualizar sus radares, bien procediendo a una mejora de estos, o bien sustituyéndolos por otro radar con mejores especificaciones o capacidades.

Teniendo en cuenta que el ET dispone de diferentes radares de búsqueda en los diferentes sistemas de armas de los que dispone, nos centraremos en buscar la mejor alternativa dentro de estos. Se procede de esta forma debido a que en el mercado existen un gran número de radares con capacidades para diferentes ámbitos, sin embargo, durante la adquisición de los radares de los que dispone el ET, se presupone que se realizó un estudio de mercado lo suficientemente amplio como para poder asumir que los radares de los que disponemos son los mejores para el ámbito en el que se utilizan. A continuación, se exponen una serie de motivos por los cuales se ha tomado esta solución:

- **Logística:** Al tratarse de radares ya implantados en el ET, ya disponemos de las capacidades de transporte, mantenimiento y gestión de estos en la estructura interna.
- **Personal:** Por el mismo motivo, existe personal ya formado tanto en operar como en mantener y reparar estos radares.
- **Estudio previo:** Durante el proceso de adquisición de los diferentes radares, se realizó un estudio extenso y se obtuvieron como mejor alternativa posible en un ámbito global, por lo tanto, ya han fueron en su momento las mejores alternativas posibles.

Para seleccionar dentro de las opciones que disponemos a la mejor alternativa posible para sustituir a los radares del sistema Hawk, se van a utilizar dos herramientas para la toma de decisiones, Radar Chart y el método AHP. Ambos se desarrollan y se exponen sus resultados a continuación.

Para la realización de ambos métodos se han tenido en cuenta los datos de alcance máximo del radar, RCS mínima, potencia de transmisión e integración, referido a si es posible integrar el radar en el sistema de defensa aérea español ADS. Se consideran éstas las características más importantes a tener en cuenta a la hora de elegir y comparar los distintos radares disponibles en el ET con los radares propios del sistema Hawk.

- **Alcance máximo:** Se ha considera esta característica como fundamental para la comparativa debido a que toda alternativa debe de cumplir con el alcance mínimo del sistema de armas. Además, mientras mayor sea el alcance de detección, mayor tiempo de reacción dispondría el sistema para combatir la amenaza.
- **RCS mínima:** Dato objeto de estudio de este trabajo, se toma como característica fundamental debido a que a menor RCS detectable por el radar, más capacidades de detección para aeronaves más modernas.
- **Integración SDA:** Esta variable se refiere a si el sistema es o no integrable en el sistema de defensa aérea español ADS. La integración de los distintos sistemas adheridos al ADS es muy importante para conseguir una comunicación entre todos los sistemas y cumplir con la defensa aérea, cada sistema en su rango de acción e interrelacionados entre sí.



- **Potencia de transmisión:** Siendo un dato técnico de los radares, se considera como variable importante a tener en cuenta debido a que los radares con mayor potencia de transmisión disponen de mayor alcance de detección, así como una mayor capacidad de detección en caso de aeronaves con medidas de reducción de RCS. Como se puede observar en la ecuación (3) de potencia recibida de un radar, la potencia de transmisión (P_t) es directamente proporcional a la potencia recibida (P_r) por el radar.

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (3)$$

- **Tiempo de despliegue:** El tiempo que tarda en entrar en posición y funcionamiento el radar es un dato que influye en la operatividad y funcionalidad de este.

Los valores tenidos en cuenta para la realización de los métodos son los valores técnicos específicos para cada radar expuestos anteriormente en la definición de cada uno de ellos en el punto 3.3.2. A modo de facilitar la búsqueda y los datos, en la tabla 8 se muestra un resumen de los valores de los criterios tenidos en cuenta para cada alternativa.

	HAWK	SENTINEL	PATRIOT	SKYDOR	RAVEN	RAC-3D
Alcance máximo	40 km	75 km	170 km	20km	100km	100km
RCS mínima	2,4 m ² (a 60km)	0,5 m ² (a 40km)	0,5 m ² (a 60km)	2 m ² (a 20km)	2,4 m ² (a 20km)	1 m ² (a 50km)
Integración SDA	SI	SI	NO	SI	SI	SI
Potencia de transmisión	20 kW	20 kW	10 kW	20kW	20kW	60kW
Tiempo de despliegue	15 minutos	15 minutos	25 minutos	30 minutos	15minutos	20 minutos

Tabla 8. Tabla de criterios tenidos en cuenta y valores de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia a partir de [2], [18], [19], [29]–[31].

Para la realización de los métodos, se han descartado de la comparativa varios radares de los modelos expuestos como son:

- La dirección de tiro Skydor. Debido a su alcance de exploración máximo de 20km, inferior al alcance del sistema Hawk de 40km.
- También se ha descartado el radar Raven debido al dato que disponemos de RCS, que es a 20km y bastante elevado, por lo que se presupone que es una peor alternativa además de ineficiente por su alcance máximo para el empleo con el sistema Hawk.
- Respecto al radar RAC-3D, por ser el radar del escalón superior (COAAAS-M), en el que va integrado el sistema Hawk, no tendría sentido que el sistema de armas tuviera el mismo radar que su escalón superior, ya que cada uno cumple con su función, por lo



tanto, el radar RAC-3D se descarta para no incurrir en duplicidad.

Por lo tanto, las alternativas que se van a comparar y tomar en consideración son las siguientes:

- **Radar Hawk:** Consideramos los datos del radar PAR debido a que es el que nos realiza la búsqueda de aeronaves con un mayor rango de altura y eficacia.
- **Radar SENTINEL:** Radar del sistema de armas NASAMS.
- **Radar PATRIOT:** Radar del sistema PATRIOT.

6.1.1. RADAR CHART

Con la finalidad de comparar las características y capacidades más importantes que nos atañen a nuestro estudio de cada uno de los radares que pudieran sustituir a los radares actuales del sistema Hawk, se ha realizado un gráfico comparativo Radar Chart (Figura 23) para evaluar de una forma visual la mejor alternativa posible. Un gráfico radar chart es un método grafico que muestra datos multivariados de forma bidimensional, mostrando valores de 3 o más variables representas en un eje que comienza desde un punto central. De esta forma, es muy fácil comparar de una forma visual los valores de los distintos criterios tenidos en cuenta para las distintas alternativas, visualizando en cada eje de criterio el valor para cada alternativa.

Para la realización del grafico se han normalizado los valores de las distintas características tenidas en cuenta a fin de que la escala fuera óptima para todas ellas, como por el ejemplo, se han multiplicado los valores de RCS mínima por 100 y se ha establecido que si el radar es integrable en el ADS se le asigna un valor de 100 y si no lo es, se le asigna un valor de 0. Los valores de tiempo de despliegue también se han multiplicado por 4 para adaptarlos a la escala del gráfico.

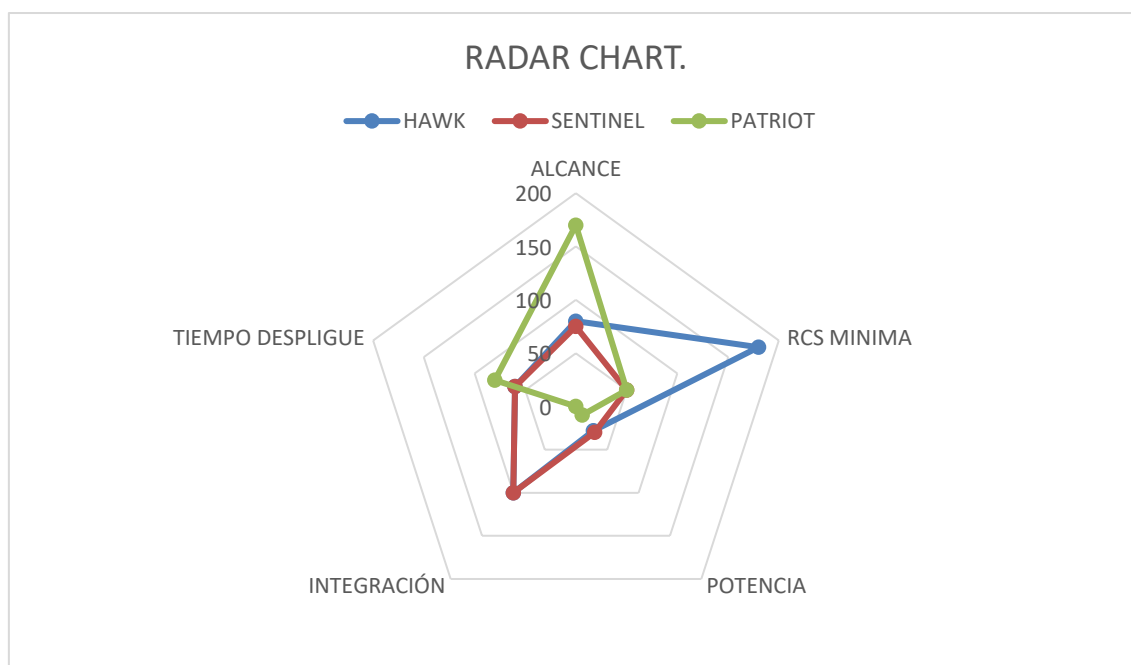


Figura 23. Radar Chart. Fuente: Elaboración propia.



Como podemos observar en el gráfico comparativo de la figura 23, la mejor alternativa basada en datos técnicos sería el radar PATRIOT. Dotaría al sistema de una mayor capacidad de detección de RCS reduciendo el umbral de 2.4 metros cuadrados a 0.5 metros cuadrados a una distancia de 60km. Además, permitiría un mayor alcance de detección de aeronaves, pasando su alcance de detección de 80km a 170km.

6.1.2. MÉTODO AHP (ANALYTIC HIERACHY PROCESS)

Método de decisión multicriterio con el que seleccionaremos entre las distintas alternativas de sustitución de los radares Hawk por los radares de dotación del ET. Es un método desarrollado por Thomas Saaty en la década de los 70 y que relaciona una serie de criterios o características de forma jerárquica entre sí, estableciendo un peso en la relación de unas con otras de forma que todas se relacionen con el resto de los criterios.

- **Etapas 1: Representación del problema.**

Para el desarrollo del método se establece primero el objetivo final que queremos conseguir, posteriormente los criterios y subcriterios que se van a tener en cuenta para la comparativa, y finalmente las alternativas disponibles que queremos comparar.

- **Objetivo:** Buscar la mejor alternativa para sustituir los radares del sistema Hawk.

Criterios: Se van a considerar los mismos criterios expuestos para el Radar Chart, los cuales son:

- Alcance máximo
- RCS mínima
- Integración SDA
- Potencia
- Tiempo despliegue
- **Subcriterios:** Al ser criterios muy específicos y no relacionados entre sí no se considera ningún subcriterio.
- **Alternativas:** Vamos a tomar como alternativas, las mismas que hemos seleccionado para el Radar Chart, por las razones explicadas anteriormente.

En la Figura 24, se puede observar un esquema con las relaciones entre las distintas alternativas y criterios con el objetivo principal, esquema que va a suponer el desarrollo del método AHP.

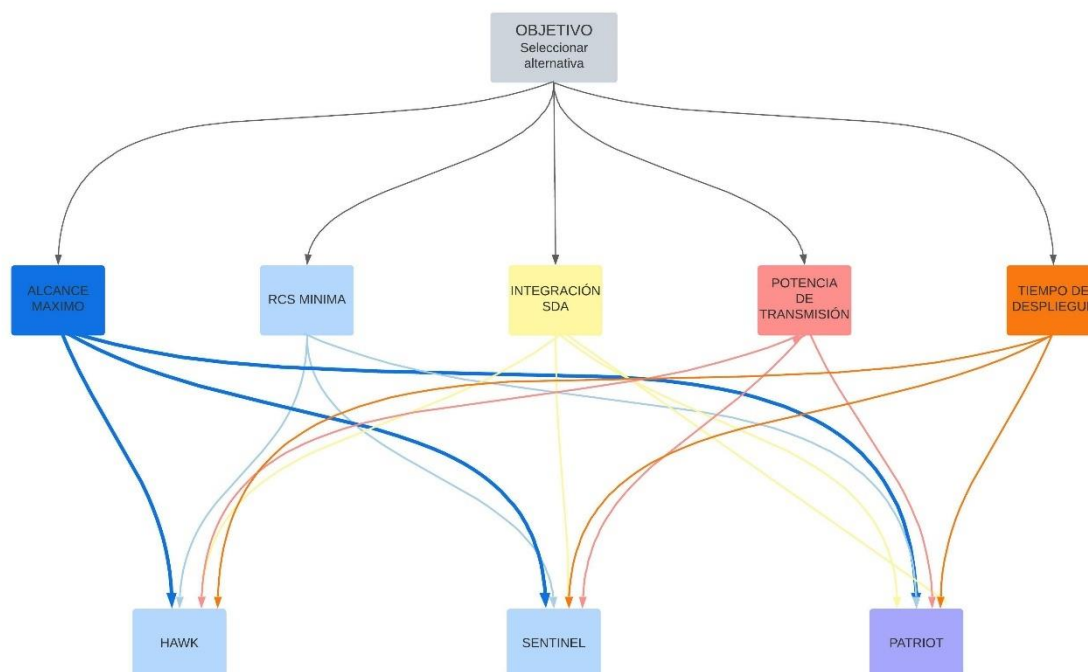


Figura 24. Esquema Relaciones AHP. Fuente: Elaboración propia a partir de [32]

El método AHP procede a la comparativa dos a dos de las distintas alternativas, para ello se utiliza una escala denominada Escala fundamental de Saaty, que nos permite pasar de criterios cualitativos a cuantitativos de tal forma que podamos comprar todos los criterios con el resto, dando un resultado mucho más objetivo y fiable. La escala Saaty se muestra en la figura 25.

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Figura 25. Escala Saaty. Fuente: [7]

Estos valores son los valores que puntúan la relación entre los dos criterios que se estén comparando. En el caso en el que el criterio B fuera el que quisiéramos prepondera respecto al A, el valor que se pondría sería el inverso del valor de la Figura 25. Por ejemplo, en el caso en el que considerásemos que el criterio B es de importancia muy grande respecto al A, el valor que habría que poner sería 1/7, el inverso a 7 que sería el valor para A importancia muy grande respecto a B.



• Etapa 2: Evaluación de los criterios.

A continuación, mediante la tabla 17 pareada expuesta en el Anexo II, se procedió a realizar un cuestionario grupal para poder comparar los criterios tenidos en cuenta para la selección de la mejor alternativa. Los valores reflejados son los obtenidos tras realizar la reunión en grupo con diferentes mandos y operadores del RAAA74 durante la realización de una jornada de instrucción continuada. En ella participaron el capitán de la batería, el teniente jefe de la sección de armas y los suboficiales y personal de tropa operadores de los distintos sistemas, un total de 10 personas. En ella se realizó un cuestionario de preferencias entre los distintos criterios para llegar a una conclusión sobre la importancia de cada criterio respecto a otro tenido en cuenta. Posteriormente se procedió a trasladar las preferencias obtenidas en esa tabla a los valores numéricos correspondientes a la escala de Saaty (Figura 25) y se reflejan en la tabla 9.

	Alcance	RCS	Integración	Potencia	Tiempo
Alcance	1	1/3	3	1/3	5
RCS	3	1	5	3	5
Integración	1/3	1/5	1	1/5	3
Potencia	3	1/3	5	1	5
Tiempo	1/5	1/5	1/3	1/5	1

Tabla 9. Tabla pareada Criterios. Fuente: Elaboración propia.

Aplicando el software de cálculo creado por la Academia de logística del ET para la automatización de cálculos del método AHP, obtenemos en la tabla 10, los cálculos del peso relativo entre cada uno de los criterios tenidos en cuenta tras haber realizado la comparación pareada entre ellos, así como la relación de inconsistencia (R.I), dato que nos da una idea de si tiene consistencia la relación de pesos que hemos obtenido entre los distintos criterios. Para la aplicación del método AHP, se considera válido proseguir con el método siempre que la relación de inconsistencia sea menor al 10%.

PESOS (W)	
0,16	
0,47	R.I 0,057
0,07	
0,26	
0,04	

Tabla 10. Tabla de relación de pesos y R.I. Fuente: Elaboración propia.

• Etapa 3: Valoración de las alternativas.

A continuación, se aplica con los datos técnicos de cada alternativa, la relación con tablas pareadas mostradas en las tablas 11 y 12, en las que se tienen en cuenta la relación de datos técnicos de cada una de las alternativas respecto a cada criterio, comparando por tanto las alternativas entre sí para cada criterio tenido en cuenta, aplicando los valores de peso prefijados por la escala Saaty. Se obtienen además los pesos proporcionales de cada una de las alternativas para cada criterio tenido en cuenta, así como la R.I para cada uno de los criterios.



ALCANCE	Hawk	Sentinel	Patriot	PESOS	R.I=0,0061
Hawk	1	1/3	1/7	0,09	
Sentinel	3	1	1/5	0,24	
Patriot	7	5	1	0,67	

INTEGRACIÓN	Hawk	Sentinel	Patriot	PESOS	R.I=0,0000
Hawk	1	1	9	0,47	
Sentinel	1	1	9	0,47	
Patriot	1/9	1/9	1	0,05	

TIEMPO	Hawk	Sentinel	Patriot	PESOS	R.I=0,0000
Hawk	1	1	5	0,45	
Sentinel	1	1	5	0,45	
Patriot	1/5	1/5	1	0,09	

Tabla 11. Tablas pareadas Alternativas/ Criterio. Fuente: Elaboración propia.

RCS	Hawk	Sentinel	Patriot	PESOS	R.I=0,0000
Hawk	1	1/7	1/7	0,07	
Sentinel	7	1	1	0,47	
Patriot	7	1	1	0,47	

POTENCIA	Hawk	Sentinel	Patriot	PESOS	R.I=0,0567
Hawk	1	3	1/5	0,19	
Sentinel	1/3	1	1/7	0,08	
Patriot	5	7	1	0,72	

Tabla 12. Tablas pareadas Alternativas/ Criterio. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas 11 y 12, las R.I de cada una de las tablas referida a cada criterio son inferiores al 10% comentado como tope para reconsiderar los valores asignados, por lo tanto, se continua con la aplicación del método.

Etapa 4: Jerarquización de las alternativas.

Finalmente, se realiza una jerarquización de las alternativas con el software utilizado, que nos realiza los cálculos correspondientes teniendo en cuenta todos los pesos relativos. Se obtiene la tabla de decisión 13 que refleja la media ponderada para cada alternativa considerada.

CRITERIOS	PESOS	HAWK	SENTINEL	PATRIOT
Alcance	0,16	0,09	0,24	0,67
RCS	0,47	0,07	0,47	0,47
Integración	0,07	0,47	0,47	0,05
Potencia	0,26	0,19	0,08	0,72
Tiempo	0,04	0,45	0,45	0,09
		0,15	0,33	0,52

Tabla 13. Tabla de jerarquización de alternativas. Fuente: Elaboración propia.



Como se puede observar en la tabla 13 en color de celda rojo, tras la aplicación del método AHP con el software aplicado, obtenemos como resultado final que la mejor alternativa de forma objetiva sigue siendo el sustituir el radar Hawk por el radar PATRIOT, al igual que el resultado obtenido al utilizar el RADAR CHART.



7. CONCLUSIONES

Expuestos los objetivos del trabajo en el punto 2.1, el principal objetivo del trabajo era el analizar las capacidades del sistema HAWK en cuanto a detección de aeronaves de baja firma radar, siendo objetivos secundarios el analizar algunos sistemas de mejora de estas capacidades, como pudieran ser la implementación de sistemas de detección más avanzados o estudiar la posibilidad de cambiar los radares de detección por alguno de los radares disponibles en otros sistemas de armas del ET. Para alcanzar los objetivos marcados inicialmente se han procedido a realizar las tareas que se exponen a continuación.

- Se ha definido el sistema HAWK y sus elementos principales, así como la sección recta radar, sus formas de cálculo y métodos actuales de reducción de su valor para dificultar su detección.
- Se han realizado y analizado experiencias sobre las capacidades del sistema HAWK en cuanto a detección de baja firma radar, exponiendo los resultados obtenidos durante un ejercicio de tiro con blancos aéreos por parte del RAAA 74 en 2020, y el análisis por mi parte de las capacidades del sistema durante la realización de una jornada de instrucción continuada con la colaboración de cazas Eurofighter del EA.
- Se han obtenido los problemas y deficiencias del sistema HAWK a través de una entrevista grupal con miembros experimentados del RAAA 74, realizando un análisis DAFO en el que se exponen las mismas.
- Se han estudiado y analizado las posibles implementaciones que se le pudieran hacer al sistema para mejorar sus capacidades añadiéndole sistemas de medida o detección de firma radar más avanzados disponibles en el mercado civil y en las Fuerzas Armadas.
- Se ha estudiado la alternativa de sustituir los radares de detección del sistema HAWK por otro de los radares disponibles en ET en otros sistemas de armas, realizándose una encuesta grupal a los integrantes de la 4ª batería del RAAA74, mandos y operadores experimentados del sistema HAWK, para obtener los criterios más idóneos a tener en cuenta para sustituir estos radares. De la misma forma se obtuvo una comparativa pareada sobre los pesos relativos de estos criterios a tener en cuenta, para obtener el nivel de importancia de cada uno ellos.
- Posteriormente, teniendo en cuenta los criterios obtenidos, se ha realizado un método esquemático de comparación de alternativas (Radar Chart) y un método de selección multicriterio (AHP) para obtener la mejor alternativa posible en el caso de que fuese ventajoso la sustitución de los radares HAWK.

Tras todos los análisis realizados, se ha llegado a la conclusión de que las capacidades del sistema HAWK en cuanto a la detección de amenazas con baja RCS han quedado reducidas tras el paso de los años, a pesar de los distintos programas de mejora que ha ido sufriendo el sistema debido, en gran parte, a que el sistema fue diseñado inicialmente con unas características que no predecían el gran avance tecnológico que han sufrido los métodos de reducción de la firma radar y su importancia.

En cuanto a las posibles implementaciones al sistema para mejorar sus capacidades, se ha comprobado que éstas no supondrían una mejora sustancial en las capacidades del sistema en el aspecto de firma radar que nos atañe, ya que gran parte de estos sistemas están enfocados a la detección de UAVs. Por lo tanto, su alcance de detección es muy reducido con respecto al alcance efectivo del sistema HAWK, por lo que fundamentalmente dotarían al sistema de un nivel



mayor de autoprotección cercana, pero no incrementarían su función y capacidades de detectar aeronaves a 100 km de distancia o derribarlas a 40 km.

Respecto a la posible sustitución de los radares de búsqueda HAWK, tras aplicar los distintos métodos de comparación y selección, se ha llegado a la conclusión de que sustituir los radares HAWK por el radar PATRIOT supondría una mejora sustancial de las capacidades de detección del sistema en el ámbito de la firma radar, al ser este radar más moderno y capaz, incrementado además el alcance de detección.

Como línea futura de acción se propone por lo tanto esta sustitución, siendo viable en aspectos expuestos como son los logísticos, al disponer de los medios de transporte y mantenimiento ya instaurados en la cadena logística, el aspecto de personal, al disponer de personal ya instruido en operar y mantener este radar, y en criterios de estudio previo, al haber sido estudiada la viabilidad de la adquisición ya realizada para el sistema de armas PATRIOT.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carlos Martí Sempere, «Tecnología de la defensa. Análisis de la situación española», UNED, 2006.
- [2] Mando de Adiestramiento y Doctrina, «Manual del sistema Hawk», 2006.
- [3] Christian Wolff, «Radar Cross-Section - Radartutorial». <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Cross%20Section.en.html> (accedido oct. 26, 2022).
- [4] «Materiales Absorbentes Radar | Micromag». <https://www.micromag.es/es/radar-absorbing-materials-es/> (accedido oct. 26, 2022).
- [5] D. Izquierdo Núñez, «Sistemas Radar», Zaragoza, 2021.
- [6] «Qué es un gráfico de radar y ejemplos». <https://www.edrawsoft.com/es/radar-chart/> (accedido nov. 25, 2022).
- [7] «AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST - PrevenControl». <https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/> (accedido oct. 26, 2022).
- [8] Academia de Logística del ET., «Software AHP». Madrid.
- [9] RAAA 74, «Curso Básico Operador HAWK», 2022.
- [10] «Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook - Radar Cross Section (RCS) - RF Cafe». <https://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/radar-cross-section.htm> (accedido oct. 26, 2022).
- [11] Uandha Fernandes Barbosa, «Typical Radar Cross Section Signature (EMCOS-Consulting and Software). | Download Scientific Diagram». https://www.researchgate.net/figure/Typical-Radar-Cross-Section-Signature-EMCOS-Consulting-and-Software_fig4_312040564 (accedido oct. 26, 2022).
- [12] «Radar Cross Section (RCS) Measurement and Evaluation System». <https://www.keycom.co.jp/emap/xrc.html> (accedido oct. 26, 2022).
- [13] «Medida de Antenas y Firma Radar». https://www.inta.es/INTA/en/servicios/Area_AeronauticaDefensaEnsayos_Equipos_SistemasEspacioGrupoEnsayosRadiofrecuenciaTerrestreTerrestre_Ensayos_SGSE-9/# (accedido oct. 26, 2022).
- [14] Sara Mateo Larrambe, «ESTRUCTURA PARA LA REDUCCIÓN DE LA SECCIÓN RECTA RADAR», Universidad de Navarra, 2013. Accedido: oct. 26, 2022. [En línea]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/7548/578085.pdf?sequence=1>
- [15] J. F. Pérez Ojeda, J. L. Rodríguez, I. García-Tuñón, y F. Obelleiro, «Experimental



- verification of the relation between the radar cross section and the list angle of surface vessels», *Microw Opt Technol Lett*, vol. 48, n.º 11, pp. 2237-2241, nov. 2006, doi: 10.1002/MOP.21932.
- [16] Defensa.com, «El nuevo sistema de control de firma radar de la Armada-noticia defensa.com - Noticias Defensa España», 2016, Accedido: oct. 26, 2022. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/nuevo-sistema-control-firma-radar-armada>
- [17] «El RAAA 73 lidera en Motril la Unidad de Defensa Aérea - Ejército de tierra». <https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Murcia/raaa73/Noticias/2017/010.html> (accedido oct. 26, 2022).
- [18] «Raytheon MPQ-64F1 Improved Sentinel Radar – NASAMS – Kongsberg Defence and Aerospace - Kongsberg Defence & Aerospace». <https://www.kongsberg.com/kda/what-we-do/defence-and-security/integrated-air-and-missile-defence/nasams-air-defence-system/raytheon-mpq64f1-sentinel-radar/> (accedido oct. 26, 2022).
- [19] «AN/MPQ-53 | Military.com». <https://www.military.com/equipment/an-mpq-53> (accedido oct. 26, 2022).
- [20] «Fundamentos de radar - RAVEN». <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/11.ancient/karte034.es.html> (accedido oct. 26, 2022).
- [21] «Dirección de tiro Skydor - Ejército de tierra». https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/artilleria_antiaerea/direcciondetiroskydor.html (accedido oct. 26, 2022).
- [22] Cte Jesús Ignacio Rodríguez Olmedo, «Revista Ejercito 962», *Proyecto CERVUS*, jun. 2021. https://publicaciones.defensa.gob.es/pprevistas/REVISTAS_PAPEL22294/page_94.html (accedido oct. 26, 2022).
- [23] «DJI AEROSCOPE, sistema de detección de drones», <https://www.multicoptero.com/es/tienda-on-line/dji-enterprise/dji-aeroscope-sistema-de-deteccion-de-drones/dji-aeroscope-sistema-de-deteccion-de-drones-2/>.
- [24] «DJI AeroScope: el mejor sistema de detección de drones - México». <https://www.hobbytuxtla.com/sistemas-antidrones/dji-aeroscope/> (accedido oct. 26, 2022).
- [25] «AUDS Anti-UAV Defence System - Counter-UAS - C-UAS - Blighter». <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/> (accedido oct. 26, 2022).
- [26] Capitán Jaime García Guerrero, «Informe post-ejercicio tiro 2020», Sevilla, 2020.
- [27] SCR Control Remoto, «Blancos Aéreos». <https://scrdrone.com/target-drones-blancos-aereos/> (accedido oct. 26, 2022).



- [28] Ministerio de Defensa, «Eurofighter Typhoon», *Ejercito del Aire*. <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/aeronaves/avion/Eurofighter-Typhoon-C.16/> (accedido oct. 26, 2022).
- [29] Mando de adiestramiento y doctrina., «MT-016 Dirección de tiro SKYDOR», 2004.
- [30] Mando de adiestramiento y doctrina, «MI6-342 Radar RAVEN sistema COAAAS-L», 2008.
- [31] Mando de adiestramiento y doctrina, «MI-301 Radar RAC-3D del sistema COAAASM», 2015. [En línea]. Available: http://madoc.mdef.es:5500/Apli/D_BibliotecaVirtual.nsf/InicioWeb
- [32] «Lucidspark: Una pizarra virtual para colaboración en tiempo real». https://lucidspark.com/es?gclid=Cj0KCQjwteOaBhDuARIsADBqReiowoaDMb--jQ5zrbQBqk3lB7eKAiZnBpfvo_OSdQrx9EKoTTKR7WcaAsB5EALw_wcB&km_CPC_AdGroupID=56488588774&km_CPC_AdPosition=&km_CPC_CampaignId=1487565747&km_CPC_Country=1005548&km_CPC_Creative=284415987027&km_CPC_Device=c&km_CPC_ExtensionID=&km_CPC_Keyword=lucidchart&km_CPC_MatchType=e&km_CPC_Network=g&km_CPC_TargetID=kwd-33511936169&km_CPC_placement=&km_CPC_target=&utm_campaign=_chart_es_tier1_mixed_search_brand_exact_&utm_medium=cpc&utm_source=google (accedido oct. 26, 2022).
- [33] «Banshee Whirlwind™ Unmanned Aerial Target by QinetiQ». <https://www.qinetiq.com/en/what-we-do/services-and-products/banshee-whirlwind> (accedido oct. 26, 2022).
- [34] «Los límites entre el campo cercano y el campo lejano - Consultoría en Compatibilidad Electromagnética CEM y marcado CE», 2016. <https://www.cemdal.com/2016/09/04/los-l%C3%ADmites-entre-el-campo-cercano-y-el-campo-lejano/> (accedido oct. 26, 2022).



Anexo I BLANCOS AÉREOS

- **Blanco aéreo SCRAB**

Diseñados por la empresa española SCR (Sistemas de Control Remoto)[27], los blancos aéreos Scrab (Figura 26) han ido evolucionando a lo largo de los años pasando por sus distintas variantes, la I, la II y la III actual. Los Scrab son blancos aéreos propulsados por turbina, lo que les permite alcanzar cotas de altura y velocidades de vuelo más semejantes a algunos tipos de aeronaves objetivo.

Las características técnicas del modelo actual, el Scrab III, se detallan en la tabla 14.



Figura 26. Modelo Scrab III. Fuente: www.scrdrones.com

SCRAB III	
<i>Envergadura</i>	<i>2000 mm</i>
<i>Longitud</i>	<i>3130 mm</i>
<i>Peso máximo al despegue</i>	<i>140 kg</i>
<i>Motorización</i>	<i>Doble turbina</i>
<i>Techo operativo</i>	<i>8000 m</i>
<i>Alcance</i>	<i>100 km</i>
<i>Velocidad máxima</i>	<i>725 km/h</i>
<i>Autonomía</i>	<i>60 min</i>

Tabla 14. Especificaciones técnicas Scrab III. Fuente: [27]



Las especificaciones de los modelos I y II son inferiores en cuanto a velocidad, techo de vuelo y autonomía a las del modelo III.

- **Blanco ALBA**

El blanco Alba (Figura 27) es un pequeño blanco aéreo fabricado por SCR muy fiable y flexible, permitiéndole adaptarse para ser enfrentado con varios sistemas de armas diferentes. Las especificaciones técnicas del aparato se muestran en la tabla 15.

ALBA	
<i>Envergadura</i>	<i>2200 mm</i>
<i>Longitud</i>	<i>1800 mm</i>
<i>Peso máximo al despegue</i>	<i>25 kg</i>
<i>Motorización</i>	<i>Combustión</i>
<i>Techo operativo</i>	<i>3500 m</i>
<i>Alcance</i>	<i>60 km</i>
<i>Velocidad máxima</i>	<i>180 km/h</i>
<i>Autonomía</i>	<i>60 min</i>

Tabla 15. Especificaciones técnicas ALBA. Fuente: [27]



Figura 27. Blanco Aéreo ALBA. Fuente: [27]



- **Banshee Qinetiq**

Blanco aéreo [33] (Figura 28) desarrollado por la empresa Qinetiq en la década de los 80, con el objetivo de simular el vuelo de UAVs y poder realizar instrucción y entrenamiento con los sistemas antiaéreos ingleses de la época.



Figura 28. Blanco aéreo Banshee. Fuente: [33]

Las especificaciones técnicas de este modelo se exponen en la tabla 16.

BANSHEE	
Envergadura	2490 mm
Longitud	2850 mm
Peso máximo al despegue	74 kg
Motorización	Motor ala rotatoria
Techo operativo	6000 m
Alcance	>100 Km
Velocidad máxima	360 km/h
Autonomía	90 min

Tabla 16. Especificaciones técnicas modelo Banshee. Fuente: [33]



Anexo II Método AHP

En este anexo se exponen las capturas de pantalla del software utilizado para desarrollar el método AHP. Se muestran las diferentes tablas que se han ido rellenando en los pasos de desarrollo del método, en función de los valores obtenidos en la entrevista y cuestionario grupal (Tabla 22), y con la comparativa de los datos técnicos de los distintos radares tomados en consideración.

- **Etap 1: Comparativa de pesos de los criterios.**

En esta etapa, mediante la realización de una entrevista y cuestionario grupal, se obtuvo la importancia relativa de los criterios expuesta en la tabla 17.

	Importancia extrema	Mucho mas importante	Mas importante	Ligeramente mas importante	Igual importancia	Ligeramente mas importante	Mas importante	Mucho mas importante	Importancia extrema	
Alcance						X				RCS
RCS			X							Integración
Integración							X			Potencia
Potencia			X							Tiempo
Tiempo							X			Alcance
Alcance				X						Integración
Potencia			X							Alcance
RCS				X						Potencia
Tiempo							X			RCS
Integración				X						Tiempo

Tabla 17. Etapa 1. Comparativa de peso de los criterios. Fuente: Elaboración propia.

- **Etap 2: Evaluación de criterios.**

En esta etapa se les dan valores numéricos a las valoraciones obtenidas tras la comparativa de criterios en la etapa 1, como se puede ver en la Figura 29. Se obtienen los pesos relativos de cada criterio, así como su razón de incongruencia, calculadas por el software.

Evaluación de CRITERIOS						Escala de SAATY	
CRITERIOS	ALCANCE	RCS	INTEGRACIÓN	POTENCIA	TIEMPO	PESOS(W)	Valor Definición
ALCANCE	1	1/3	3	1/3	5	0,16	1 a - Igual Importancia
RCS	3	1	7	3	9	0,47	3 b - Importancia Moderada v 1/3
INTEGRACI...	1/3	1/7	1	1/5	3	0,07	5 c - Importancia Grande v 1/5
POTENCIA	3	1/3	5	1	5	0,26	7 d - Importancia Muy Grande v 1/7
TIEMPO	1/5	1/9	1/3	1/5	1	0,04	9 e - Importancia Extrema v 1/9

R.I. : 0,0570

Calcular

< Volver Datos AHP

Figura 29. Etapa 2, evaluación de criterios. Fuente: Software AHP.



- **Etapla 3: Evaluación de alternativas.**

En esta etapa (Figura 30) se hace la valoración de las alternativas en cuanto a los criterios tenidos en cuenta en función de los datos técnicos de los radares.

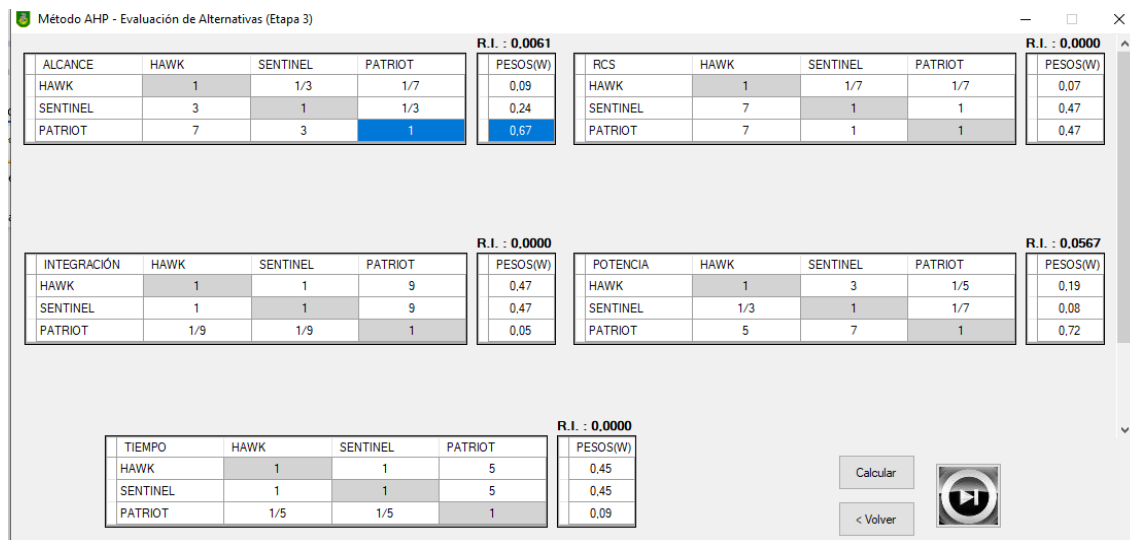


Figura 30. Etapa 3. Evaluación de alternativas. Fuente: Software AHP.

Se obtienen mediante el software la R.I. para cada uno de los criterios para comprobar si la relación y valoración tiene sentido.

- **Etapla 4: Jerarquización de las alternativas.**

En esta etapa se obtiene la jerarquización de las alternativas, dando como resultado como se puede ver en la figura 31, que el radar PATRIOT sería la mejor alternativa posible a los radares del sistema HAWK.

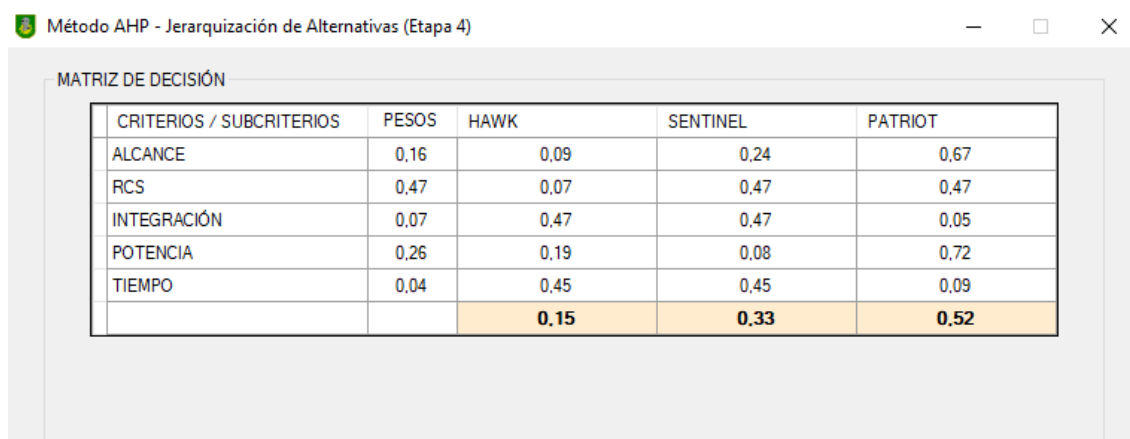


Figura 31. Etapa 4: Jerarquización de las alternativas. Fuente: Software AHP.