



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

CAPACIDADES DE LOS MEDIOS DISPONIBLES C-UAS FRENTE A LA AMENAZA DE LOS ENJAMBRES DE DRONES

Autor

Caballero Alférez Cadete D. Sergio Sánchez Díaz

Directores

Director académico: Dr. D. Óscar de la Iglesia Pedraza

Director militar: Comandante D. Julián David Alcázar López

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

Año en el que se ha depositado

2022

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a mi director académico el Dr. D. Óscar de la Iglesia Pedraza, por su constante dedicación e inmensa implicación en el desarrollo de este trabajo. Agradecer también la atención prestada a mi director militar el Cte. D Julián David Alcázar López y a todo el personal implicado del Regimiento de Artillería Antiaérea nº73, en especial a la 2ª Batería del Grupo I/73 por su gran acogida y ayuda durante la realización de las prácticas externas.

Por último quería dar las gracias al Tte. D. Adrián Sánchez Carrillo por su atención y ayuda a la hora de desarrollar las prácticas y en especial a la Cap. Dña. Natalia Eugenia Gómez Gabás por su total disposición y dedicación en el desarrollo este trabajo y por su entera preocupación y atención durante el transcurso de las prácticas, que para mí fue algo fundamental.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. MOTIVACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE	3
1.4. METODOLOGÍA	3
1.5. ÁMBITO DE APLICACIÓN	3
2. SISTEMAS C-UAS ACTUALES	4
2.1. CICLO DE DEFENSA C-UAS	4
2.2. LA AMENAZA DE LOS UAS	6
2.2.1. ENJAMBRE DE UAS	7
2.3. TECNOLOGÍAS PARA LA DETECCIÓN E IDENTIFICACIÓN	9
2.3.1. SISTEMAS DE DETECCIÓN	9
2.3.2. SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN	9
2.3.3. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN	10
2.4. TECNOLOGÍAS PARA LA NEUTRALIZACIÓN	11
2.4.1. SISTEMAS HARD KILL	11
2.4.2. SISTEMAS <i>SOFT KILL</i>	12
2.4.3. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE NEUTRALIZACIÓN	13
3. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN	14
3.1. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS	14
3.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO	15
4. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN	19
4.1. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS	19
4.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO	20
5. PROPUESTA DE MEJORAS Y DE SISTEMA C-UAS	24
6. CONCLUSIONES	27
7. BIBLIOGRAFÍA	28
ANEXO A	31
ANEXO B	35
ANEXO C	38
ANEXO D	39

RESUMEN

Durante décadas, los ejércitos se han enfrentado a amenazas aéreas de gran tamaño como aviones, helicóptero y misiles. Sin embargo, como se ha podido comprobar en numerosos conflictos internacionales, en los últimos años se ha incrementado el uso de los sistemas aéreos no tripulados de pequeño tamaño o UAS (de *unmanned aerial system*) como un arma hostil, pudiendo además actuar conjuntamente en forma de enjambre. Ante esta amenaza se han ido desarrollando sistemas adecuados para contrarrestarlos, que se denominan medios C-UAS (de *counter unmanned aerial system*).

En los últimos años, desde el Ministerio de Defensa se han realizado diversos informes en los que se considera prioritaria la defensa C-UAS tanto de forma individual como en forma de enjambre. Por tanto, este TFG surge de la necesidad que tienen las Fuerzas Armadas de analizar las capacidades de los medios C-UAS existentes en dotación, con el fin de saber si se dispone de sistemas que permitan realizar una defensa eficaz frente a esta amenaza.

El objetivo principal de este TFG es analizar las capacidades de los medios C-UAS disponibles en las unidades del ET en comparación con otros sistemas que hay actualmente en el mercado. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica sobre el tema. Posteriormente se han llevado a cabo dos encuestas a personal experto con el fin de evaluar la importancia de las características de los sistemas de detección y de neutralización de UAS. Como resultado de esta encuesta se ha determinado cuáles son las características más importantes que deben poseer de los sistemas de estos sistemas para poder hacer frente a los UAS en enjambre.

Por otra parte, se ha utilizado un análisis multicriterio ponderado normalizado para evaluar las capacidades de varios sistemas de detección y neutralización, tanto en dotación en el Ejército de Tierra como comerciales, para detectar y neutralizar los enjambres. En esta metodología se combina la valoración dada por los expertos a las diferentes características en la encuesta con los datos técnicos de cada sistema.

De los resultados obtenidos en estos análisis se puede apreciar que los sistemas existentes en dotación son los que peores capacidades tienen, por lo que no serían eficaces para el combate contra UAS en enjambre. Por otra parte, los sistemas mejor valorados y, por tanto, los más eficaces, son el sistema ARMS de Indra seguido del AUDES Blighter. Ambos sistemas integran excelentes capacidades de detección y de neutralización, por lo que serían capaces de hacer frente a un enjambre de UAS.

A través de este estudio se ha hecho una propuesta de mejora, en la que el aspecto más importante sería la adquisición del sistema ARMS de Indra, que es el sistema más eficaz y completo en la lucha contra los UAS, ya que además de integrar en un mismo dispositivo las capacidades más importantes como la detección y la neutralización de esta amenaza, es capaz de hacerlo cuando la amenaza es numerosa y actúa conjuntamente. Además de eso, se debería fomentar la formación del personal para capacitarle en el uso y mantenimiento de estos sistemas.

ABSTRACT

For decades, armies have fought against big aerial threats such as planes, helicopters and missiles. However, as we have been seen in numerous international conflicts, in recent years the use of small unmanned aerial systems (UAS) has increased as a hostile weapon, and also can act jointly in a swarm form. Faced with this threat, adequate systems have been developed to counter them, which are called C-UAS (counter unmanned aerial system) means.

In recent years, the Ministry of Defence has produced various reports in which C-UAS defence is considered a priority, both individually and in the form of a swarm. Therefore, this Final Degree Project arises from the need for the Armed Forces to analyse the capabilities of the C-UAS systems already acquired, in order to know if there are systems that can carry out an effective defence against this threat.

The main objective of this Final Degree Project is to analyse the capabilities of the C-UAS devices available in the Armed Forces in comparison with other systems currently on the market. To do this, at first, a bibliographic review on the subject has been carried out. Subsequently, two surveys of expert personnel were carried out in order to assess the importance of the characteristics of the UAS detection and neutralization systems. As a result of this survey, it has been determined which are the most important characteristics that these systems must have in order to fight against swarms of UAS.

For this, an extensive bibliographic review has been carried out and after that a methodology based on a survey of expert personnel in the field to evaluate the most important characteristics that systems must have to be able to detect and neutralize swarms and an analysis based on the normalized method for multi-criteria decision, to decide which system could be the most efficient when carrying out this mission.

On the other hand, a multi-criteria analysis has been used to evaluate the capabilities of various detection and neutralization systems, both in personnel in the Army and commercial, to detect and neutralize swarms. This methodology combines the assessment given by the experts to the different characteristics in the survey with the technical data of each system.

From the results obtained in these analyses, it can be seen that the existing systems provided are the devices with the worst capabilities, so they would not be effective for combat against swarming UAS. On the other hand, the best valued systems and, therefore, the most effective, are Indra's ARMS system followed by AUDS Blighter. Both systems integrate excellent detection and neutralization capabilities, so they would be able to fight against a swarm of UAS.

Through this study, a proposal for improvement has been made, in which the most important aspect would be the acquisition of Indra's ARMS system, which is the most effective and complete system in the fight against UAS, because it integrates in the same device the most important capabilities such as the detection and neutralization of this threat, and it is also capable of doing it when the threat is numerous and acts together. In addition to that, the training of personnel should be encouraged to prepare them in the use and maintenance of these systems.

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación UAS OTAN [7, 8, 9]</i>	6
<i>Tabla 2. Características de los sistemas de detección</i>	11
<i>Tabla 3. Características de los sistemas de neutralización</i>	13
<i>Tabla 4. Resultados de la encuesta para los sistemas de detección</i>	15
<i>Tabla 5. Prioridad de las características de los sistemas de detección</i>	15
<i>Tabla 6. Valores y recorridos de las características de los sistemas de detección</i>	16
<i>Tabla 7. Ponderación total de las características de los sistemas de detección</i>	18
<i>Tabla 8. Resultados de la encuesta para los sistemas de neutralización</i>	20
<i>Tabla 9. Prioridad de las características de los sistemas de neutralización</i>	20
<i>Tabla 10. Valores y recorridos de las características de los sistemas de neutralización</i>	21
<i>Tabla 11. Ponderación total de las características de los sistemas. de neutralización</i>	23
<i>Tabla 12. Características generales del radar RAC-3D</i>	31
<i>Tabla 13. Características generales del radar Sentinel</i>	31
<i>Tabla 14. Características generales del radar AN/MPQ 52</i>	32
<i>Tabla 15. Características generales del sistema AUDS Blighter</i>	33
<i>Tabla 16. Características generales del sistema DJI Aeroscope</i>	33
<i>Tabla 17. Características generales de la ametralladora MG4</i>	35
<i>Tabla 18. Características generales de la ametralladora MG 42</i>	35
<i>Tabla 19. Características generales del cañón de AAA 35/90 GDF-007</i>	36
<i>Tabla 20. Características generales del sistema Drone Defender</i>	36
<i>Tabla 21. Características generales del sistema ASDT Sendes HD-02</i>	37
<i>Tabla 22. Características generales del sistema AUDS Blighter</i>	37

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ciclo de defensa C-UAS [5]</i>	4
<i>Figura 2. UAS de clase I [11]</i>	7
<i>Figura 3. Elementos de detección ARMS [20]</i>	24
<i>Figura 4. Elementos de identificación y seguimiento ARMS [20]</i>	25
<i>Figura 5. Elementos de neutralización ARMS [20]</i>	25
<i>Figura 6. Esquema del funcionamiento de la neutralización del sistema ARMS [20]</i>	26
<i>Figura 7. RAC-3D [21]</i>	31
<i>Figura 8. Radar Sentinel [22]</i>	32
<i>Figura 9. Radar AN/MPQ 52 [23]</i>	32
<i>Figura 10. Sistema AUDES Blighter [24]</i>	33
<i>Figura 11. Sistema DJI Aeroscope [25]</i>	34
<i>Figura 12. Ametralladora MG4 [26]</i>	35
<i>Figura 13. Ametralladora MG 42 [27]</i>	35
<i>Figura 14. Cañón de AAA 35/90 GDF-007 [28]</i>	36
<i>Figura 15. Sistema Drone Defender [29]</i>	36
<i>Figura 16. Sistema ASDT Sendes HD-02 [30]</i>	37
<i>Figura 17. Sistema AUDES Blighter [24]</i>	37
<i>Figura 18. Munición AHEAD [31]</i>	38
<i>Figura 19. Efectos de la munición AHEAD [31]</i>	38
<i>Figura 20. Momento de la liberación de los subelementos de la munición AHEAD [32]</i>	38

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AAA	-	Artillería Antiaérea
AD	-	Air Defense
AHEAD	-	Advanced Hit Efficiency And Destruction
BLOS	-	Beyond Line Of Sight
C2	-	Command and Control
CESEDEN	-	Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional
C-UAS	-	Counter Unmanned Aerial System
DAA	-	Defensa Antiaérea
ECM	-	Electronic Counter Measure
EO	-	Electroóptico
EW	-	Electronic Warfare
HEL	-	High Energy Laser
HPEW	-	High Power Electromagnetic Wave
HPM	-	High Power Microwave
HVE	-	High Visibility Events
IED	-	Improvised Explosive Device
IFF	-	Identification Friend or Foe
LIDAR	-	Laser Imaging Detection and Ranging
LOS	-	Line Of Sight
LSS	-	Low Slow Small
RCS	-	Radar Cross Section
RF	-	Radiofrecuencia
THEL	-	Tactical High Energy Laser
UAS	-	Unmanned Aerial System
UAV	-	Unmanned Aerial Vehicle



1. INTRODUCCIÓN

Esta memoria muestra los resultados del Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería de Organización Industrial, impartido por el Centro Universitario de la Defensa en la Academia General Militar realizado por el CAC Sergio Sánchez Díaz.

Este trabajo ha sido desarrollado en el Regimiento de Artillería Antiaérea nº 73 (RAAA 73), con plaza en el Acuartelamiento Tentegorra (Cartagena, Murcia).

1.1. Antecedentes

Según las publicaciones doctrinales del Mando de Adiestramiento y Doctrina, la defensa aérea (AD, de *air defence*) es el conjunto de medidas y procedimientos diseñados para reducir o anular la eficacia de las acciones hostiles en el ámbito aéreo. Las formas de combatir las amenazas son muy diversas, tales como: medidas de guerra electrónica (EW, de *electronic warfare*), o defensa proporcionada por medios aéreos y/o medios de superficie, entre otras. La contribución de las unidades de superficie a la AD es lo que se denomina Defensa Antiaérea (DAA). Esta misión es llevada a cabo principalmente por las unidades de Artillería Antiaérea (AAA). Tradicionalmente, los ejércitos se han enfrentado a las amenazas aéreas convencionales, como pueden ser por ejemplo los aviones de combate, helicópteros, misiles balísticos y de crucero. Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el uso de los sistemas aéreos no tripulados o UAS (de *unmanned aerial system*) como un arma hostil, mostrándose muy eficaces a la hora de causar daños. Ante esta amenaza se han ido desarrollando sistemas adecuados para contrarrestarlos, que se denominan medios C-UAS (de *counter unmanned aerial system*).

Un ejemplo del uso de estos sistemas es el conflicto por el dominio de la región de Nagorno Karabaj entre Armenia y Azerbaiyán. Uno de los territorios más antiguos de lo que fuera la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas. Los enfrentamientos se volvieron a recrudecer a finales del mes de septiembre de 2020. A su finalización, con la firma del alto el fuego forzado por el líder ruso Putin, en noviembre de 2020, se pudo ver que la gran derrotada fue Armenia. Esto fue debido al empleo y la eficacia por parte de Azerbaiyán de los UAS procedentes de Turquía¹, los azerbaiyanos fueron capaces de abatir objetivos en profundidad de gran valor como puestos de mando, unidades logísticas y de abastecimiento, zonas de reunión, sistemas de lanzamiento de cohetes, sistemas de defensa aérea y de EW, y numerosos carros de combate además de las innumerables bajas personales. A todo esto hay que sumarle también la contribución de los UAS en cuanto a inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento, que permiten realizar ataques con otros sistemas de armas. El éxito del ejército de Azerbaiyán se vio favorecido por los poco desarrollados medios C-UAS de los armenios, lo que pone de manifiesto la gran vulnerabilidad de las unidades terrestres que no disponen de este tipo de medios [1].

Por otra parte, el gran avance de la tecnología en el ámbito de estos sistemas ha desembocado en el desarrollo de dispositivos cada vez más pequeños, los UAS LSS (de *low slow small*). Las especiales características de estos sistemas hacen muy difícil su detección, identificación, seguimiento y neutralización. Además, los UAS LSS pueden trabajar de forma conjunta en forma de enjambres, siendo todavía más peligrosos. El impacto de esta amenaza se hizo patente en marzo de 2020 durante la guerra civil de Libia, donde la ONU informó de un ataque llevado a cabo por el ejército del primer ministro libanés reconocido por la ONU (Faiez Serraj) con vehículos aéreos no tripulados y autónomos hacia personas [2, 3]. En ese caso se utilizó un enjambre de UAS tipo STM Kargu-2.

¹ UAS para misiones de inteligencia y de ataque, los Bayraktar TB-2.



La amenaza de los enjambres de UAS es cada vez más inquietante. Por ejemplo, el STM Kargu-2 es capaz de llevar a cabo ataques contra objetivos estáticos o dinámicos gracias a su capacidad de procesamiento de imágenes en tiempo real (disponen de cámaras de vídeo, de infrarrojo y de sistema LIDAR²) y a los algoritmos de aprendizaje automático que lleva integrados.

Por lo explicado hasta ahora resulta evidente que los UAS, sobre todo en forma enjambre (*swarm*), son ya una amenaza real, suponiendo una ventaja estratégica frente a aquel que no disponga de medios para contrarrestarlo. Por tanto, es necesario desarrollar medidas eficaces para combatirlos. Mientras no se disponga de medidas C-UAS adecuados, los ejércitos deben adoptar medidas de protección pasivas tales como la decepción, el enmascaramiento y la ocultación.

1.2. Motivación

Las unidades de Artillería Antiaérea del Ejército de Tierra disponen de medidas C-UAS, pero no para hacer frente a los UAS LSS en forma de enjambre. Es por esto por lo que en los últimos años varias publicaciones del ámbito del Ministerio de Defensa han señalado esta amenaza. En diciembre del año 2017 la Célula Nacional Contra IED³ (CENCIED) realizó una propuesta de Problema Militar Operativo⁴ sobre el empleo de los UAS armados. Según el citado documento:

“Las Fuerzas Armadas no cuentan con un conjunto de capacidades, ni procedimientos estandarizados que permitan a sus unidades e instalaciones detectar, identificar y derrotar la amenaza que supone el empleo de UAS LSS.”

Posteriormente, en 2018, el Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN), unidad que pertenece al Estado Mayor de la Defensa y que tiene entre sus competencias el desarrollo de tareas de investigación sobre temas relacionados con la seguridad y la defensa, recibió la orden de liderar el desarrollo del concepto C-UAS. En varios de sus informes [4] el CESEDEN afirmaba lo siguiente:

“La amenaza principal LSS UAS son los micro y mini UAS. En la Defensa Antiaérea, es prioritario contrarrestar la amenaza de ataques realizados por UAS LSS, en particular los ingenios no tripulados de pequeñas dimensiones, para los que los medios tradicionales de la artillería antiaérea no son eficaces.”

[...]

“La defensa C-UAS LSS debe ser considerada como un asunto prioritario. Las medidas propuestas para solucionar las carencias que existen actualmente, necesitarán un plan de implantación para integrar la Capacidad C-UAS LSS con las capacidades de Defensa Aérea y de Protección de Unidades, Bases e Instalaciones.”

Por todo lo expuesto, es necesario hacer un estudio de las capacidades de los medios C-UAS disponibles en la Artillería Antiaérea española para hacer frente a la amenaza de los UAS LSS en forma de enjambre satisfactoriamente.

² LIDAR (de *Laser Imaging Detection and Ranging*). Dispositivo capaz de determinar la distancia desde un emisor a un punto utilizando un haz láser pulsado.

³ IED (de *Improvised Explosive Device*). Artefacto explosivo improvisado.

⁴ Problema Militar Operativo (PMO). Situación a la que se enfrenta un mando a la hora de cumplir una misión con unos medios y condiciones determinadas.



1.3. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo es evaluar las capacidades de los medios C-UAS de los que disponen las unidades de Artillería Antiaérea del Ejército de Tierra con el fin de saber si pueden hacer frente a la amenaza de los enjambres de UAS LSS. Por tanto, este objetivo principal se ha dividido en estos dos objetivos más concretos:

- Evaluar las características de los sistemas de detección y de neutralización de UAS en dotación en el Ejército de Tierra y comerciales.
- Realizar una propuesta de un sistema C-UAS con la mayor eficacia posible para los UAS LSS.

En todo este estudio sólo se han tenido en cuenta las características técnicas para proporcionar la mayor eficacia contra UAS LSS, no se ha tenido en cuenta el precio ni la disponibilidad de los sistemas.

1.4. Metodología

En primer lugar se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema, incluyendo las características de los medios C-UAS disponibles en la actualidad. Posteriormente se realizaron encuestas a expertos con el fin de evaluar la importancia de las características de los sistemas de detección y de neutralización, cuantificando las respuestas mediante una escala Likert. Utilizando la valoración de los expertos para las diferentes características y los datos técnicos de varios sistemas se ha llevado a cabo un análisis multicriterio ponderado normalizado, con el fin de evaluar los sistemas de detección y de neutralización en dotación en el Ejército de Tierra y compararlos con sistemas comerciales. Además, mediante esa metodología también se ha podido determinar qué sistema de detección y de neutralización reúne las mejores características de cara a hacer una propuesta de un sistema C-UAS en enjambre.

1.5. Ámbito de aplicación

Este trabajo tiene un ámbito de aplicación amplio, puesto que se ha desarrollado por y para el empleo eficaz y eficiente de los medios del Regimiento de Artillería Antiaérea nº73, donde se ha realizado el mismo. Pero además se puede extender al resto de las unidades del Mando de Artillería Antiaérea o unidades integradas en las brigadas con capacidad de DAA. En definitiva, se podría aplicar a cualquier unidad de AAA del Ejército de Tierra.



2. SISTEMAS C-UAS ACTUALES

2.1. CICLO DE DEFENSA C-UAS

Un sistema C-UAS tiene muchas similitudes con un sistema antiaéreo convencional. Sin embargo, la principal diferencia reside en las características de los sensores y de los sistemas de armas. Un sistema C-UAS está compuesto por un eslabón de inteligencia, unos sensores, un sistema de mando y control (C2 de *command and control*) y los sistemas de armas correspondientes. Con esto se llevan a cabo las cuatro fases del ciclo C-UAS [5]: prevención, detección e identificación, decisión y neutralización (ver Figura 1).

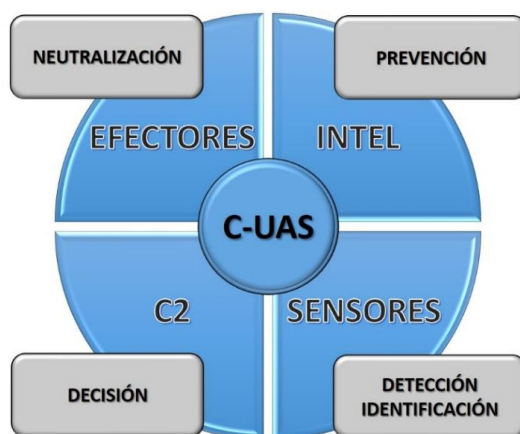


Figura 1. Ciclo de defensa C-UAS [5]

Las características más importantes de estas fases son las siguientes:

- Prevención:

Esta puede que sea la más importante puesto que, si se toman medidas en diferentes ámbitos, se puede llegar a evitar que la amenaza se materialice. Es por esto necesario disponer de una inteligencia competente, que facilite información previa orientada a la preparación de las unidades frente a las amenazas.

- Detección e identificación:

Consiste en detectar con suficiente antelación la presencia de un posible UAS en el espacio aéreo que se está vigilando y de identificar dicho objeto. Los sensores utilizados deben dar información para poder situar el objetivo en el espacio-tiempo, tales como distancia, posición angular, tamaño o velocidad; y también discriminar si el objetivo es amigo o enemigo, y en tal caso el nivel de hostilidad (a través de su trayectoria y velocidad, por ejemplo). Estos sensores se basan en cámaras, identificadores IFF⁵, analizadores de señales de control remoto o incluso simples observadores. Para esta fase es muy importante que los sensores puedan hacer un seguimiento continuo del objetivo, ya no sólo para poder neutralizarlo, sino también para poder hacer un estudio de su trayectoria e intentar detectar su punto de salida.

- Decisión:

Tras haber detectado e identificado el objetivo, en esta fase se toma la decisión de combatirlo o no, de acuerdo con unos criterios y estándares establecidos y sabiendo el estado

⁵ Identificadores IFF (de *identification friend or foe*) son sensores capaces de determinar si el objetivo es amigo o enemigo.



de los sistemas de armas disponibles. Éste es un momento crítico, ya que la diferencia entre un acierto o un fallo en la decisión puede suponer el derribo de una aeronave aliada o el no abatir una amenaza hostil, por lo que es esencial disponer de un sistema de mando y control que sea capaz de recopilar, analizar y difundir la información y datos recibidos por los sensores eficaz y eficientemente en tiempo real. De esta manera la decisión se toma de forma semiautomática, ya que el sistema C2 hace una recomendación al operador, que es quien toma la decisión final. Estos sistemas también pueden trabajar de forma automática, aunque no se considera aconsejable porque es más seguro que las decisiones estén siempre sujetas a una intervención humana.

- Neutralización:

Es la última fase del ciclo de la defensa C-UAS. Se emplean los sistemas de armas disponibles: de energía cinética (*hard kill*), proyectiles que deterioran o destruyen el objetivo; o de energía no cinética (*soft kill*), sistemas de energía dirigida que perturban su acción. Para esta fase hay que ser consciente de las consecuencias y daños colaterales que puede tener el derribo de los objetivos, sobre todo en zonas con presencia de población civil. En el caso de que se produzca el derribo es conveniente recuperar los materiales abatidos y analizarlos, con el fin de prevenir ataques futuros (esto sería parte de la fase de inteligencia).

El *Concepto de empleo de la Fuerzas Armadas* [6] establece tres escenarios generales donde las FAS deben actuar: seguridad del territorio nacional, seguridad exterior y seguridad nacional ampliada. Los sistemas C-UAS tienen además que distinguir, dentro de estos tres escenarios, entre entornos abiertos, con condiciones más favorables para desarrollar el ciclo descrito; y entornos urbanos, con mayores dificultades para la detección, seguimiento, identificación y neutralización de UAS. Asimismo, cada defensa es distinta atendiendo al objetivo que se quiera proteger, por lo que también es necesario distinguir entre tres tipos de protección:

- Protección permanente de un objetivo estático. Es el caso de las bases y acuartelamientos militares, aeropuertos e infraestructuras críticas de gran valor e interés para el enemigo como centrales nucleares, centros de comunicaciones y edificios gubernamentales.
- Protección temporal de un objetivo estático. Es el caso de los eventos de alta visibilidad llamados habitualmente HVE (de *high visibility events*) como pueden ser conciertos, mítines políticos, competiciones deportivas, etc.
- Protección temporal de un objetivo móvil. Esta está enfocada a la escolta de vehículos de autoridades, convoyes militares, movimientos de tropas, etc.

Por tanto, debido a que ninguna misión es igual a otra, y el empleo de los UAS no va a ser siempre el mismo, nunca va a haber un C-UAS ideal que sea efectivo contra toda amenaza. Sin embargo sí que ha de cumplir con la mayor eficacia con el ciclo anteriormente descrito, adaptándose al objetivo que se quiere proteger dentro de un escenario y entorno determinado.



2.2. La amenaza de los UAS

Existen distintos tipos de UAS que, debido al continuo avance de la tecnología, se han clasificado de diferentes formas, las cuales han ido evolucionando a lo largo del tiempo, junto con la nomenclatura para referirse a ellas. En la Tabla 1 se muestra una clasificación de los distintos UAS realizada en base a los criterios y a la nomenclatura de la OTAN [7, 8, 9].

Tabla 1. Clasificación UAS OTAN [7, 8, 9]

Clase	Categoría	Empleo	Altitud de operación máxima	Radio de misión	Autonomía
CLASE I ≤ 150 kg	NANO (< 200 g)	Táctico	200 pies	1 km (LOS ⁶)	25 min (aprox.)
	MICRO (200 g - 2 kg)	Táctico (Sección)	200 pies	5 km (LOS)	30 min
	MINI (2 - 20 kg)	Táctico (Compañía)	1.000 pies	25 km (LOS)	30 – 60 min
	SMALL (> 20 kg)	Táctico (Batallón)	1.200 pies	50 km (LOS)	15 h
CLASE II 150 – 600 kg	TÁCTICO	Táctico (Brigada)	Hasta 10.000 pies	200 Km (LOS)	20 h
CLASE III > 600 kg	MALE (<i>Medium Altitude Long Endurance</i>)	Operacional	45.000 pies	Sin Límite (BLOS ⁷)	36 h
	HALE (<i>High Altitude Long Endurance</i>)	Estratégico	65.000 pies	Sin Límite (BLOS)	36 h
	COMBATE	Estratégico	65.000 pies	Sin límite (BLOS)	36 h

Además, en relación con la carga útil⁸ que puedan llevar, los UAS pueden tener distintas aplicaciones: labores de inteligencia para captar información en operaciones para adquirir objetivos; como herramienta de mando y control; para labores de guerra electrónica; como propio sistema de armas para bombardear zonas o con carga explosiva para detonar en un determinado momento; o incluso para labores de influencia en operaciones psicológicas distribuyendo propaganda o dejando en evidencia zonas supuestamente seguras.

⁶ LOS (de *line of sight*) quiere decir que para pilotar la aeronave debe estar en la línea de visión del piloto.

⁷ BLOS (de *beyond line of sight*) quiere decir que se puede pilotar la aeronave aunque esté fuera de la línea de visión.

⁸ Carga útil. Son los elementos del UAS que no son necesarios para volar pero que son transportados para el cumplimiento de su misión.



Asimismo la amenaza más común, eficaz y peligrosa en estas operaciones son los denominados, según la OTAN, Clase I micro, nano y mini, es decir, de tipo LSS (ver

Figura 2). Estos UAS suponen una gran amenaza para la Defensa Aérea debido a que resulta muy difícil su detección, identificación y neutralización. Esta dificultad se incrementa si trabajan en entornos urbanos. Según la doctrina del ET, los UAS LSS son [10]:

“Cualquier objeto volante que represente una amenaza y cumpla al menos una de las siguientes condiciones:

- Furtividad. Entendida tanto en términos de poca superficie equivalente radar como poca firma infrarroja o pequeño tamaño que dificulte su adquisición visual.
- Vuelo a baja altura.
- Vuelo a baja velocidad.”.

Pero sin lugar a duda, la forma más peligrosa en la que se pueden encontrar estos UAS LSS es en forma conjunta y organizada definiendo lo que se conoce como enjambre.

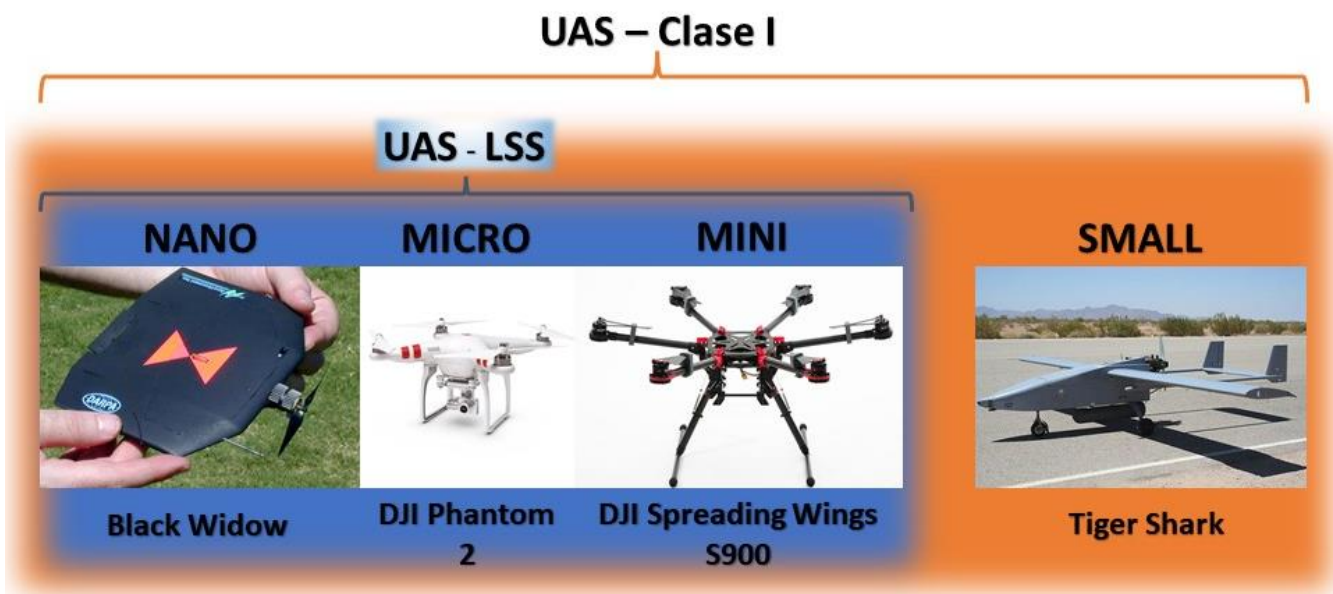


Figura 2. UAS de clase I [11]

2.2.1. Enjambre de UAS

Aunque un enjambre es según la OTAN [4] :

“un grupo de UAS LSS que emplean la cantidad como medio para saturar la capacidad de respuesta o la colaboración entre ellos para lograr un objetivo común.”

Se suele definir también como un conjunto de UAV (de *unmanned aerial vehicle*) que vuelan inspirándose en un modelo de comportamiento de aves o insectos sociales. Es por tanto un grupo de UAV que, aunque podrían estar siendo dirigidos uno a uno remotamente, suelen actuar descentralizados, organizándose automáticamente y que funcionan de manera autónoma.

Estos UAS LSS llevan unos sensores que detectan tanto el entorno como a los compañeros, de modo que actúan según una serie de algoritmos de forma que el comportamiento del conjunto se ve determinado por las interacciones internas entre ellos y de los estímulos del entorno, estando los movimientos individuales limitados por una serie de reglas simples y predefinidas. Desde un punto de vista estrictamente militar, un enjambre se refiere a un conjunto de unidades dispersas pero interconectadas, que combaten un objetivo común desde todas las direcciones y simultáneamente.

Una ventaja clara del modelo de enjambre es que los UAV de pequeño tamaño son más



baratos y, por ello, la pérdida de un pequeño número de aparatos no supone una gran pérdida, además de que se puede seguir cumpliendo la misión.

Para entender el comportamiento de los enjambres hay que hablar de los algoritmos que los configuran, que se exponen a continuación [12, 13]:

En una misión ofensiva, los UAV del enjambre deben cooperar y coordinarse para cumplir un objetivo en la que no todos los UAV tienen por qué tener la misma función o no tienen por qué encontrarse con un mismo entorno en el que interactuar, por lo que se han desarrollado varios algoritmos para la formación de estos enjambres en función del tipo de misión a realizar.

- Algoritmo líder-seguidor: es uno de los algoritmos más conocidos y usados para planificar la búsqueda de un objetivo. Los UAV en un primer momento son desplegados ocupando una zona amplia de búsqueda y cuando uno de ellos detecta el objetivo informa al resto del enjambre para cumplir la orden recibida de forma conjunta. El UAV que detecta el objetivo pasa en ese momento a ser el líder de la coalición, mientras que el resto pasan a ser posibles miembros de la coalición, siendo solo algunos de ellos, o todos, miembros que serán los componentes de una coalición final que lleve a cabo la misión. El líder pasa al resto del enjambre su localización y los requisitos necesarios para cumplir la misión, y gestiona los elementos de la forma más eficiente, utilizando el menor número de UAV posible.
- Algoritmo de actuación: tiene como objetivo definir un criterio de actuación para los distintos miembros del enjambre y analiza qué UAV puede llegar a realizar qué tarea en función del análisis de una serie de parámetros. Al fin y al cabo, no deja de ser una serie de restricciones que establecen qué UAV es capaz de realizar la misión. Estos parámetros son: energía o autonomía disponible, tiempo de ejecución, tecnología disponible, riesgo o peligro durante el trayecto y/o comunicación. Este algoritmo se implementa conjuntamente con el algoritmo líder-seguidor descrito anteriormente para formar la coalición final de UAV que lleve a cabo la misión y con el que se describe a continuación.
- Algoritmo de consenso: se usa para complementar el anterior algoritmo de actuación. Cuando un UAV detecta el objetivo e informa al resto de miembros del enjambre, este algoritmo decide qué miembros llevan a cabo la misión en base a los recursos disponibles de todo el enjambre, y se establecen unas restricciones y prioridades para que cada uno realice una tarea específica.
- Algoritmo predictivo: se encarga de definir un plan estratégico que permita determinar la localización del punto futuro de un objetivo móvil usando un enjambre de UAV. Los miembros del enjambre rastrean y siguen al objetivo durante su trayecto, cooperando entre ellos para poder definir la trayectoria que sigue el objetivo. Utilizan en cada momento estimaciones proporcionales que son contrastadas y actualizadas continuamente.
- Algoritmo de las leyes físicas: se basa en las fuerzas de atracción y repulsión entre los UAV para poder formar un enjambre utilizando la menor energía posible.
- Algoritmos para mantener la formación: durante el vuelo, el enjambre debe aprovechar el espacio disponible para moverse, con la precaución de no colisionar unos UAV con otros. Hoy en día, siendo el GPS el sistema más usado para este tipo de formaciones, puede suponer un problema si cualquiera de ellos pierde la señal. Sin embargo, con los algoritmos descritos anteriormente se puede solucionar, ya que si cualquiera de ellos pierde la señal GPS, al estar los miembros de enjambre compartiendo su información continuamente, esta información y datos en tiempo real podría ser usada por el UAV sin señal GPS para poder continuar en la formación. Además hay que añadir los sensores que llevan todos ellos para delimitar un radio de repulsión alrededor de cada uno para evitar colisiones.



2.3. Tecnologías para la detección e identificación

Actualmente existen distintos tipos de tecnologías para la detección e identificación, que se diferencian por los fenómenos físicos en los que se basan [10, 14].

2.3.1. Sistemas de detección

Firma acústica

Los sistemas de detección de firma acústica están basados en sonómetros, los cuales son capaces de diferenciar la firma acústica de las distintas tecnologías. Estos sistemas de detección funcionan con una matriz de sensores distribuida para cubrir un área muy concreta en el caso de querer proteger zonas urbanas, o con sensores direccionales capaces de detectar los UAV a mayor distancia en caso de estar en zona de operaciones con amplios espacios despejados. Son de uso poco habitual aunque pueden complementar a otros sistemas.

Firma térmica, reconocimiento por imagen, reflexión de fotones

Estas 3 tecnologías pueden describirse juntas ya que, aunque estén basadas en diferentes fenómenos, mantienen una estrecha relación en cuanto a las cámaras que usan, el trato de imágenes y sus tipos de sensores, además de que se suelen usar conjuntamente para reducir el porcentaje de error y detectar un mayor número de UAV independientemente de su tamaño, área o sección.

Emisión de radiofrecuencia

Los UAS pueden tener distintos tipos de comunicación, ya sea multicanal o multifrecuencia, por lo que se pueden detectar de forma relativamente eficaz haciendo un amplio barrido del espectro de frecuencias. Dentro de estos sistemas de detección se puede destacar la diferencia entre los detectores de sistemas GPS, los de radiofrecuencia (RF) de comunicaciones y los de comunicación mediante satélite. En el mercado ya existen sistemas que integran en un mismo dispositivo estos detectores para actuar con mayor precisión.

Emisión electromagnética

Estos sistemas son capaces de detectar un UAV por la inducción electromagnética que generan los motores eléctricos del aparato o simplemente sus superficies metálicas. Estos detectores son poco eficaces debido a que tienen un radio de acción muy reducido (del orden de 50 metros) pero pueden ser útiles en algunas ocasiones.

Radar

Este es con diferencia el sistema de detección más usado ya que es el más eficaz para detectar cualquier aeronave, en distintos entornos complejos con alto nivel de *clutter*⁹ e interferencias y en condiciones climáticas adversas. Sin embargo, con la proliferación de los UAS LSS, comienzan a verse ciertas carencias a la hora de detectar este tipo de aparatos, debido a su pequeño tamaño y que la superficie de reflexión del impulso del radar es excesivamente pequeña, además del impedimento de no poder identificar el tipo de amenaza.

2.3.2. Sistemas de identificación

Hay distintos tipos de dispositivos para la identificación, muchas veces integrados dentro de los sistemas de detección. Pueden ir desde la identificación por el propio ser humano mediante la vista o el oído, hasta los sistemas automáticos por imagen como las cámaras EO (electroópticas) o IR, por sonido con sensores acústicos o por análisis de protocolos de control

⁹ Son las perturbaciones sobre una onda provocadas por los ecos o reflexiones en elementos ajenos al sistema (montañas, el mar, etc.), que evitan que la señal sea la óptima.



remoto.

En la Tabla 2 se expone una comparativa de una serie de sistemas de detección, ya se dispongan en el ET o no, con las características más importantes que debería de poseer un sistema de detección para combatir a los UAS (imágenes en ANEXO A). Los radares RAC-3D, Sentinel y AN/MPQ 53, además del DJI Aeroscope son los sistemas disponibles en dotación en el ET en la actualidad. El AUDES Blighter, el cual dispone además de la capacidad de poder neutralizar también los UAS, también se ha utilizado por el ET con la salvedad de que ha sido en Zona de Operaciones, ya que pertenece a países de la OTAN y ha sido facilitado al ET en operaciones combinadas para cubrir ciertas misiones. El ARMS (*Anti RPAS Multisensor System*) de la multinacional española Indra, el cual no se encuentra en dotación, es un sistema que integra no sólo los aspectos más importantes de la detección sino también capacidades de neutralización, como el AUDES Blighter [15].

2.3.3. Características de un sistema de detección

Las características más importantes de un sistema de detección de UAS son las siguientes:

- Alcance: es la distancia máxima a la que el sistema es capaz de detectar una aeronave o UAS, independientemente de su RCS¹⁰.
- Capacidad de identificación y seguimiento: indica si el sistema es capaz de distinguir el tipo de aeronave, si es hostil o no y además hacer un seguimiento de su trayectoria.
- Detección del punto inicial (X_0) del UAS: el sistema es capaz de detectar el punto desde el cuál el UAS inició su movimiento. Es una característica importante, puesto que si el UAS es pilotado remotamente, se podría localizar el puesto de mando enemigo.
- Movilidad del sistema: es la capacidad que tiene el sistema de poder moverse con rapidez, ya sea para usarlo en otro lugar o para abandonar la zona si ha sido detectado por el adversario.
- Tipo de detección: es el tipo de medio, sistema o procedimiento que se usa para detectar un UAS. Pueden utilizarse desde cámaras EO, hasta el análisis del espectro electromagnético¹¹ [16].
- Capacidad de detectar enjambres: indica si el sistema es capaz de detectar más de un UAS a la vez, y en caso de hacerlo, si puede hacerlo en gran número.
- Capacidad de neutralizar: es la capacidad que pueda tener un sistema de detección para además de realizar las funciones principales de la fase de detección, poder realizar la fase de neutralización mediante la integración de algún sistema de armas.

¹⁰ RCS (de *radar cross section*). Es la sección equivalente de radar y es una medida que indica lo fácil que un objeto puede ser detectado mediante un radar. A mayor RCS, más fácil se detectará.

¹¹ El espectro de las ondas electromagnéticas en el que está basado la tabla es el que usa la OTAN como referencia.



Tabla 2. Características de los sistemas de detección

	Alcance (km)	Identificación y seguimiento	Detección X ₀	Movilidad	Tipo de detección	Capacidad contra enjambres	Capacidad de neutralizar
RAC-3D	100	Sí	No	Media	Bandas G/H	Reducida	No
Radar Sentinel	75	Sí	No	Media	Bandas I/J	Reducida	No
Radar AN/MPQ 53	170	Sí	No	Media	Bandas G/H	Reducida	No
DJI Aeroscope	5	Sí	Sí	Alta	Bandas D/E/F/G	Media	No
AUDS Blighter	10	Sí	Sí	Reducida	-Bandas J y D -Cámara IR -Cámara EO	Media	Sí
ARMS	5	Sí	Sí	Reducida	-Bandas radar J y D -Cámara IR -Cámara EO	Alta	Sí

2.4. Tecnologías para la neutralización

La neutralización se entiende como la parte última del ciclo de la defensa C-UAS, cuyo objetivo no deja de ser el de destruir, perturbar o controlar la amenaza, mediante el uso de los sistemas de armas de energía cinética (*hard kill*) y no-cinética (*soft kill*) [10, 14, 17].

2.4.1. Sistemas hard kill

Los sistemas cinéticos o *hard kill* no dejan de ser sistemas antiaéreos convencionales, es decir, sistemas de derribo por impacto de proyectiles. Se trata de fusilería desde 5,56; 7,62; 12,70; cañones antiaéreos de 35/90 o incluso misiles tierra-aire. Aunque hay que indicar que para el caso de los UAS es una medida desmesurada, no sólo por el tamaño de esta amenaza frente al del misil, sino también por el excesivo coste que supone frente al coste que puede alcanzar un UAV de pequeñas dimensiones.



Otra opción muy interesante es la utilización de cañones 35/90 con munición programable AHEAD (de *advanced hit efficiency and destruction*) (ver ANEXO C). Se trata de una munición inteligente con una espoleta programable que permite la detonación a cierta distancia del objetivo, liberando 152 elementos de tungsteno de 3,3 gramos cada uno [18, 19].

De todas formas, cualquier sistema cinético no deja de ser una medida drástica que puede causar daños colaterales si no se realiza la acción con cautela y precisión.

2.4.2. Sistemas *soft kill*

- Contramedidas electrónicas

Estos sistemas ECM (de *electronic counter measure*) pretenden interferir, solapar o sustituir las señales de RF de los UAS. Se pueden perturbar las frecuencias de la banda de comunicaciones para interferir la transmisión de datos, o incluso realizar un ciberataque si se consigue enlazar con el sistema base. También se pueden realizar acciones de *spoofing*, que consisten en interferir en el sistema de navegación de los UAV. El sistema neutralizador emite una señal GPS-*spoofed* que sustituye a la señal GPS original que reciben los UAV, causando errores en su navegación. Así se consigue desviarlos a una zona que interese para provocar su autodestrucción o para atraparlos y analizarlos. También pueden realizar ataques *jamming*, cuya técnica, similar pero más sencilla que el *spoofing*, consiste en interferir el sistema GPS del UAS generando señales parecidas y en la banda de los satélites, de tal forma que la señal quede “ensuciada” y no puedan adquirir correctamente la señal real.

- Derribo mediante armas láser

Los sistemas láser son de los más eficaces en el ámbito de la neutralización C-UAS, llegando a neutralizar aeronaves que se encuentran a 2 km en 7 segundos. Su único inconveniente es que necesitan tener LOS continua con el objetivo. Hay varios tipos de sistemas láser dependiendo de su potencia y el objetivo a alcanzar. Los sistemas de potencia media sólo pretenden dañar los sensores, ya sean térmicos, ópticos, IR, etc. Con estos sistemas el UAS sólo dejaría de captar datos pero seguiría navegando sin problema. Los sistemas láser de alta potencia tipo HEL (de *high energy laser*) o THEL (de *tactical high energy laser*) sí que pueden dañar y derribar el objetivo. Estos sistemas de alta potencia deben enfrentarse a amenazas con fuselaje o sólo afectarán a los sensores, como los de media potencia, además de mantener fijo el láser sobre el objetivo un tiempo determinado si se quiere abatir.

- Microondas y ondas electromagnéticas

Los sistemas de microondas de alta potencia (HPM, de *high power microwave*) son dirigidos al objetivo y producen 2 tipos de efectos: una elevada generación de calor en los materiales del UAV; y una descarga eléctrica de alta tensión e intensidad producida mediante inducción en sus circuitos. Son más precisos y rápidos que el láser, aunque menos dañinos y de menor alcance. Su gran inconveniente es que afectan a los seres vivos que haya cerca, como los animales o los seres humanos, ya que contienen agua y las microondas calientan el agua.

Los sistemas HPEW (de *high power electromagnetic wave*) se basan en impulsos potentes de ondas electromagnéticas con una direccionalidad baja. Aunque es un sistema para corta distancia, es capaz de anular fácilmente un enjambre debido al área barrida y, además, a diferencia de las microondas no genera calor y no resulta perjudicial para los seres vivos.

Del mismo modo que se hizo con los sistemas de detección, en la Tabla 3 se realiza una comparativa de las capacidades más importantes de los sistemas de neutralización de que dispone el ET, además del AUDES Blighter y el ARMS anteriormente mencionados (imágenes en ANEXO B) [15].



2.4.3. Características de un sistema de neutralización

Las características más importantes de un sistema de neutralización de UAS son las siguientes:

- Alcance: es la distancia máxima a la que el sistema intenta neutralizar una aeronave o UAS, ya que es el alcance máximo del armamento o sistema de armas.
- Autonomía: indica el tiempo en horas que el sistema puede estar en funcionamiento continuo. Depende del sistema de alimentación que use.
- Movilidad del sistema: es la capacidad que tiene el sistema de poder moverse con rapidez, ya sea para usarlo en otro lugar o para abandonar la zona si ha sido detectado por el adversario.
- Tipo de neutralización: es el tipo de munición que usa el sistema en el caso de los hard kill o el rango del espectro que neutraliza en el caso de los soft kill.
- Capacidad de neutralizar enjambres: indica si el sistema es capaz de neutralizar más de un UAS a la vez, y en caso de hacerlo, si puede hacerlo en gran número.
- Capacidad de detección: es la capacidad que pueda tener un sistema de neutralización, para además de realizar las funciones de neutralizar, poder realizar la fase de detección mediante la integración de algún sistema de detección.

Tabla 3. Características de los sistemas de neutralización

		Alcance (m)	Autonomía (h)	Movilidad	Tipo de Neutralización	Capacidad contra enjambres	Capacidad de detectar
Hard kill	Munición 5,56 – 7,62	1000	-	Alta	Munición convencional	Baja	No
	Sistema cañón 35/90 AHEAD	4000	-	Baja	Munición AHEAD	Media	Baja
Soft kill	Drone Defender	400	1	Alta	Señales RF y GPS	No	No
	ASDT Sendes HD-02	1000	2,5	Alta	Señales RF y GPS	No	No
	AUDS Blighter	10000	24	No	Señales RF y GPS	Media	Media
	ARMS	5000	-	No	Señales RF y GPS	Alta	Alta



3. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN

Dos de las partes más importantes del ciclo C-UAS son los sistemas de detección e identificación, y los sistemas de neutralización. Con el fin de analizar las capacidades C-UAS en enjambre que posee el Ejército de Tierra se va a hacer un análisis multicriterio ponderado normalizado para determinar cuál de los sistemas de detección existentes, en dotación y comerciales, es el más adecuado para cumplir su misión contra UAS LSS.

3.1. Evaluación de las características

La primera parte del análisis multicriterio es valorar la importancia de las características de estos sistemas. Para ello se ha realizado una encuesta a 51 expertos en sistemas C-UAS con el fin de saber a qué características le dan más importancia. Con el fin de cuantificar las respuestas se ha utilizado una escala de Likert¹².

El cuestionario consistió en valorar la importancia de varias características en cuanto a la detección de UAS en enjambre, asignando un número entre 1 (sin importancia) y 5 (muy importante). El cuestionario completo está disponible en el ANEXO D. Se valoraron los siguientes aspectos o capacidades del sistema de detección:

- Alcance.
- Identificación y seguimiento.
- Detección del punto inicial del UAS.
- Movilidad del sistema.
- Capacidad de detectar enjambres (swarm).
- Capacidad de neutralizar.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la encuesta. En la que se puede apreciar cómo la capacidad para detectar los enjambres es la más importante para los expertos, con un promedio de 4,1 en la escala de Likert, seguido de la capacidad de los sistemas para integrar un sistema de neutralización, con un promedio de 3,75. Los resultados de la encuesta también muestran, que el aspecto menos importante para un sistema de detección es la capacidad de moverse, ya que normalmente estos sistemas van a estar situados en zonas sensibles propias a defender, y no interesa tanto moverlos.

¹² Es una herramienta de medición que permite medir características y conocer el grado de conformidad con cualquier afirmación propuesta.



Tabla 4. Resultados de la encuesta para los sistemas de detección

Valoración	Alcance	Identificación y seguimiento	Detección X_0	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de neutralizar
1. Sin importancia	0	0	0	0	0	0
2. De poca importancia	16	10	12	25	0	1
3. Moderadamente importante	10	15	33	25	8	16
4. Importante	22	22	6	1	30	29
5. Muy importante	3	4	0	0	13	5
Número de respuestas	51	51	51	51	51	51
Promedio	3,24	3,39	2,88	2,53	4,10	3,75
Desviación	0,96	0,89	0,58	0,54	0,63	0,65

3.2. Análisis multicriterio

Se va a realizar un análisis multicriterio ponderado normalizado. Para ello se debe asignar un peso a cada característica en función de su importancia y una ponderación que depende de los datos técnicos de cada característica de un sistema. Combinando ambos se obtiene una valoración para cada sistema de detección.

Con los resultados de la encuesta se les ha asignado un orden de prioridad entre 1 y 6, ya que se han valorado 6 características. La característica más valorada recibe un 1 y la menos valorada un 6, como se puede ver en laTabla 5.

Tabla 5. Prioridad de las características de los sistemas de detección

	Alcance	Identificación y seguimiento	Detección X_0	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de neutralizar
Valoración promedio	3,24	3,39	2,88	2,53	4,10	3,75
Prioridad	4	3	5	6	1	2

Una vez determinada la prioridad, se calcula el peso, W , de cada característica mediante la siguiente ecuación:

$$W_j = \frac{1}{r_j} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$



Siendo r_j el orden de prioridad de una característica y r_i el orden de todas las características. Los pesos de cada capacidad son los siguientes:

- $W_{Alcance} = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,102$
- $W_{ID} = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,136$
- $W_{X_0} = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,082$
- $W_{Movilidad} = \frac{\frac{1}{6}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,068$
- $W_{Swarm} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,408$
- $W_{Neutralizar} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{6}} = 0,204$

A continuación se debe calcular la ponderación, P, para cada capacidad de cada sistema. Para ello se debe calcular primero el valor máximo, el mínimo y el recorrido (la diferencia) del valor de cada propiedad. Al haber características que no se pueden cuantificar se les ha dado un valor de forma que si la capacidad se tiene o no se tiene se asigna un 0 al sistema que no la tenga y un 1 al que sí. Si se puede valorar entre alto, medio y bajo, se asigna un 0 al sistema con un valor bajo, un 1 al sistema con valor medio y un 2 al que tiene un valor alto. Estos nuevos valores y recorridos se pueden apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores y recorridos de las características de los sistemas de detección

	Alcance (km)	Identificación y seguimiento	Detección X_0	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de neutralizar
RAC-3D	100	1	0	1	0	0
Radar Sentinel	75	1	0	1	0	0
Radar AN/MPQ 53	170	1	0	1	0	0
DJI Aeroscope	5	1	1	2	1	0
AUDS Blighter	10	1	1	0	1	1
ARMS	5	1	1	0	2	1
Máximo	170	1	1	2	2	1
Mínimo	5	0	0	0	0	0
Recorrido	165	1	1	2	2	1



En cuanto a la ponderación, el sistema con el valor máximo se le asigna una ponderación de 0 y al que tiene el valor mínimo se le asigna un 1. Para el resto se calcula la ponderación mediante esta expresión:

$$P_i = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor } i}{\text{Recorrido}}$$

En el caso de características que no se pueden cuantificar, el cálculo de la ponderación es muy sencillo. Si la capacidad se tiene o no se tiene la ponderación calculada es 0 para el sistema que la tenga y 1 para el que no. Si se puede valorar entre alto, medio y bajo, la ponderación calculada es 0 para el sistema con un valor alto; 0,5 para el sistema con valor medio y 1 para el que tiene un valor bajo. Para la ponderación de los alcances, siendo la única característica cuantitativa, se obtienen los siguientes resultados:

- $P_{Alc-RAC3D} = \frac{170-100}{165} = 0,42$
- $P_{Alc-Sentinel} = \frac{170-75}{165} = 0,58$
- $P_{Alc-AN/MPQ} = \frac{170-170}{165} = 0$
- $P_{Alc-DJI} = \frac{170-5}{165} = 1$
- $P_{Alc-AUDS} = \frac{170-10}{165} = 0,97$
- $P_{Alc-ARMS} = \frac{170-5}{165} = 1$

Finalmente se calcula la ponderación total, P_{total} , de cada sistema de detección, que resulta del sumatorio de los productos entre cada ponderación P_i de cada capacidad por su peso W_j según esta expresión:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_j$$

El que tenga el menor valor de P_{total} resultará ser la opción más adecuada. Los resultados de todas estas ecuaciones se pueden apreciar en la Tabla 7.



Tabla 7. Ponderación total de las características de los sistemas de detección

		Alcance (km)	Identificación y seguimiento	Detección X_0	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de neutralizar	Ponderación total (P_{total})
		Peso (W)						
		0,102	0,136	0,082	0,068	0,408	0,204	
RAC-3D	Ponderación (P)	0,42	0	1	0,5	1	1	0,771
Radar Sentinel		0,576	0	1	0,5	1	1	0,787
Radar AN/MPQ 53		0	0	1	0,5	1	1	0,728
DJI Aeroscope		1	0	0	0	0,5	1	0,510
AUDS Blighter		0,970	0	0	1	0,5	0	0,371
ARMS		1	0	0	1	0	0	0,170

En la Tabla 7 se puede observar que los cuatro sistemas que dispone el ET en dotación, son los que peor ponderación tienen y por tanto los menos eficaces. Esto es debido al hecho de que actualmente se prioricen más los sistemas anti-enjambres y los sistemas C-UAS más completos. El AUDS Blighter, que no está en dotación, pero si a disposición del ET en misiones OTAN, se puede ver que no es el más eficaz, pero cumple bastante con los requisitos que se le piden a un sistema de detección.

Finalmente se puede comprobar que el sistema más adecuado para la detección en el ciclo C-UAS es el ARMS, ya no sólo por la importancia que se da a las capacidades básicas para los sistemas de detección, sino también por la capacidad que además tiene de poder detectar un gran número de UAS en formación de enjambre con gran eficacia. Además, este sistema tiene la posibilidad de neutralizarlos, capacidad que no tienen los actuales sistemas de detección en dotación en el Ejército de Tierra.



4. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN

La fase más importante del ciclo C-UAS es, para muchos de los expertos, la fase de neutralización, puesto que si alguna de las anteriores falla, siempre se podrá proceder a neutralizar la amenaza, independientemente de la eficiencia y eficacia. Sin embargo, si la fase de neutralización falla, los daños están asegurados. Con el fin de analizar las capacidades de los sistemas C-UAS frente a los enjambres, se va a proceder igual que en el capítulo anterior. Se ha realizado un análisis multicriterio ponderado normalizado para determinar qué sistema, en dotación o comercial, es el más eficaz para cumplir la misión de neutralizar los UAS LSS en enjambre.

4.1. Evaluación de las características

De nuevo, lo primero que se ha hecho es valorar la importancia de las características de estos sistemas. Para ello se ha realizado otra encuesta a los mismos 51 expertos en sistemas C-UAS con el fin de saber a qué características le dan más importancia. Las respuestas se han cuantificado mediante una escala de Likert.

El cuestionario consistió en valorar la importancia de varias características en cuanto a la neutralización de UAS en enjambre, asignando a cada una un número entre 1 (sin importancia) y 5 (muy importante). El cuestionario completo está disponible en el ANEXO . Se valoraron los siguientes aspectos o capacidades del sistema de detección:

- Alcance.
- Autonomía.
- Movilidad de los sistemas.
- Capacidad de neutralizar enjambres (swarm).
- Capacidad de detección.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de la encuesta. En la que se puede apreciar cómo la capacidad relacionada con los enjambres, en este caso la neutralización, vuelve a ser la más valorada por los expertos, con un promedio de 4,2 sobre 5, seguido otra vez también de la capacidad de los sistemas para integrar otro sistema del ciclo C-UAS, como es el caso del sistema de detección, con un promedio de 4,1. Los resultados de la encuesta también muestran que los aspectos menos importantes para un sistema de neutralización son la autonomía y la movilidad, en ese orden, ya que normalmente estos sistemas van a estar situados en zonas sensibles propias a defender, normalmente alimentados mediante una toma de corriente o un grupo electrógeno, y no interesa moverlos.



Tabla 8. Resultados de la encuesta para los sistemas de neutralización

Valoración	Alcance	Autonomía	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de detectar
1. Sin importancia	0	0	0	0	0
2. De poca importancia	14	12	0	0	1
3. Moderadamente importante	12	30	48	4	7
4. Importante	21	6	2	33	29
5. Muy importante	4	3	1	14	14
Número de respuestas	51	51	51	51	51
Promedio	3,29	3,00	3,08	4,20	4,10
Desviación	0,96	0,77	0,33	0,56	0,69

4.2. Análisis multicriterio

Se va a realizar un análisis multicriterio ponderado normalizado de la misma manera que en el capítulo de detección, asignando un peso a cada característica en función de su importancia y una ponderación basada en los datos técnicos de cada característica de un sistema. Combinando ambos se obtiene una valoración para cada sistema de detección.

Con los resultados de la encuesta, a cada característica se le ha asignado un orden de prioridad entre 1 y 5, ya que se han valorado 5 características. La característica más valorada recibe un 1 y la menos valorada un 5, como se puede ver en la Tabla 9.

Tabla 9. Prioridad de las características de los sistemas de neutralización

	Alcance	Autonomía	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de detectar
Valoración promedio	3,29	3,00	3,08	4,20	4,10
Prioridad	3	5	4	1	2

Una vez determinada la prioridad, se calcula el peso, W , de cada característica mediante la siguiente ecuación:

$$W_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$

Siendo r_j el orden de prioridad de una característica y r_i el orden de todas las características. Los pesos de cada capacidad son los siguientes:



- $W_{Alcance} = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,146$
- $W_{Autonomía} = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,088$
- $W_{Movilidad} = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,109$
- $W_{Swarm} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,438$
- $W_{Detectar} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,219$

A continuación se debe calcular la ponderación, P, para cada capacidad de cada sistema. Para ello, una vez más, se calcula previamente el valor máximo, el mínimo y el recorrido del valor de cada propiedad. A las características que no se pueden cuantificar se les ha dado un valor de forma que si la capacidad se puede valorar entre alto, medio, bajo o no tener, se asigna un valor 0 al sistema sin capacidad, un 1 al sistema con valor bajo, un 2 al sistema con valor medio y un 3 al que tiene un valor alto. A los valores de autonomía que no son medibles en horas como pueden ser los sistemas con munición convencional, se les ha asignado un valor de 48 horas, por ser un equivalente a los días de abastecimiento de munición o combustible para el grupo electrógeno que los alimenta. Estos nuevos valores y recorridos se pueden apreciar en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores y recorridos de las características de los sistemas de neutralización

		Alcance (m)	Autonomía (h)	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de detectar
Hard kill	Munición 5,56 – 7,62	0,937	48	3	1	0
	Sistema cañón 35/90 AHEAD	4000	48	1	2	1
Soft kill	Drone Defender	400	1	3	0	0
	ASDT Sendes HD-02	1000	2,5	3	0	0
	AUDS Blighter	10000	24	0	2	2
	ARMS	5000	48	0	3	3
	Máximo	10000	48	3	3	3
	Mínimo	400	1	0	0	0
	Recorrido	9600	47	3	3	3



En cuanto a la ponderación, al sistema con el valor máximo se le asigna una ponderación de 0 y al que tiene el valor mínimo se le asigna un 1. Para el resto se calcula la ponderación mediante esta expresión:

$$P_i = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor } i}{\text{Recorrido}}$$

En el caso de características que no se pueden cuantificar el resultado del cálculo de la ponderación es este: si la capacidad se puede valorar entre alto, medio, bajo y nula, la ponderación es 0 para el sistema con un valor alto; 0,333 para el sistema con valor medio; 0,667 al que tiene un valor bajo; y 1 para el que no dispone de esa capacidad. Para la ponderación de los alcances y autonomías, siendo las únicas características cuantitativas, se obtienen los siguientes resultados:

- $P_{Alic-5,56-7,62} = \frac{10000-1000}{9600} = 0,938$
- $P_{Aut-5,56-7,62} = \frac{48-48}{47} = 0$

- $P_{Alic-35/90} = \frac{10000-4000}{9600} = 0,625$
- $P_{Aut-35/90} = \frac{48-48}{47} = 0$

- $P_{Alic-DroneDef} = \frac{10000-400}{9600} = 1$
- $P_{Aut-DroneDef} = \frac{48-1}{47} = 1$

- $P_{Alic-ASDT} = \frac{10000-400}{9600} = 0,938$
- $P_{Aut-ASDT} = \frac{48-2,5}{47} = 0,968$

- $P_{Alic-AUDS} = \frac{10000-10000}{9600} = 0$
- $P_{Aut-AUDS} = \frac{48-24}{47} = 0,511$

- $P_{Alic-ARMS} = \frac{10000-5000}{9600} = 0,521$
- $P_{Aut-ARMS} = \frac{48-48}{47} = 0$

Finalmente se calcula la ponderación total, P_{total} , de cada sistema de neutralización, que resulta del sumatorio de los productos entre cada ponderación P_i de cada capacidad por su peso W_j según esta expresión:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_j$$

El que tenga el menor valor de P_{total} resultará ser la opción más adecuada. Los resultados de estos cálculos se muestran en la Tabla 11.



Tabla 11. Ponderación total de las características de los sistemas. de neutralización

		Alcance (m)	Autonomía (h)	Movilidad	Capacidad contra enjambres	Capacidad de detectar	Ponderación total (P_{total})
		Peso (W)					
		0,146	0,088	0,109	0,438	0,219	
Hard kill	Munición 5,56 – 7,62	0,937	0	0	0,667	1	0,658
	Sistema cañón 35/90 AHEAD	0,625	0	0,667	0,333	0,667	0,456
Soft kill	Drone Defender	1	1	0	1	1	0,890
	ASDT Sendes HD-02	0,937	0,968	0	1	1	0,879
	AUDS Blighter	0	0,511	1	0,333	0,333	0,373
	ARMS	0,521	0	1	0	0	0,185

En la Tabla 11 se puede observar que tres de los cuatro sistemas de los que dispone el ET en dotación son los que peor ponderación total tienen y, por tanto, los menos eficaces. Esto es debido, al igual que ocurría con los sistemas de detección, al hecho de que actualmente a los sistemas anti-enjambres y a los sistemas C-UAS más completos se les da más importancia. Por eso mismo, el sistema cañón 35/90, al trabajar siempre de la mano de un radar que le asegura una detección y al usar una munición mejorada AHEAD que le capacita para combatir los enjambres, es el único sistema en dotación que se podría considerar bastante eficaz, ocupando en tercer puesto en el análisis con una P_{total} de 0,456.

El AUDS Blighter, que recordemos que está a disposición del ET en misiones OTAN, se puede ver que sigue sin ser el más eficaz, pero vuelve a ser el segundo más eficaz cumpliendo bastante con los requisitos de neutralización más valorados.

Finalmente se puede comprobar otra vez que el sistema de armas más eficaz en la neutralización y a su vez el más completo en el ciclo C-UAS es el ARMS de Indra. No es el que más alcance tiene, pero sí es de los pocos y más eficaces sistemas en cuanto a la detección y a la neutralización de UAS.

5. PROPUESTA DE MEJORAS Y DE SISTEMA C-UAS

El problema más importante que se puede observar a través del análisis realizado en los capítulos anteriores es la baja capacidad de los medios existentes actualmente en dotación, que son obsoletos o ineficaces frente a la amenaza de los UAS en su modalidad de enjambre. Mientras se sigan empleando estos medios, la lucha contra los UAS en enjambre no será adecuada.

Por otra parte, a tenor de los resultados expuestos anteriormente, de todos los sistemas evaluados el sistema ARMS de Indra es el que ha resultado tener las mejores capacidades y, por tanto, es el más adecuado. Este sistema es capaz de integrar gran parte del ciclo C-UAS, además de ser el más eficaz en cuanto a la lucha contra enjambres se refiere. En cuanto a la posible adquisición de este sistema, hay que decir que, al ser un sistema fijo, habría que distribuirlo en aquellos puntos sensibles y de mayor importancia para el ET, tanto en zona de operaciones como en territorio nacional.

De no ser posible la adquisición del ARMS, otra posible solución sería la adquisición del sistema AUDES Blighter, que es el segundo con mejores capacidades y, además, en el ET ya se tiene experiencia en el manejo de este sistema, puesto que se ha utilizado en misiones de la OTAN. Este sistema combina las fases de detección y neutralización de la amenaza, es capaz de detectar remotamente los UAS mediante un radar para rastrearlos y posteriormente clasificarlos antes de llevar a cabo su inhibición. Por tanto, el sistema puede hacer frente a los UAS de forma individual o en su modalidad de enjambre.

Para profundizar más en las capacidades del sistema ARMS de Indra, la mejor opción, es interesante destacar que está capacitado para realizar la fase de detección de forma activa con su radar, o de forma pasiva con sus analizadores de RF (ver Figura 3).



Figura 3. Elementos de detección ARMS [20]

Gracias a su tecnología basada en un sistema de análisis y confirmación, en cámaras EO y en cámaras IR es capaz de identificar el tipo de UAS e incluso el modelo. Además puede hacer un seguimiento de su posición, velocidad, altura, trayectoria y, según el medio de transmisión que lleven las aeronaves, puede incluso llegar a localizar la ubicación del operador que los dirige, siempre y cuando no actúen de forma autónoma, como se puede apreciar en la Figura 4.

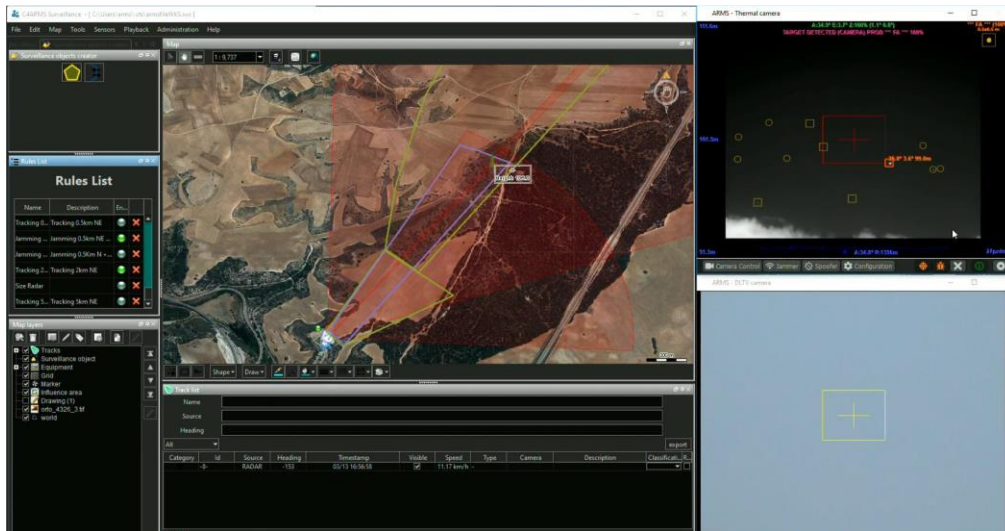


Figura 4. Elementos de identificación y seguimiento ARMS [20]

Por otra parte, el sistema ARMS es capaz de neutralizar la amenaza con unos elementos (ver Figura 5) que usan unas medidas basadas en la inhibición o *jamming* de las señales de transmisión de datos, vídeo o GPS, y también es capaz de generar señales GPS en tiempo real orientadas a suplantar la señal GPS del UAS mediante *spoofing*, como se explica gráficamente en la Figura 6.



Figura 5. Elementos de neutralización ARMS [20]

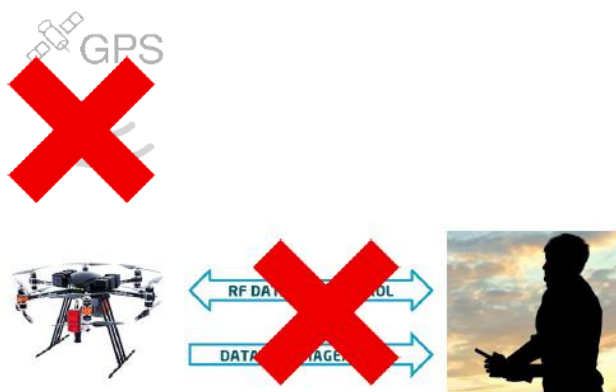


Figura 6. Esquema del funcionamiento de la neutralización del sistema ARMS [20]

Además de esto, en base a la observación personal durante la realización las prácticas externas o durante maniobras pasadas, y también al asesoramiento de los expertos en la materia, se puede hacer una propuesta de mejora de los sistemas C-UAS. En primer lugar, los medios con capacidades C-UAS en dotación está disponible en muy pocas unidades del ET. Esto hace que se destinen pocos medios para formar al personal y capacitarle para el uso de estos materiales, lo que hace que haya pocas personas capaces de sacarle el máximo provecho a estos materiales. . Además de que al ser tan pocos, el flujo de información sobre el uso de estos sistemas es muy pobre y no llega a ponerse en conocimiento del resto de la unidad. Por tanto, se debería fomentar la instrucción de los operadores o futuros operadores, tanto en el día a día de las unidades como mediante cursos de formación que sean impartidos por ingenieros o expertos de las empresas que fabrican estos sistemas.

En segundo lugar, y ligado con el anterior, se ha observado que el mantenimiento o la reparación de estos sistemas es hoy en día un problema de gran magnitud, ya que el encargado de operar con el sistema no siempre tiene por qué ser capaz de solventar los posibles problemas técnicos que le puedan ocurrir al sistema. En territorio nacional el problema es menor porque se puede solicitar a la empresa de fabricación la asistencia de un técnico, por lo que el problema se podría solventar. Sin embargo, en zona de operaciones es más complicado que el técnico pueda realizar la reparación. La solución podría ser que se impartan cursos de formación a esos operadores para que puedan realizar el mantenimiento y algunas reparaciones sencillas de estos sistemas una vez desplegados en zona de operaciones.



6. CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar en numerosos conflictos internacionales, el empleo de los UAS en su versión más eficaz, que son los enjambres de LSS, es una realidad y cada vez se utilizan con mayor frecuencia. Los UAS LSS no solo pueden usarse para realizar ataques a puntos sensibles, también son empleados para otras misiones como el espionaje. Es por esto por lo que los ejércitos de la mayoría de las naciones están haciendo hincapié en la investigación y en el desarrollo de sistemas C-UAS con unas capacidades más eficaces para poder hacer frente a esta importante amenaza.

En un primer momento, la adquisición a nivel FAS de los primeros sistemas C-UAS fueron fruto en una necesidad operativa en zona de operaciones, por lo que su adquisición se realizó con la concepción de un UAS como un IED aéreo aislado. Sin embargo, en la actualidad la adquisición de los sistemas parece haber adquirido un carácter más conjunto y estructural, por lo que hay abiertos varios programas de I+D+i que implican tanto a empresas civiles, como a las unidades militares. Es en estas unidades donde se lleva a cabo la experimentación de los sistemas. Sistemas de neutralización tales como la munición AHEAD para los sistemas cañón de 35/90, el ASDT Sendes HD-02 o el Drone Defender, y sistemas de detección como el DJI Aeroscope, que aunque ya se considere material en dotación, no dejan de ser elementos experimentales en constante evaluación.

Este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado con el fin estudiar la eficacia de las capacidades de los sistemas C-UAS frente a la amenaza de los enjambres de UAS. Para ello se ha realizado un análisis multicriterio ponderado normalizado para evaluar los sistemas de detección y los sistemas de neutralización disponibles en dotación en el ET y comerciales de posible adquisición. Para realizar este análisis se ha realizado una encuesta a expertos para evaluar la importancia de las características de los sistemas y también se han utilizado los datos técnicos de cada sistema.

Las conclusiones más importantes de este trabajo son las siguientes:

A través del análisis multicriterio tanto de los sistemas de detección como de los sistemas de neutralización se ha podido ver que los sistemas en dotación son los que peores capacidades tienen, por tanto difícilmente van a ser útiles en la lucha contra UAS en enjambre. Estos sistemas se concibieron para combatir UAS de grandes dimensiones pero no los UAS LSS que se utilizan en modo enjambre. Por tanto, se debería adquirir un sistema más completo que integrase gran parte de las capacidades del ciclo C-UAS.

En segundo lugar, a través de estos análisis multicriterio se ha determinado que el sistema que mejores capacidades tiene tanto para la detección como para la neutralización de UAS en enjambre es el sistema ARMS de la empresa Indra. Además, con este sistema se combinan en un mismo equipo las capacidades de detección y neutralización, ya que puede desempeñar ambas.

La propuesta para la mejora de las capacidades C-UAS en modo enjambre se basa en la adquisición del sistema ARMS de Indra, que ha sido el mejor valorado, ya que es capaz de realizar la detección, la identificación, el seguimiento y la neutralización tanto de un UAS aislado como de un enjambre. La segunda opción de adquisición sería el sistema AUDS Blighter, que ha sido el segundo más valorado y además ya ha sido utilizado por personal del ET en misiones internacionales de la OTAN.

Además de esta adquisición, se debe fomentar la formación del personal tanto en el manejo como en el mantenimiento de estos sistemas, para poder utilizarlos de forma eficaz tanto en territorio nacional como en zona de operaciones.



7. Bibliografía

- [1] J. A. Marín Delgado, «Guerra de drones en el Cáucaso Sur: lecciones aprendidas de Nagorno Karabaj,» Documento de Opinión IEEE 21/2021, Febrero 2021. [En línea]. Available: https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2021/DIEEEO21_2021_JOSM AR_DronesCaucaso.pdf. [Último acceso: 21 Octubre 2021].
- [2] G. Vega, «El País,» 28 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://elpais.com/tecnologia/2021-05-28/la-onu-informa-del-primer-ataque-de-drones-autonomos-a-personas.html>. [Último acceso: 10 Octubre 2021].
- [3] K. Mizokami, «Esquire,» 30 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.esquire.com/es/tecnologia/a36724283/ejercito-drones-ataque-autonomo-humanos/>. [Último acceso: 25 Octubre 2021].
- [4] CESEDEN, «Concepto Nacional C-UAS LSS. Counter Unmanned Aerial Systems Low Slow Small,» Ministerio de Defensa. Estado Mayor de la Defensa, Madrid, 2019.
- [5] CESEDEN, «Análisis Base. Concepto Nacional Contra-UAS,» Ministerio de Defensa. Centro Superior de Estudios de la Defensa, Madrid, 2018.
- [6] Gabinete Técnico del Jefe de Estado Mayor de la Defensa, «Concepto de empleo de las Fuerzas Armadas 2017,» Ministerio de Defensa, Madrid, 2018.
- [7] DGAM, «UAS “Unmanned Aircraft System” Sobre su integración en el espacio aéreo no segregado,» *Monografías del SOPT*, nº 1, 2009.
- [8] DGAM, «Plan Director de RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems),» Ministerio de Defensa, Madrid, 2015.
- [9] C. Calvo González-Regueral, F. Herranz y P. Calvo Aguilar, «De los UAV a los RPAS,» *Perfiles/DS*, 2014.
- [10] CESEDEN, «GT Tecnología. Concepto contra sistemas aéreos no tripulados (C-UAS),» Ministerio de Defensa. Centro Superior de Estudios de la Defensa, Madrid, 2018.
- [11] H.-W. Warnke, «Reconnaissance of LSS-UAS with Focus on EO-Sensors,» Bremen.
- [12] CESEDEN, «Tecnologías asociadas a sistemas de enjambre de μ UAV,» Ministerio de Defensa, Madrid, 2012.
- [13] ETSIT UPM - Cátedra Isdefe, «TICs para plataformas autónomas,» de *Estado del Arte de las Tecnologías*, Madrid, 2017.
- [14] DGAM, «Proyecto RPAZ y tecnologías anti-RPAS,» *Monografías del SOPT*, nº 15, 2016.
- [15] G. Jenaro de Mencos, «Protección contra plataformas aéreas no tripuladas. Sistemas C-UAS,» *Ingenieros Politécnicos*, nº 7, 2020.
- [16] C. Wolff, «Radar tutorial,» [En línea]. Available:



- <https://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [17] J. A. Marín Delgado, «El sistema de defensa aérea no-cinético, clave para la defensa antidrón,» Documento de Opinión IEEE 21/2018, Noviembre 2018. [En línea]. Available: https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_marco/2018/DIEEEM21_2018JAMADE-antidron.pdf. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [18] Secretaría General Técnica. Ministerio de Defensa, «Año 162,» *Memorial de Artillería*, nº 2, 2006.
- [19] Secretaría General Técnica. Ministerio de Defensa, «Año 163,» *Memorial de Artillería*, nº 1, 2007.
- [20] Indra, «ARMS - Sistema multisensor anti RPAS,» de *Reunión de Directores de Aviación Civil de Norteamérica, Centroamérica y Caribe (NACC/DCA/9)*, Puerto España, 2019.
- [21] M. Gattringer, «Wikimedia Commons,» 24 Junio 2005. [En línea]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RAC3D.JPG?uselang=es>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [22] intelligenceservicechile, «Wikimedia Commons,» 9 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ANANMPQ64.jpg?uselang=es>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [23] C. Wolff, «Radar tutorial,» [En línea]. Available: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/06.missile/karte003.es.html>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [24] Blighter Surveillance Systems Ltd, «Blighter,» [En línea]. Available: <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [25] DJI, [En línea]. Available: <https://www.dji.com/es/aeroscope>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [26] Heckle & Koch, «hk-usa,» [En línea]. Available: <https://hk-usa.com/hk-models/mg4/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [27] M. Á. Arias Palomino, «ecured,» 12 Julio 2011. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Archivo:Ametralladora_MG-42.JPG. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [28] Ministerio de Defensa, «ejercito.defensa.gob,» 12 Junio 2018. [En línea]. Available: https://ejercito.defensa.gob.es/news/2018/06/6726_tiro_antiaereo_raaa.html?__lo_cale=es. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [29] M3DA, «imgur,» 28 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://imgur.com/gallery/IA74F>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- [30] Ministerio de Defensa, «Manual de mantenimiento básico SENDES HD-02».
- [31] R. Kirill, «es.topwar,» 2 Noviembre 2019. [En línea]. Available:



<https://es.topwar.ru/163286-35-mm-programmiruemye-snarjady-oerlikon-contraves-ahead.html>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].

- [32] Rheinmetall, «Youtube,» [En línea]. Available:
<https://www.youtube.com/watch?v=bdwjcyPuag>. [Último acceso: 26 Diciembre 2021].



ANEXO A

SISTEMAS DE DETECCIÓN

RADAR RAC-3D

Tabla 12. Características generales del radar RAC-3D

Peso (kg)	26000
Altura (m)	13
Longitud (m)	10
Ancho (m)	2,5
Alcance (km)	100
Sector de búsqueda (Acimut)	360°
Sector de búsqueda (Elevación)	-
Banda de frecuencia (OTAN)	G y H



Figura 7. RAC-3D [21]

RADAR SENTINEL

Tabla 13. Características generales del radar Sentinel

Peso (kg)	6070
Altura (m)	3,34
Longitud (m)	3,92
Ancho (m)	2,56
Alcance (km)	75
Sector de búsqueda (Acimut)	360°
Sector de búsqueda (Elevación)	65°
Banda de frecuencia (OTAN)	I y J



Figura 8. Radar Sentinel [22]

RADAR AN/MPQ 52

Tabla 14. Características generales del radar AN/MPQ 52

Peso (kg)	29000
Altura (m)	3,6
Longitud (m)	15
Ancho (m)	2,9
Alcance (km)	170
Sector de búsqueda (Acimut)	120°
Sector de búsqueda (Elevación)	90°
Banda de frecuencia (OTAN)	G y H



Figura 9. Radar AN/MPQ 52 [23]



AUDS BLIGHTER

Tabla 15. Características generales del sistema AUDS Blighter

Peso (kg)	31
Altura (m)	1,55
Longitud (m)	0,726
Ancho (m)	0,656
Alcance (km)	5
Sector de búsqueda (Acimut)	90°
Sector de búsqueda (Elevación)	40°
Banda de frecuencia (OTAN)	D, E, F y G



Figura 10. Sistema AUDS Blighter [24]

DJI AEROSCOPE

Tabla 16. Características generales del sistema DJI Aeroscope

Peso (kg)	8,5
Altura (m)	0,175
Longitud (m)	0,405
Ancho (m)	0,327
Alcance (km)	10
Sector de búsqueda (Acimut)	360°
Sector de búsqueda (Elevación)	-
Banda de frecuencia (OTAN)	J y D



Figura 11. Sistema DJI Aeroscope [25]



ANEXO B

SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN

MG4

Tabla 17. Características generales de la ametralladora MG4

Calibre (mm)	5,56 x 45
Longitud (m)	1,03
Peso (kg)	7,9
Cadencia de tiro (dpm ¹³)	850-900
Alcance efectivo (m)	1000
Alcance máximo (m)	4000



Figura 12. Ametralladora MG4 [26]

MG 42

Tabla 18. Características generales de la ametralladora MG 42

Calibre (mm)	7,62 x 57
Longitud (m)	1,22
Peso (kg)	11,57
Cadencia de tiro (dpm)	1600 - 1700
Alcance efectivo (m)	1000
Alcance máximo (m)	4000



Figura 13. Ametralladora MG 42 [27]

¹³ Disparos por minuto.



CAÑÓN 35/90 GDF-007

Tabla 19. Características generales del cañón de AAA 35/90 GDF-007

Calibre (mm)	35 x 90
Longitud (m)	7,8
Peso (kg)	8000
Cadencia de tiro (dpm)	1100
Alcance efectivo (m)	4000
Alcance máximo (m)	11200



Figura 14. Cañón de AAA 35/90 GDF-007 [28]

DRONE DEFENDER

Tabla 20. Características generales del sistema Drone Defender

Peso (kg)	5
Autonomía (h)	1
Alcance (km)	0,4
Frecuencias (GHz)	0,4 – 2,4 - 5,8



Figura 15. Sistema Drone Defender [29]



ASDT SENDES HD-02

Tabla 21. Características generales del sistema ASDT Sendes HD-02

Peso (kg)	2,5
Autonomía (h)	2,5
Alcance (km)	1
Frecuencias (GHz)	1,6 - 2,4 – 2,6 - 5,8



Figura 16. Sistema ASDT Sendes HD-02 [30]

AUDS BLIGHTER

Tabla 22. Características generales del sistema AUDS Blighter

Peso (kg)	2,5
Autonomía (h)	24
Alcance (km)	10
Frecuencias (GHz)	0,4 - 2,4 - 5,8



Figura 17. Sistema AUDS Blighter [24]



ANEXO C

MUNICIÓN AHEAD

Una forma de aumentar la probabilidad de impacto a un UAS es utilizando munición programable, como es la munición AHEAD. Esta munición inteligente de 35 mm permite graduar la espoleta que lleva incorporada de forma automática a la salida de la boca del cañón, mediante un inductor electromagnético, en función de la distancia al objetivo. La munición detona en un punto de la trayectoria cercana al objetivo, liberando 152 subproyectiles de tungsteno de 3,3 gramos cada uno, formando una nube en forma de espiral que barre la zona del objetivo, aumentando la posibilidad de impacto sobre el UAS. En el ET, esta munición está disponible para los cañones de AAA 35/90 en su modelo GDF-007 que permite graduar la espoleta como se ha mencionado anteriormente. En las imágenes que se muestran a continuación, se muestra como es un proyectil AHEAD y los efectos que causa.

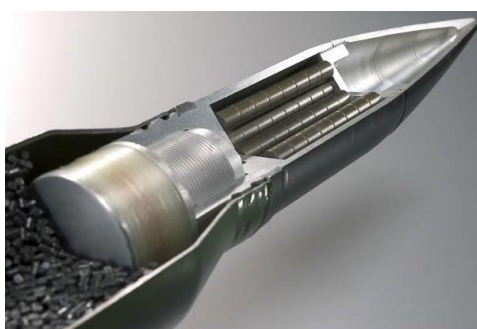


Figura 18. Munición AHEAD [31]

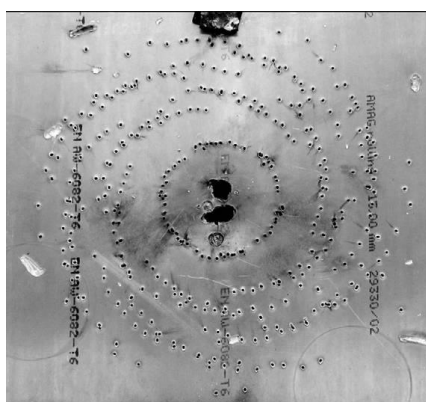


Figura 19. Efectos de la munición AHEAD [31]



Figura 20. Momento de la liberación de los subelementos de la munición AHEAD [32]



ANEXO D

ENCUESTA

SISTEMAS DE DETECCIÓN

A continuación se exponen una serie de capacidades que determinan la eficacia de un sistema C-UAS en su fase de detección a la hora de hacer frente a la amenaza de los enjambres de UAS. Valore según la importancia que le da usted a cada capacidad, siendo 1 una capacidad sin importancia, 2 de poca importancia, 3 moderadamente importante, 4 importante y 5 muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted al alcance máximo de un sistema de detección?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de identificación del tipo de aeronave y seguimiento de ella en un sistema de detección?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de detección del punto inicial de despegue de un UAS en un sistema de detección?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de movimiento que pueda tener un sistema de detección a la hora de cambiar de asentamiento?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.



- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de detectar varios UAS simultáneamente, en su modalidad de formación en enjambre en un sistema de detección?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de integrar un sistema de neutralización de UAS en un mismo sistema de detección?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN

A continuación se exponen una serie de capacidades que determinan la eficacia de un sistema C-UAS en su fase de neutralización a la hora de hacer frente a la amenaza de los enjambres de UAS. Valore según la importancia que le da usted a cada capacidad, siendo 1 una capacidad sin importancia, 2 de poca importancia, 3 moderadamente importante, 4 importante y 5 muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted al alcance máximo de un sistema de neutralización?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a autonomía en un sistema de neutralización?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.



- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de movimiento que pueda tener un sistema de neutralización a la hora de cambiar de asentamiento?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de neutralizar varios UAS simultáneamente, en su modalidad de formación en enjambre en un sistema de neutralización?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.

- ¿Qué importancia le da usted a la capacidad de integrar un sistema de detección de UAS en un mismo sistema de neutralización?
 - 1. Sin importancia.
 - 2. Poca importancia.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 3. Moderadamente importante.
 - 4. Importante.
 - 5. Muy importante.