



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de técnicas de ayuda a la decisión para la selección  
de un mini-UAV portátil para el cuerpo de Infantería de Marina*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Víctor Hernández Usero

**DIRECTORES:** Carlos Ulloa Sande  
Guillermo D. Rey González

**CURSO ACADÉMICO:** 2017-2018

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de técnicas de ayuda a la decisión para la selección  
de un mini-UAV portátil para el cuerpo de Infantería de Marina*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

La finalidad de este Trabajo de Fin de Grado es seleccionar un nuevo mini-dron para el cuerpo de Infantería de Marina mediante la aplicación de uno de los métodos multicriterio más conocidos para la toma de decisiones, el Proceso Analítico Jerarquizado o AHP (por sus siglas en inglés). Este proceso de toma de decisiones estructura un problema representando y cuantificando sus elementos, relaciona dichos elementos con los objetivos generales y evalúa las alternativas de solución. Además, es mundialmente utilizado en campos como el gobierno, negocios, industria y salud, y de ahí, el motivo por el cual lo aplicamos en el presente trabajo.

Se lleva a cabo un caso práctico real de la aplicación de dicho método para la compra de un nuevo mini-dron para el cuerpo de Infantería de Marina, donde determinados sus aplicaciones y requisitos materiales mediante una primera entrevista a expertos militares en la materia. Gracias a una segunda entrevista, establecemos las preferencias de los 3 criterios y los múltiples subcriterios que hemos tenido en cuenta para dicha compra. El resultado final es el mini-dron *Spark*, que obtiene mayor puntuación sobre las otras tres alternativas que exponemos en la memoria.

En último lugar, pensando en el futuro de la Armada, proponemos una herramienta informática que sea capaz de simplificar el proceso y que se pueda utilizar en distintos casos de toma de decisiones en esta organización.

## **PALABRAS CLAVE**

Decisiones, AHP, Mini-dron, Infantería de Marina.



## **AGRADECIMIENTOS**

Son muchas las personas a las que debería agradecer el poder haber llegado a este momento. Es impensable no agradecer a mis padres, Adela y Ricardo, el apoyo incondicional que me han dado, no sólo durante estos últimos 5 años de mi etapa en la Escuela Naval Militar, sino también durante toda mi vida. Igualmente, a mis hermanos, Cris y Ricki, y al resto de mi familia, sin los cuáles no habría sido posible llegar a este punto de mi carrera. No me gustaría olvidarme de mis dos tutores, que me han apoyado en el desarrollo del trabajo en todo momento, Carlos y Guillermo. A todos vosotros, gracias.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	4
Índice de Ilustraciones .....	5
1 Introducción y objetivos .....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 Objetivos .....	7
2 Estado del arte .....	8
2.1 Introducción a los UAVs.....	8
2.2 Introducción al proceso de la toma de decisiones. Elementos y Fases. ....	13
2.3 Teoría de la decisión .....	15
2.3.1 Decisiones multicriterio .....	15
2.3.2 Métodos que resuelvan decisiones multicriterio.....	16
2.4 El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) .....	18
2.4.1 Introducción. Capacidades y limitaciones .....	18
2.4.2 Desarrollo de técnica AHP .....	19
2.5 Toma de decisiones en la Armada .....	28
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Metodología .....	29
3.1.1 Entrevistas.....	29
3.1.2 Aplicaciones .....	30
3.1.3 Requisitos .....	34
3.1.4 Criterios y subcriterios.....	37
3.1.5 Ponderaciones .....	38
3.1.6 Matrices de criterios y subcriterios.....	40
3.2 Alternativas .....	41
3.2.1 Modelo 1: Inspire 1 Pro/Raw.....	42
3.2.2 Modelo 2: Inspire 2.....	43
3.2.3 Modelo 3: Spark .....	44
3.2.4 Modelo 4: Huginn X1 .....	44
3.3 Matrices de comparación de alternativas .....	45
4 Resultados de las matrices.....	55
4.1 Toma de decisión .....	55

4.1.1 Elección final de la mejor alternativa .....	55
4.1.2 Consideraciones susceptibles de afectar al resultado .....	57
5 Conclusiones y líneas futuras .....	58
5.1 Conclusiones finales .....	58
5.2 Líneas futuras .....	59
5.3 Cumplimiento de objetivos .....	59
6 Bibliografía.....	60
Anexo I: Contenido del primer anexo .....	62
Anexo II: Contenido del segundo anexo .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 El proceso de decisión [5] .....	14
Figura 2-2 Ejemplo Matriz con valores positivos e inversos en las dos diagonales .....	19
Figura 2-3 Etapas de Saaty para desarrollo metodología AHP .....	19
Figura 2-4 Ejemplo Organigrama Jerárquico .....	20
Figura 2-5 Ejemplo de la Subdivisión de un Criterio en Subcriterios.....	21
Figura 2-6 Ejemplo de árbol de relaciones completo .....	22
Figura 2-7 Ecuación vector prioridad global [10] .....	23
Figura 2-8 Matrices para obtener vector prioridad global [10] .....	24
Figura 2-9 Ecuación suma de elementos de una columna [10] .....	24
Figura 2-10 Ecuación que relaciona R y w [10].....	24
Figura 2-11 Escala fundamental de Saaty [12].....	25
Figura 2-12 Ejemplo de matriz de comparación por pares.....	25
Figura 2-13 Obtención matriz normalizada [10] .....	26
Figura 2-14 Obtención vector de pesos [10] .....	26
Figura 2-15 Fórmula Índice de Consistencia [12].....	26
Figura 2-16 Obtención del vector de prioridad de cada alternativa [10].....	27
Figura 2-17 Fórmula ratio de consistencia .....	27
Figura 2-18 Resumen resultados ratio de consistencia .....	28
Figura 3-1 Esquema Reconocimiento y Vigilancia.....	31
Figura 3-2 Esquema Adquisición de Blancos .....	32
Figura 3-3 Esquema Observación de Tiro.....	33
Figura 3-4 Esquema Operaciones CQB .....	34
Figura 3-5 Criterios y subcriterios.....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Matriz de decisión [5] .....	14
Tabla 2-2 Escala de Saaty [12] .....	23
Tabla 2-3 Escala simple .....	23
Tabla 2-4 Índice de Consistencia Aleatorio (IA) con respecto a la dimensión de la matriz [13] ....	27
Tabla 3-1 Clasificación Numérica de Criterios .....	38
Tabla 3-2 Ponderaciones Criterios .....	39
Tabla 3-3 Ponderaciones Subcriterios Diseño.....	39
Tabla 3-4 Ponderaciones Subcriterios Equipamiento.....	39
Tabla 3-5 Matriz de Criterios y Matriz Normalizada.....	40
Tabla 3-6 Matriz Subcriterio Diseño y Matriz Normalizada.....	40
Tabla 3-7 Matriz Subcriterio Equipamiento y Matriz Normalizada .....	41
Tabla 3-8 Resumen Ficha Técnica Modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw.....	42
Tabla 3-9 Resumen Ficha Técnica Modelo 2 Inspire 2.....	43
Tabla 3-10 Resumen Ficha Técnica Modelo 3 Spark .....	44
Tabla 3-11 Resumen Ficha Técnica Modelo 4 Huginn X1 .....	45
Tabla 3-12 Juicio verbal subcriterio autonomía .....	46
Tabla 3-13 Juicio verbal subcriterio tamaño .....	47
Tabla 3-14 Juicio verbal subcriterio peso.....	48
Tabla 3-15 Juicio verbal subcriterio ruido .....	49
Tabla 3-16 Juicio verbal subcriterio velocidad .....	49
Tabla 3-17 Juicio verbal subcriterio cámara vídeo .....	50
Tabla 3-18 Juicio verbal subcriterio GPS.....	53
Tabla 3-19 Juicio verbal criterio económico .....	54
Tabla 4-1 Vector de Prioridad Global .....	56

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1 Utilización de 200 globos con bombas en Venecia [1].....	8
Ilustración 2-2 Avión Automático Hewitt-Sperry [1] .....	9
Ilustración 2-3 Avión Bomba GB-1 Glide [1].....	10
Ilustración 2-4 Modelo Firebee [1] .....	10
Ilustración 2-5 Campo de prisioneros de Son Tay tomada por un dron militar [1] .....	11
Ilustración 2-6 Aquila RPV-dron [1].....	11
Ilustración 2-7 Vista simulada Predator [1] .....	12
Ilustración 2-8 Dron de despegue vertical [1] .....	13
Ilustración 3-1 Ejemplo Fotografía desde Dron [20] .....	35
Ilustración 3-2 Comparativa Imagen IR y Térmica [20] .....	35
Ilustración 3-3 Ejemplo de GPS en mini-dron [22] .....	36
Ilustración 3-4 Dron con Telémetro [23] .....	37
Ilustración 3-5 Modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw [24] .....	42
Ilustración 3-6 Modelo 2 Inspire 2 [24] .....	43
Ilustración 3-7 Modelo 3 Spark [24] .....	44
Ilustración 3-8 Modelo 4 Huginn X1 [25].....	45
Ilustración 3-9 Matriz Subcriterio Autonomía .....	46
Ilustración 3-10 Matriz Subcriterio Tamaño .....	47
Ilustración 3-11 Matriz Subcriterio Peso.....	48
Ilustración 3-12 Matriz Subcriterio Ruido .....	49
Ilustración 3-13 Matriz Subcriterio Velocidad.....	50
Ilustración 3-14 Matriz Subcriterio Cámara de Vídeo .....	51
Ilustración 3-15 Matriz Subcriterio Cámara Visión Nocturna .....	51
Ilustración 3-16 Matriz Subcriterio Cámara Térmica .....	52
Ilustración 3-17 Matriz Subcriterio Telémetro.....	52
Ilustración 3-18 Matriz Subcriterio GPS .....	53
Ilustración 3-19 Matriz Criterio Económico .....	54
Ilustración 4-1 Matriz AHP .....	55

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

Hoy en día, la toma de decisiones está muy presente en el complejo y exigente mundo empresarial, donde de forma evidente, cada vez toma más fuerza e importancia la problemática que representa la toma de decisiones.

La toma de decisiones es el proceso mediante el cual se realiza un juicio o una elección entre dos o más acciones o alternativas con el objeto de dar solución a un problema.

En el ámbito naval, y en concreto en la Armada, se deben tomar continuamente muchas decisiones valiosas en todas las áreas para el correcto funcionamiento de la institución: qué unidades desplegar para una determinada misión, selección de personal adecuado para destinos con responsabilidad como mandos de buques o unidades, correcta asignación de los presupuestos de Defensa para la Armada, compra de nuevo material, etc. Por ello, los órganos de decisión del Ministerio de Defensa y los estados mayores de cada uno de los ejércitos y la Armada, siempre buscan lo mejor entre las posibles alternativas.

Eso sí, no es nada fácil dar con la mejor solución. Cada solución tiene sus ventajas y sus inconvenientes. No solo es necesario plantear las alternativas posibles, estudiar y analizar todos los datos necesarios y tener el problema definido, sino que además resta la parte más complicada: acertar con la mejor solución y la más acertada para cada caso.

Por ello, hemos decidido realizar este Trabajo de Fin de Grado con el objetivo de elegir el mejor dron para Infantería de Marina para operaciones de reconocimiento de blancos, entre otras aplicaciones, y así mismo investigar y dar a conocer diferentes técnicas que se encuentran a nuestra disposición dicha elección del mejor mini-UAV.

Entre muchas de las técnicas de ayuda a la decisión, el Proceso de Análisis Jerárquico (Analytic Hierarchy Process) nos ofrece una solución la cual mediante unas cifras consiguen objetivar aquel problema inicial complejo y confuso, incluso a veces subjetivo, diferenciándose, así como una técnica de valor a tener en cuenta para asesorar al mando para la toma de la mejor decisión. Esta técnica fue desarrollada por el matemático iraquí Thomas L. Saaty en 1980 y ha sido estudiada y perfeccionada desde entonces hasta ahora por diversos expertos en la materia.

## 1.2 Objetivos

En el presente trabajo pretendemos abordar una serie de objetivos que a continuación se exponen:

En primer lugar, exponer distintos métodos que resuelvan decisiones multicriterio, y en concreto, el Proceso de Análisis Jerárquico, método matemático que será utilizado para la elaboración de este trabajo. De este modo, quedarán expuestas las capacidades y limitaciones que lo fundamentan como tal.

En segundo lugar, realizar un estudio e investigación de los criterios que se emplearán como herramientas para el método de cálculo AHP. Dichos criterios y subcriterios seleccionados deben estar corroborados por expertos militares en el tema como son Comandantes y Capitanes de Infantería de Marina.

Por otro lado, y de forma más específica, el desarrollo general del cálculo en el que se sustenta el Proceso de Análisis Jerárquico, aplicando de esta manera cada una de las etapas que componen el método.

A continuación, la realización de un análisis de los resultados que se obtengan mediante el método aplicado (AHP). De esta forma, obtendremos datos objetivos y fiables, con una mínima probabilidad de sesgo entre los criterios y subcriterios.

Por último, y como objetivo más importante, lograr que el proyecto asesore a la Armada Española, y en concreto al cuerpo de Infantería de Marina, para la adquisición de nuevos tipos de mini-UAV para dicho cuerpo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción a los UAVs

No fue ayer cuando nos metimos de lleno en este nuevo mundo de los drones o aeronaves pilotadas de forma remota. Existen una serie de figuras relevantes y de hechos históricos que poco a poco han ido dando forma a lo que hoy en día se conoce como una nueva manera de matar a distancia y que, además, ha originado el crecimiento de los UAVs (Unmanned Aerial Vehicle o Vehículo Aéreo No Tripulado) como una tecnología potente a desarrollar también en el ámbito civil.

La idea del avión no tripulado se remonta a muchos años atrás. A pesar de asociar comúnmente los drones con los robots militares de hoy en día, los aviones no tripulados se han usado durante décadas. Nos remontamos hasta julio de 1849 para encontrar los primeros registros cuando se pusieron en marcha alrededor de 200 globos aerostáticos no tripulados cargados con bombas en la ciudad de Venecia (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dos décadas después del fin de la Guerra Civil en EE.UU., los bandos de la Confederación y de la Unión volaban globos para operaciones de reconocimiento. En 1896, Samuel P. Langley creó una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto, que fueron transportados con éxito a lo largo del río *Potomac*, en Washington DC. Más tarde, en 1898, surgieron las operaciones de vigilancia aérea durante la Guerra Hispano-Americana, donde los militares de EE.UU. instalaron una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.

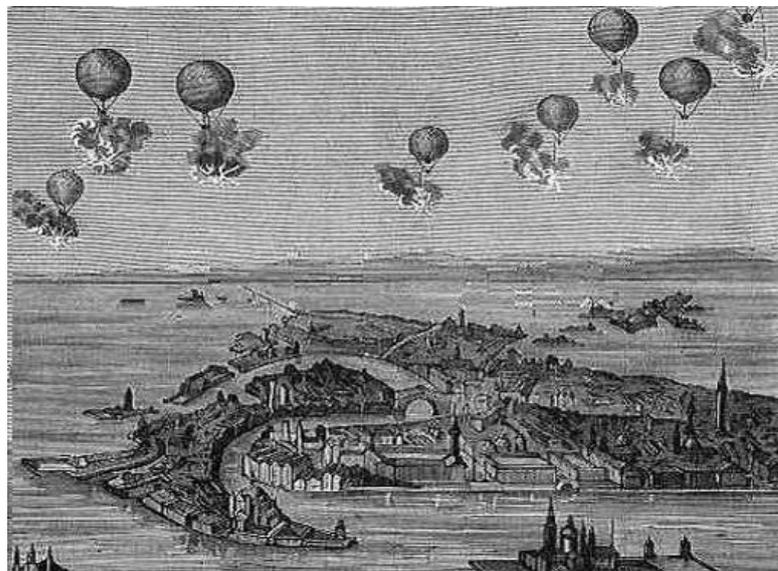


Ilustración 2-1 Utilización de 200 globos con bombas en Venecia [1]

Posteriormente, durante la Primera Guerra Mundial, se utilizó ampliamente la vigilancia aérea. Los bandos combatientes usaban estas cometas para obtener fotografías aéreas y, así, recopilar información de los movimientos del enemigo levantando mapas de situación. De este modo, se adentraría en el primer paso en la evolución de los aviones no tripulados en Estados Unidos, seguido de las siguientes cuatro fases en la historia.

En primer lugar, el precursor del dron fue utilizado como blanco aéreo de prácticas de las fuerzas militares a principios del siglo XX. A continuación, desde la Primera hasta la Segunda Guerra Mundial, el avión no tripulado fue utilizado como transportista de bombas que eran enviados a los frentes enemigos. En tercer lugar, durante el periodo de la Guerra Fría, el UAV fue empleado como una plataforma de vigilancia eficaz capaz de obtener información de inteligencia en áreas de difícil acceso. Por último, hoy en día conocido como dron, en la constante guerra contra el terrorismo, se ha convertido en un arma que une la capacidad de matar y la de vigilancia.

Durante la Primera Guerra Mundial, Elmer Ambrose Sperry, creador del giroscopio, inventó una plataforma de aeronaves sin piloto con un mecanismo lanza torpedos en una catapulta. Estas aeronaves eran guiadas con una alta precisión y después de una distancia establecida, giraban y caían en picado hacia poblaciones capaces de ser arrasadas con altas cargas de TNT, según una publicación del *New York Times* en 1926. Al acabar la guerra en 1918, el programa se paralizó debido también a numerosos fallos técnicos y accidentes que eran habituales según algunos reportes.

El “Hewitt Sperry” o “bomba volante” era capaz de volar 50 millas (80 kilómetros) cargada con una bomba de 300 libras (140 kilogramos) con una gran precisión gracias a la propia tecnología giroscópica de Sperry (Ilustración 2-2 Avión Automático Hewitt-Sperry). El éxito de este proyecto hizo que el Ejército de los Estados Unidos pusiera en marcha un segundo proyecto llamado “Kettering” desarrollado por la empresa *Dayton-Wright Airplane Company*. Era, en definitiva, un torpedo aéreo, sin piloto y guiado por controles preestablecidos.



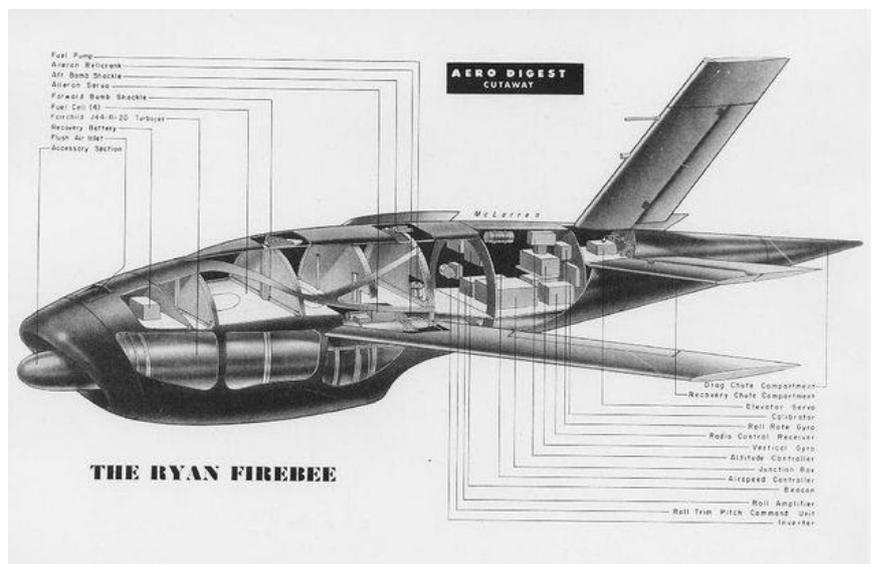
**Ilustración 2-2 Avión Automático Hewitt-Sperry [1]**

A partir de la Segunda Guerra Mundial, la cuestión del uso de los UAVs se trató de forma distinta. A mediados de la década de 1940, Estados Unidos desarrolló el “GB-1 Glide”, un sistema de bombardeo ideado para evitar las defensas aéreas alemanas (Ilustración 2-3 Avión Bomba GB-1 Glide). Consistía en un planeador equipado con una bomba estándar de 1000 o 2000 libras de peso (450 o 900 kilogramos). Estaba hecho de madera contrachapada con alas, timones y controlado por radio para ser guiados hacia las líneas enemigas. En 1943, se lanzaron 108 “GB-1” sobre Colonia, causando graves daños. Aunque fue parcialmente revolucionario, sólo podían funcionar en las mejores condiciones atmosféricas.



**Ilustración 2-3 Avión Bomba GB-1 Glide [1]**

Al finalizar la Segunda guerra Mundial, un programa de la Fuerza Aérea de EE.UU. fue aprobado, en 1946, para desarrollar tres tipos de aviones no tripulados para su uso como objeto de formación. De los tres tipos de UAV, el modelo Q-2, que se lanzaba desde el aire, fue el más importante, convirtiéndose en el padre de una clase de aviones “diana” construidos por la compañía aeronáutica *Ryan*. El modelo “Firebee”, Ilustración 2-4 Modelo Firebee, se fue probado por primera vez en 1951 en la base aérea de Holloman llegando a ser capaz de volar durante dos horas y alcanzar alturas de hasta 60000 pies (18000 metros).



**Ilustración 2-4 Modelo Firebee [1]**

A partir de estos momentos, el desarrollo de los drones disminuyó debido principalmente a la poca necesidad de ellos y en gran medida, al desarrollo en el campo de los misiles, donde el Ejército de los Estados Unidos desarrolló un misil de largo alcance con un sistema de guiado preciso. Esto hizo que se colapsara su desarrollo durante décadas.

Alrededor de los años 60, cuando Gary Powers fue derribado en territorio soviético, mientras pilotaba un avión espía U-2, el presidente de los EE.UU., Eisenhower, decidió tras este accidente, impulsar de nuevo y mejorar el programa de aeronaves no tripuladas. La empresa *Ryan Aeronatic*

*Company* sacó una versión de su avión no tripulado llamado “carro rojo” para operaciones de reconocimiento. Dos años más tarde, desarrollaron el “Gran Safari” de la Fuerza Aérea, siendo el primero en usarse para operaciones de vigilancia. Estos eran lanzados desde las alas de un avión *Hércules* que actuaba como nave nodriza de coordinación para todos los aviones no tripulados. Después de realizar las misiones, los UAVs desplegaban sus paracaídas y eran recuperados por helicópteros.

En mayo de 1964, EE.UU. comenzó a reemplazar sus aviones U-2 en misiones de espionaje sobre Cuba por aviones no tripulados. “Luciérnagas” eran llamados, fueron posteriormente utilizados para operaciones de vigilancia en las denominadas “zonas sensibles”, es decir, los principales escenarios de la Guerra Fría: Cuba, Corea del Norte y la República Popular de China.

En Vietnam, los aviones “luciérnagas” fueron utilizados en una gran variedad de misiones: entre 1964 y 1975, realizaron más de 34000 misiones de vigilancia en todo el sudeste de Asia. De hecho, muchas fotografías aéreas de Vietnam del Norte fueron tomadas por estos aviones no tripulados y que luego aparecían en la prensa estadounidense (Ilustración 2-5 Campo de prisioneros de Son Tay tomada por un dron militar).



**Ilustración 2-5 Campo de prisioneros de Son Tay tomada por un dron militar [1]**

En 1970, comenzaron a ponerse en marcha programas para desarrollar vehículos teledirigidos (RPVs). La fuerza Aérea inició un programa que consistía en aumentar las capacidades de alcance y de vigilancia electrónica de las RPV financiando las compañías *Boeing* y *Ryan* para desarrollar aviones no tripulados resistentes que volaran a gran altitud. Los prototipos fueron los más ambiciosos, capaces de volar más de 24 horas y siendo pilotados desde tierra. Al mismo tiempo, en paralelo, se desarrollaron una serie de “mini-RPV”, como los prototipos *Praeire*, que disponían de láser y cámaras de vídeo.



**Ilustración 2-6 Aquila RPV-dron [1]**

La década de 1980 fue testigo de paso del desarrollo de aeronaves no tripuladas en Vietnam a Israel, siendo pioneros en su utilización contra las fuerzas sirias, lo que llevó a formar la primera corporación UAV conjunta. Los drones del presente han ido tomando forma gracias al profundo desarrollo en computación y sistemas de control electrónicos durante las décadas de los 80 y 90. No sería hasta finales de los años 90 que las fuerzas aéreas norteamericanas comenzaran a tratar los aspectos técnicos que dotaron a los drones de misiles.

La relación entre la ley y la tecnología es de vital importancia en el trazado del progreso del avión no tripulado “Predator”. Ambos principios van de la mano en la obtención de inteligencia geográfica y vigilancia, adquisición de objetivos, y en último lugar, la decisión sobre la eliminación de objetivos.

Nos adentramos en la historia contemporánea de los drones, donde un acontecimiento marcó su historia a principios del nuevo siglo, cuando la CIA usó por primera vez el dron “Predator” para eliminar objetivos de inteligencia (Ilustración 2-7 Vista simulada Predator). La CIA empezó a volar con drones en Afganistán en el año 2000 pero no fue hasta los atentados del 11-S que empezaría los vuelos de drones armados. El ataque de febrero de 2002 fue la primera operación para matar de la CIA con drones sin una operación militar en curso. Se pensó, identificando un objetivo, que podría ser Osama Bin Laden, dando paso al cambio de operaciones de vigilancia a drones como armas. Que fuera Osama Bin Laden fue el principal motivo por el cual se legitimó el uso de drones armados, y a pesar del ataque fallido con dron, se siguió argumentando como una necesidad que podía salvar vidas americanas.



Ilustración 2-7 Vista simulada Predator [1]

Por otro lado, en esta década, se ha incrementado el uso militar de sistemas no tripulados como el *Northrop Global Hawk* y en *Scan Eagle* de *Boeing*, que han llegado a acumular cientos de miles de horas de vuelo frente a los pocos miles en décadas anteriores. De otra manera, en los últimos años, ha habido un gran interés en los sistemas de despegue/aterrizaje vertical (Ilustración 2-8 Dron de despegue vertical), debido a las ventajas frente a sus competidores de ala fija de menor alcance, relativas a cuestiones como la facilidad de uso en operaciones de vigilancia e identificación de blancos, así como, la simplicidad de lanzamiento y recuperación [2] [1] [3].



Ilustración 2-8 Dron de despegue vertical [1]

## 2.2 Introducción al proceso de la toma de decisiones. Elementos y Fases.

La teoría de la decisión nos aproxima a situaciones en las cuales una persona debe decidir. Una decisión es una determinación, o resolución que se toma o se da en una cosa dudosa, según la R.A.E. (Real Academia Española) [4]. Las decisiones nos acompañan en todos los ámbitos de nuestra vida. La decisión se traduce en acción y genera resultado. Decisiones cotidianas como comer, dormir, trabajar, son el resultado de una resolución frente a un conjunto de alternativas. Un elemento importante para la toma de decisiones es la existencia de información, dicha información no tiene por qué ser perfecta, elementos como la intuición o las experiencias aportarán información en procesos de decisión donde el tiempo de reacción sea crítico. La información es el resultado de un proceso que conduce a elaborar, ordenar y resumir un conjunto de datos permitiendo la comprensión de los mismos, además es la fuente de las alternativas, y dada la racionalidad del agente, es una restricción para la obtención o no de una decisión óptima. Otro elemento necesario para la toma de decisiones es la formulación del objetivo que se desea alcanzar. Diremos que una decisión es más o menos adecuada en función del grado de satisfacción que hemos logrado del objetivo deseado.

No podemos definir la decisión como una mera elección entre alternativas, ya que esto sería una definición muy pobre del problema. Forrester define decisión como “un proceso de transformación de la información en acción”. Esta definición refleja un flujo permanente de interacción entre Decisor, Acción e Información. Cada decisión genera unos resultados que son comparados con los objetivos generando información que es utilizada por el Decisor para tomar una nueva decisión-acción.

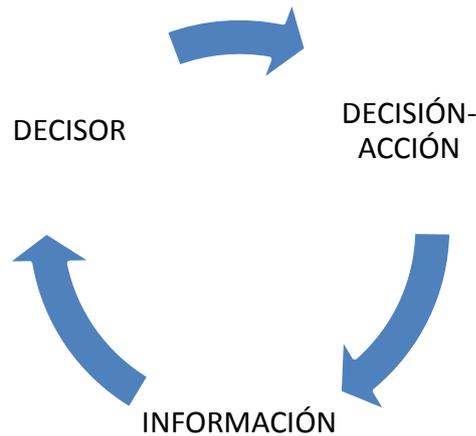


Figura 2-1 El proceso de decisión [5]

La teoría de la decisión se aplica cuando un agente procede a tomar una decisión (decisor) de forma razonada (decisión racional) entre un conjunto de alternativas (posibles acciones que dependen exclusivamente del decisor) cada una de las cuales combinada con las circunstancias del entorno (elementos no controlables por el decisor y conocidos en un cierto grado por el mismo) dan lugar a unos resultados.

Los **elementos básicos** de la decisión, según Starr [6], son:

1. Estrategias o alternativas ( $A_i$   $i = 1, \dots, m$ ): Acción o estrategia que puede ser seleccionada por el decisor y depende exclusivamente de su voluntad (variables controlables).
2. Estados de la naturaleza ( $N_j$   $j = 1, \dots, n$ ): Variables no controlables (entorno). Circunstancias que afectan al resultado y cuya concurrencia no depende de la voluntad del decisor.
3. Probabilidades de ocurrencia de cada estado de la naturaleza ( $P_j$   $j = 1, \dots, n$ ): Representa el nivel de conocimiento del entorno. Para que el problema de decisión esté bien planteado se ha de cumplir que la suma de dichas probabilidades debe ser igual a la unidad.
4. Resultados o desenlaces ( $R_{ij}$   $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ): Son la estimación de los pagos o penalizaciones que el decisor obtendrá consecuencia de combinar una alternativa y un estado de la naturaleza. Pueden expresarse en términos de beneficios, pérdidas, ingresos, costes, utilidades, o cualquier otra medida apropiada al problema en cuestión.
5. Criterio de decisión. Modo en el que se pone en relación la información para seleccionar una estrategia.

La representación de estos elementos se plasma en la denominada *matriz de decisión* (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Estados de la naturaleza		$N_1$	$N_2$	...	$N_n$
Probabilidades		$P_1$	$P_2$	...	$P_n$
Estrategias	$A_1$	$R_{11}$	$R_{12}$	...	$R_{1n}$
	$A_2$	$R_{21}$	$R_{22}$	...	$R_{2n}$
	...	...	...	...	...
	$A_m$	$R_{m1}$	$R_{m2}$	...	$R_{mn}$

Tabla 2-1 Matriz de decisión [5]

La matriz de decisión es una herramienta que nos facilita el análisis de la información para tomar una decisión racional (consiste en elegir aquella estrategia que vendrá seguida por la serie preferida de consecuencias, contando con que a cada posible estrategia le siguen determinadas consecuencias “Simon, 1957,1979”). La falta de información perfecta da pie a la introducción del concepto de *racionalidad limitada* frente al concepto de racionalidad vinculado a una situación de información perfecta. Asumiremos un *comportamiento satisfactorio*, [6], del agente decisor con el que se pretende obtener el mejor resultado posible dado el objetivo y la información de la que se dispone.

En el proceso de toma de decisiones se pueden identificar **cuatro fases fundamentales**, independientemente del problema planteado:

1. Fase de inteligencia. Identificación y definición del problema. Se estudiará de forma detallada los elementos clave del problema empresarial, identificando las consecuencias y causas del mismo. En el estudio se incluirán los elementos del entorno o elementos exteriores que puedan afectar su solución.
2. Fase de diseño. Estructurar la información disponible de forma que nos permita desarrollar las posibles alternativas. Los métodos empleados dependerán del grado de información disponible y del nivel organizacional del caso de estudio concreto.
3. Fase de elección. Se tendrán en cuenta las alternativas y sus resultados frente a los distintos estados de la naturaleza, se evaluarán y se seleccionará aquella que presente mejor resultado (de acuerdo con el objetivo perseguido) según el criterio seleccionado.
4. Fase de revisión. Se verifica las diferencias entre el resultado de la decisión tomada frente al objetivo.

El proceso de decisión busca encontrar la estrategia adecuada de acuerdo con el criterio de decisión seleccionado en base a la información disponible.

Una vez construida la matriz decisión y antes de aplicar cualquier criterio debemos eliminar la estrategia o estrategias que presenten resultados inferiores o iguales a otra para cualquier estado de la naturaleza. Este tipo de alternativa,  $A_j$  diremos que se encuentra dominada por otra  $A_i$  sí y solo si  $R_{jn} \leq R_{in}$  para todos los estados de la naturaleza  $n$  [5].

## 2.3 Teoría de la decisión

### 2.3.1 Decisiones multicriterio

Como bien hemos expuesto en la introducción, el principal problema a la hora de seleccionar la opción más deseada es definir qué es lo mejor entre las posibilidades que tenemos. Hablando de las posibilidades, hay que definir las alternativas posibles que existan, ya que éstas, podrán ser alternativas continuas o discretas. En el caso de que las alternativas no estén explícitamente definidas y sean incontables estaremos hablando de alternativas continuas, mientras que si las alternativas puedan ser numeradas y tratarlas explícitamente estaremos hablando de alternativas discretas. Respecto a lo mejor, podemos definirlo con un solo criterio, como hace la teoría de decisiones con riesgo, o según varios, como hace la técnica AHP.

El cometido de los métodos multicriterio para la ayuda en la toma de decisiones consiste en dar un apoyo para elegir entre un gran número de alternativas, en donde propone una clasificación de estas alternativas que tienen en cuenta sus preferencias. Las alternativas son parte esencial en los métodos multicriterio debido a que el decisor tiene un gran número de posibilidades entre las que puede elegir. Al poder jerarquizar los métodos multicriterio, las alternativas son evaluadas, es decir, hacer que sea posible medir las características propias de las posibilidades presentadas. La medición se encuentra en todo, es parte fundamental de la vida del ser humano. Medir es comparar, es expresar el resultado con

ayuda de un valor numérico sobre bases reconocidas y cuyas características del referencial se establecen claramente. Por lo tanto, la medida se convierte en una herramienta de desarrollo del sistema [7].

Para los métodos y técnicas de toma de decisiones hay que conocer una serie de conceptos sencillos que más adelante serán utilizados. Por un lado, el atributo, es decir, el valor de una decisión sin tener en cuenta al decisor. Por normal general, los atributos serán competidores y contrarios, por lo que serán contradictorios entre sí. Por otro lado, el objetivo será la maximización o minimización de un atributo, dicho en otras palabras, la dirección de su mejora. El nivel de aspiración será el nivel aceptable de un logro para un atributo. Hablando de objetivos o metas nos referimos a la combinación de un atributo con su nivel de aspiración. En último lugar, el criterio se define como el conjunto de objetivos y atributos importantes en un proceso de toma de decisión.

Una vez comprendidos y definidos estos conceptos básicos, cuando hablamos de decisión multicriterio, lo primero que tenemos que dar al problema es la solución. Esta técnica se basa en el concepto óptimo de Pareto, es decir, en la optimalidad paretiana de 1896 que establece que “*Una alternativa es eficiente si toda alternativa que proporcione una mejora en un atributo produce un empeoramiento en al menos otro de los atributos*” [8].

Una vez visto las decisiones multicriterio, explicaremos a continuación los métodos que resuelven decisiones multicriterio más conocidos y utilizados por distintas empresas y organizaciones. Explicaremos los principios básicos de cada método, por qué son útiles y cuáles son sus principales inconvenientes de cara a ser utilizados en la toma de decisiones. Por último, explicaremos cuál de ellos es el más apropiado para ser utilizado en el medio naval, y en concreto, en la Armada Española.

### 2.3.2 Métodos que resuelvan decisiones multicriterio

**El método Electre.** Este método creado y desarrollado por Roy, Sussman y Benayoun en 1996, es uno de los métodos multicriterio más conocidos y usados. ELECTRE (Algoritmo de Traducción de Elección y Eliminación, por sus siglas en inglés) es un método que pretende disminuir el número de soluciones de un problema, realizando una división del conjunto de soluciones en subconjunto de alternativas que sean favorables y otro subconjunto que sean desfavorables. El decisor busca ese subconjunto de alternativas favorables.

Este método de toma de decisión multicriterio permite seleccionar la mejor opción en función de un grupo de criterios preestablecidos. Disminuye el conjunto de soluciones eficientes tratando de obtener un conjunto de acciones N, de manera que, cualquier otra acción que no sea de N, estará sobre clasificada en por lo menos una acción de N. Este subconjunto no es el mejor grupo de acciones, pero es el grupo en el que se encuentra el mejor compromiso buscado.

El sistema de preferencias ELECTRE utiliza fórmulas matemáticas mucho más sencillas que otros sistemas de decisiones multicriterio como TOPSIS o AHP, que serán desarrollados más adelante. Es un método fácil basado en conceptos naturales como el hecho de estar de acuerdo con algo o no: no está basado en cuestiones complejas. La naturaleza subjetiva de los parámetros se compensa con un análisis exhaustivo y robusto.

La complejidad del método lo encontramos en la definición de los parámetros, ya que son susceptibles a las variaciones debidas a la incertidumbre de los datos, a la elección de un valor numérico de los criterios, a la misma subjetividad de la información, las ponderaciones y al umbral de incoherencia entre ellos.

El método se puede describir en breves pasos fácilmente comprensibles:

1. Definición del problema. Se definen el problema y los criterios a evaluar, y a continuación, se asigna un peso a cada criterio en una escala establecida por el propio usuario. Esta escala es

completamente libre y no está estandarizada como en otros métodos, véase AHP que veremos más adelante.

2. Definición de una matriz con los distintos criterios donde se realizan comparaciones entre pares de acciones. Las comparaciones se realizan en función a las relaciones de preferencia, no preestablecidas, y se llevan a cabo por pares de alternativas y por criterios.
3. Obtención de la matriz de concordancia y discordancia, y, en consecuencia, se calculan los índices de concordancia y discordancia a partir de cada par de alternativas y criterios.
4. Obtención de la matriz dominante. Se establecen umbrales de concordancia y discordancia para determinar las relaciones de sobre clasificación y se extraen las mejores alternativas del conjunto de alternativas de salida.
5. Obtención de los resultados.

No obstante, también existen desventajas en este método, donde dentro de los límites dados por la metodología, encontramos que, a nivel interno de cada una de las empresas y organizaciones, no se tiene conocimiento del nivel de componentes del sistema de innovación. Dicho en otras palabras, el desarrollo de los elementos no se puede conocer de manera individual, sino que, podemos conocer su desarrollo integrado.

La principal desventaja que encontramos en el método ELECTRE está en que solo se perciben las opciones de forma general desconociéndose su ámbito interno, por lo que nos lleva a utilizar otros métodos que si permitan conocer lo que pasa o sucede con los procesos internos de cada opción [7].

**El método Topsis.** El método TOPSIS (Technique for Order Performance by Similary to Ideal Solution, de sus siglas en inglés) fue aplicado por Chen en 1992 y es otro método multicriterio muy utilizado en las empresas y organizaciones. Es conocido por ser un método sencillo con una lógica racional donde el proceso es fácilmente comprensible y está bien expuesto en un algoritmo. El algoritmo permite encontrar las mejores opciones para cada criterio con una simple fórmula matemática en el que el cálculo se realiza teniendo en cuenta unos valores que se dan previamente a cada criterio, de igual manera que en los métodos ELECTRE y AHP, además del coste o ganancia que suponga cada criterio.

Sin embargo, el método TOPSIS también tiene inconvenientes. La principal desventaja que presenta es el “fenómeno del orden inverso”. Consiste en un cambio en el orden de las alternativas al eliminar o añadir una alternativa al problema de decisión. En ocasiones, puede llegar a producirse una inversión total en el orden, es decir, la elección en base a los resultados preferente es invertido completamente. Dicho en otras palabras, la alternativa que se considera la mejor, al añadir o eliminar una alternativa, se convierte en la peor. Este problema, por lo general, es totalmente inaceptable, ya que estamos dando por asentido un resultado completamente inverso y erróneo a lo que buscamos. Tras la realización de numerosos estudios por expertos en la materia, este fenómeno no ha podido ser solucionado. De este modo, descartamos este método como técnica de ayuda a la toma de decisiones en la Armada Española. No obstante, el método AHP de Saaty desarrolla una nueva fórmula que pretende solucionar el problema del fenómeno inverso del método TOPSIS [9].

## 2.4 El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

### 2.4.1 Introducción. Capacidades y limitaciones

El Proceso de Análisis Jerárquico, también conocido como AHP (por sus siglas en inglés), fue desarrollado por el científico Thomas L. Saaty en la década de los 80. Saaty, que trabajó en multitud de ocasiones para el gobierno de los EE.UU., fue profesor de la Universidad de Pittsburgh, donde realizó los estudios de análisis de operaciones y problemas de estadística fruto del desarrollo de su estudio de decisiones multicriterio entre otros.

El método AHP se basa en la resolución de problemas de la toma de decisión donde hay numerosos criterios jerarquizados a tener en cuenta. Hoy en día, su estudio se puede considerar esencial para el éxito de una empresa ya sea a nivel operativo, táctico o estratégico. Asimismo, también lo puede ser para la Armada Española.

Sin embargo, el proceso AHP puede verse como una herramienta matemática que estudia la influencia de los criterios y subcriterios, ponderados, sobre las alternativas establecidas, o incluso como una doctrina la hora de tomar decisiones.

Podemos destacar dos características principales de este método: El árbol de relaciones y las matrices de comparación por pares.

**El árbol de relaciones.** La principal característica que se destaca en el método AHP es su modelo a la hora de enfrentar el problema mediante una jerarquización. En este “árbol” encontramos en el vértice superior la meta principal que se pretende alcanzar. En el nivel inmediatamente inferior, se encuentran los criterios que se han seleccionado para resolver la problemática de decidir. Al mismo tiempo, estos criterios son jerarquizados, atribuyéndoles ciertos porcentajes o pesos de influencia en el mismo nivel para otorgarles mayor o menor influencia sobre el resultado final.

Es indispensable tener la información necesaria sobre todas las alternativas y criterios mediante la realización del árbol de relaciones. De modo que, a la hora de crear un buen árbol de relaciones es fundamental la experiencia como una herramienta de ayuda.

Tal y como se acaba de indicar, todos los niveles de jerarquía tienen un reparto de pesos o ponderaciones, porcentajes sobre cada uno de los criterios, de modo que, sumando todos ellos se obtenga un 100% total de influencia sobre la meta, criterio o subcriterio directamente superior, y en consecuencia sobre el objetivo a alcanzar. Para ello, el decisor adquiere el papel fundamental de establecer prioridades.

**Matrices de comparación por pares.** Esta segunda característica que presenta el método AHP es la comparación por pares. Cada alternativa, criterio o subcriterio está sujeto a una matriz que será sometida a una comparativa con otra de las posibles alternativas, criterios o subcriterios, de tal manera que se establecerá que características poseen mayor o menor medida cada uno de ellos, en función de la alternativa, criterio o subcriterio evaluado. Este proceso de comparación se puede realizar mediante ratios de preferencia, en caso de comparar alternativas, o ratios de importancia, en caso de comparar criterios y subcriterios.

Por otro lado, es necesario conocer también las limitaciones que condicionan esta teoría matemática. Debemos saber cuáles son sus puntos débiles y la influencia que tienen sobre el resultado final de este proceso jerárquico y sobre su eficacia.

Por lo general, la información que se obtiene es algo inconsistente y redundante. Esto se refleja en las matrices de comparación por pares, que los valores positivos asociados a una diagonal (superior o inferior) tendrán sus inversos en la otra diagonal todas ellas (Figura 2-2 Ejemplo Matriz con valores positivos e inversos en las dos diagonales), y por ello, hacen un mismo juicio dos veces, inevitablemente. Dichas repeticiones suponen tiempo perdido pues son improductivas. Sin embargo, también hay que destacar que dichas repeticiones tienen su parte positiva cuando se busca la redundancia en la mejora de la exactitud en las afirmaciones expuestas, minimizando errores y aumentando el grado de consistencia

en las matrices de comparación. Por último, tras la realización de los correspondientes pasos al proceso del AHP, se hace el cálculo de contribución global de todas las alternativas sobre la meta u objetivo principal, obteniendo el resultado final del proceso.

SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO	cámara vídeo	cámara nocturna	cámara térmica	telémetro	GPS
cámara vídeo	1	1/3	1/7	3	1/7
cámara nocturna	3	1	1/3	5	1/5
cámara térmica	7	3	1	5	1/5
telémetro	1/3	1/5	1/5	1	1/9
GPS	7	5	5	9	1

Figura 2-2 Ejemplo Matriz con valores positivos e inversos en las dos diagonales

Como bien se expone en [10], se distinguen cuatro puntos fundamentales para el correcto entendimiento de la teoría de AHP. Estos axiomas, como se denomina en la tesis, se refieren a la comparativa entre las alternativas y la jerarquía e influencia de cada una de éstas en torno a la meta final del proyecto. De esta manera tenemos:

**Axioma de comparación recíproca.** Hace referencia a que el decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: “Si  $A$  es  $x$  veces más importante que  $B$ , entonces  $B$  es  $\frac{1}{x}$  más importante que  $A$ ”.

**Axioma de homogeneidad.** Las preferencias o importancia se deben presentar mediante una escala limitada.

**Axioma de independencia.** A la hora de establecer importancias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas.

**Axioma de las expectativas.** Se asume que la jerarquía es completa para la finalidad de una toma de decisión.

Hay que destacar que el resultado no será el adecuado si no se cumplen todos ellos de forma estricta, ya que, estos cuatro axiomas son indispensables a la hora de plantear el problema mediante la técnica AHP.

#### 2.4.2 Desarrollo de técnica AHP

Una vez mostradas las características principales de la técnica AHP, además de sus capacidades y limitaciones, expondremos a continuación los pasos a llevar a cabo para el desarrollo de dicha técnica. Primeramente, nombraremos los pasos que en su día estableció Thomas L. Saaty, para a continuación, desarrollar de manera más profunda cada una de las etapas.

En 1980, Saaty propuso tres etapas para la realización de la técnica:

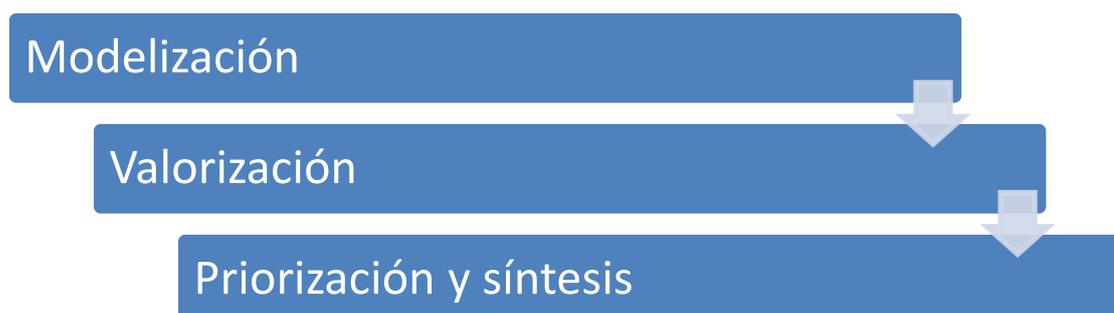


Figura 2-3 Etapas de Saaty para desarrollo metodología AHP

### 2.4.2.1 Modelización jerárquica

Este es el primero de los cuatro pasos que tenemos que realizar en la técnica AHP, y que, en su gran medida, constituye la esencia del método: la jerarquización.

La jerarquización permite establecer las relaciones entre la subordinación de unos elementos sobre otros. Esto hace que se defina claramente cuáles son los criterios y subcriterios, cuál es la ramificación del problema y cómo son los distintos niveles en los que se va a dividir nuestro estudio.

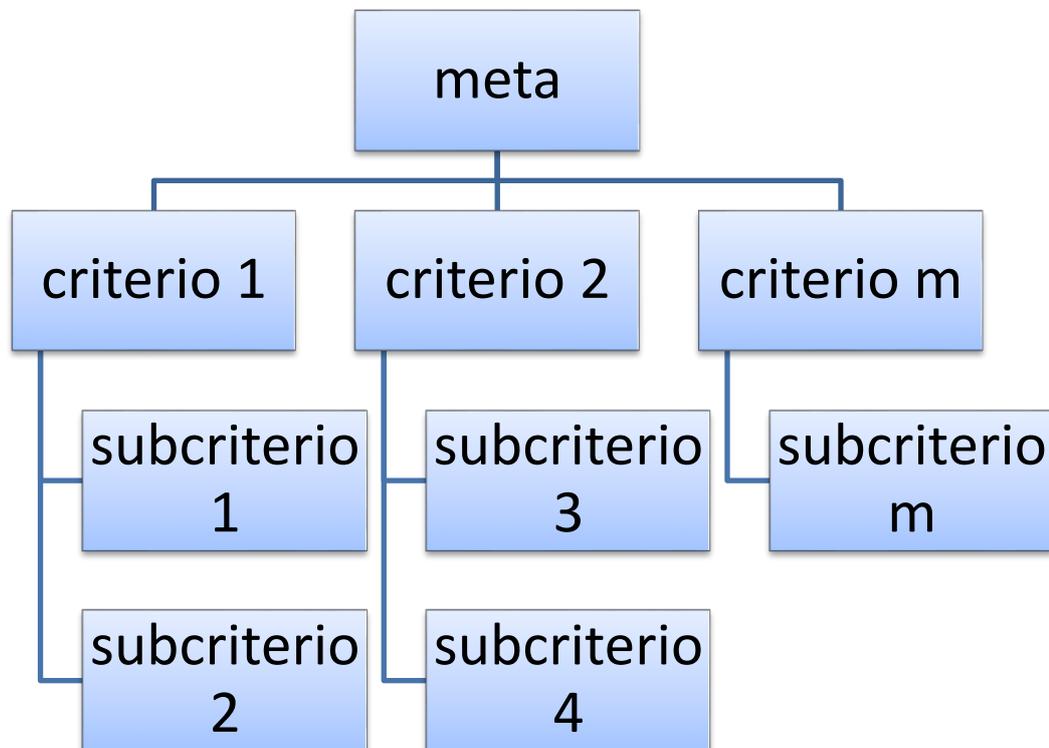


Figura 2-5 Ejemplo Organigrama Jerárquico

La jerarquización está compuesta por cuatro elementos: el objetivo o meta, los criterios, subcriterios y las alternativas.

**La meta.** Como se puede observar en la Figura 2-5 Ejemplo Organigrama Jerárquico, el vértice superior de la jerarquía siempre tendrá el objetivo principal, es decir, la meta. Dicha meta estará definida por la autoridad correspondiente, ya que será el propósito de la realización del problema a partir del cual se establecerán los criterios y subcriterios.

**Criterios.** En el nivel inmediatamente inferior, justo bajo la meta, se encuentran los criterios. Explicados ya anteriormente, los criterios son el eje principal sobre el que girará todo el estudio. Determinan los aspectos de mayor relevancia, según el decisor, que habrán de cumplir las alternativas. Partiendo de ellos, el decisor justificará y argumentará su decisión final. Es fundamental que la determinación de los criterios que habrán de tomar parte en el estudio sean lo más adecuada posible al caso.

Esto último es importante porque estos criterios definirán cuánto se acerca o se aleja la solución que se obtiene en el proceso AHP a la decisión más apta para el decisor. Una selección errónea o poco adecuada de los criterios puede terminar con una decisión, por parte del decisor, poco propicia.

Por lo tanto, el decisor debe conocer perfectamente cuáles son las preferencias respecto a los criterios, y del mismo modo, debe establecer los pesos o valores de cada criterio respecto a un 100% total.

**Subcriterios.** La complejidad de un problema que se estudia por esta técnica aumenta conforme crece los números de niveles en el árbol de jerarquización. Es decir, conforme aparecen subcriterio y sub-subcriterios sucesivamente, aumenta la dificultad de resolver el problema. Los subcriterios perteneciente a un mismo nivel recibirán, al mismo tiempo, una ponderación o peso de un 100% total, de manera, que la suma de todos los pesos o valores de los subcriterios de un mismo nivel sea igual al 100%.

Los subcriterios, de una manera u otra, dividen el valor del criterio del que preceden en más de un parámetro. Por ejemplo, en el caso de un criterio “diseño”, puede ser subdividido en dos subcriterios “autonomía” y “tamaño”. Dichos subcriterios tendrán un valor dentro un 100% que represente el criterio “diseño”. De esta manera, adquiere mayor precisión en el valor que se obtenga al final del problema. Conforme se aumenta el número de subcriterios y el número de niveles, se aumenta la complejidad del problema de estudio.

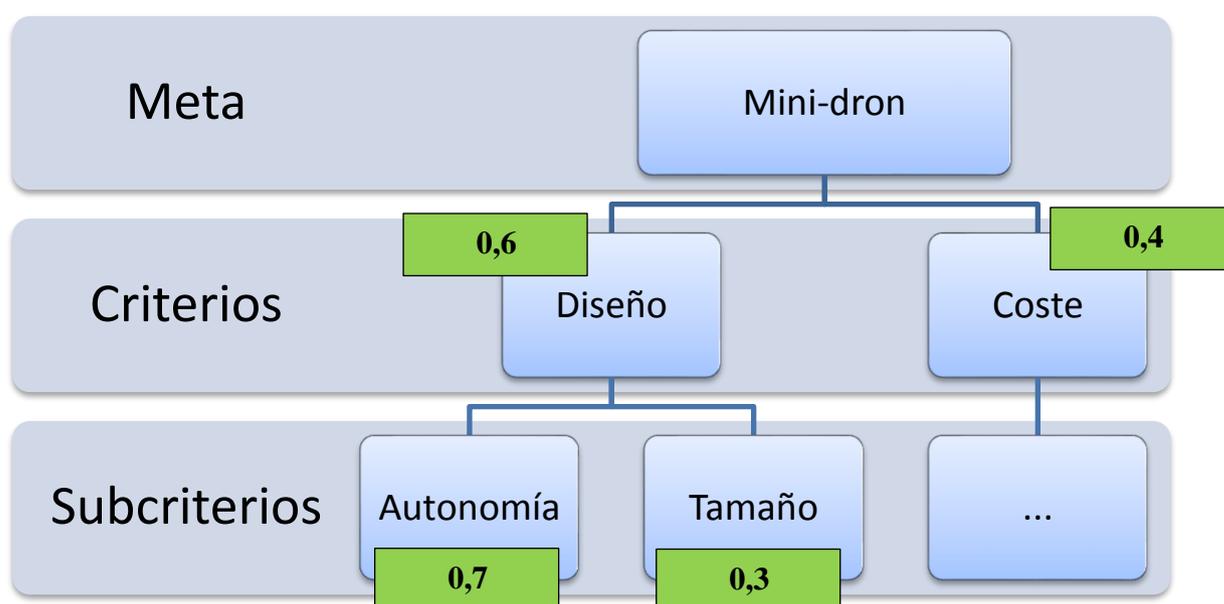


Figura 2-6 Ejemplo de la Subdivisión de un Criterio en Subcriterios

**Alternativas.** Forma el último nivel de la jerarquía. Constituyen las posibles soluciones para resolver el problema. El decisor decidirá sobre uno de ellos, el cual será el resultado que se obtenga al llevar a cabo todo el proceso. Se definen antes de comenzar el proceso, limitando las opciones dentro de un conjunto determinado por la autoridad competente.

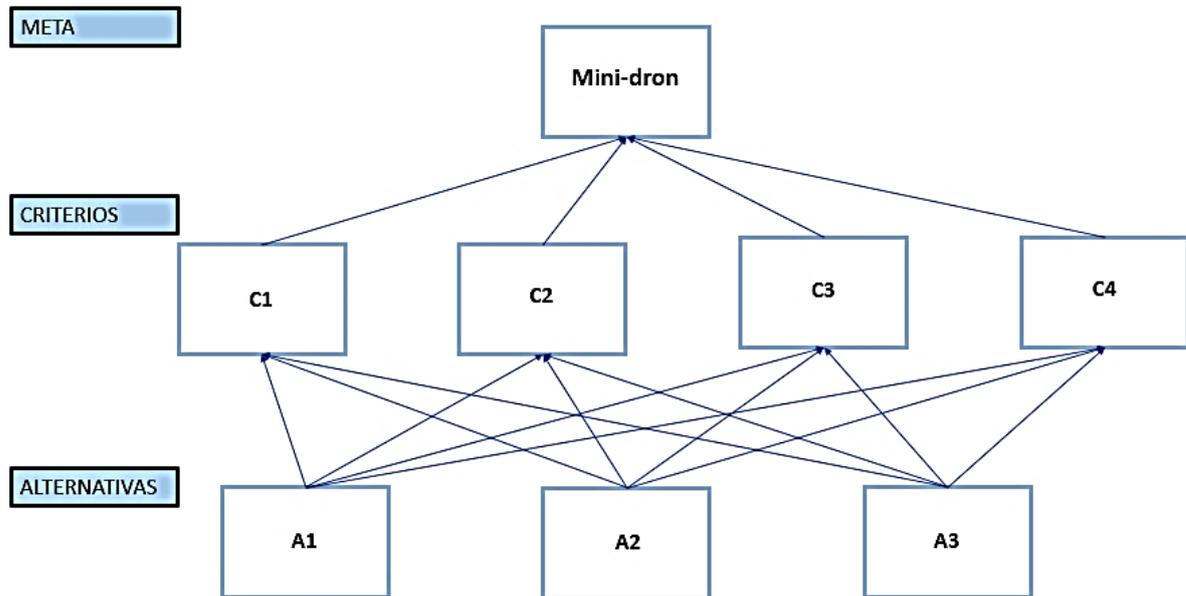


Figura 2-7 Ejemplo de árbol de relaciones completo

### 2.4.2.2 Valorización de criterios

En esta segunda etapa, los criterios escogidos para determinar la toma de decisión deben ser evaluados en términos de influencia. Es decir, la autoridad competente deberá decidir sus preferencias en cuanto a criterios y subcriterios, de modo que, tendrá que establecer pesos o valores a cada uno de los criterios escogidos. En definitiva, en función del peso o valor que le haya sido impuesto, cada criterio tendrá una mayor o menor influencia en el resultado final del método.

Haciendo referencia a la Tesis Doctoral de María del Socorro García Cascales “Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión y Soft Computing” [10], podemos establecer dos métodos para asignar pesos o valores a los criterios: asignación directa y asignación indirecta.

**Asignación directa.** La asignación directa utiliza una escala definida que relaciona valores cualitativos con valores numéricos. Este proceso no es complejo del todo, ya que, el decisor solamente ha de valorar un criterio de un modo cualitativo, para a continuación, apoyarse en una escala previamente definida que relacione ese valor cualitativo con un valor numérico. A diferencia de la asignación indirecta, no consiste en una comparación de cualidades entre todos los criterios, puesto que eso es bastante más complicado.

Como acabamos de exponer, hace falta crear una escala previamente para definir los valores de los criterios del problema. Ésta puede crearse mediante la función de utilidad de J. Von Neumann que define la correspondencia de datos numéricos con datos cualitativos.

En todo caso, aunque la escala puede ser creada por el decisor bajo su experiencia, no existe la necesidad de complicar más el problema cuando existen escalas ya definidas y de uso extendido para este tipo de problemas. Una de las más famosas y utilizadas es la escala de Saaty, además de la escala simple. En las siguientes figuras se detallan sus composiciones.

Valoración Cualitativa	Clasificación numérica
Muy débil	1
Débil	3
Moderada	5
Fuerte	7
Muy fuerte	9

**Tabla 2-2 Escala de Saaty [12]**

Valoración Cualitativa	Clasificación numérica
Muy débil	1
Débil	2
Moderada	3
Fuerte	4
Muy fuerte	5

**Tabla 2-3 Escala simple**

### **Asignación indirecta.**

Este tipo de asignación, indirecta, contempla un estudio más exhaustivo de las preferencias del decisor. De esta manera, los pesos que el decisor asocie a cada criterio serán más precisos. Además, podemos afirmar que la asignación indirecta es una de las características esencial que representan la técnica AHP.

Se puede definir, sencillamente, como la comparación por pares de todos los criterios. Todos los criterios serán comparados unos con otros, pero siempre de dos en dos. Usando una escala como la de Saaty, se obtendrán prioridades relativas de unos aspectos sobre otros mediante unos valores previamente definidos. Dichos valores relacionan las preferencias del decisor con un dato numérico que lo represente, haciendo real lo que al principio era considerado “cualitativo” e intangible.

### **2.4.2.3 Priorización y síntesis**

Cuando el decisor tiene que comparar unos criterios  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) para definir unas preferencias  $w_j$  (pesos asociados a los criterios), se basará en la matriz comparativa  $W$ . Se plantea la siguiente ecuación con el fin de encontrar el vector de prioridad global  $W$ :

$$W \cdot \vec{w} = \mu \cdot \vec{w}$$

**Figura 2-8 Ecuación vector prioridad global [10]**

De igual manera, podemos definir esta ecuación como un sistema de matrices tales que:

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \mu \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

**Figura 2-9 Matrices para obtener vector prioridad global [10]**

En estas ecuaciones o matrices encontramos que:

$\mu$  es un valor propio de  $W$ .

$W_j$  representa los pesos de los criterios, es decir, es la magnitud que se mide.

Los elementos que la matriz  $W = w_{ij}$  con  $w_i = \frac{w_i}{w_j}$  para  $i, j = 1, 2, \dots, n$  son números positivos.

La matriz  $W$  tiene solo un autovalor distinto de cero. A consecuencia de que cada fila es un múltiplo constante de la primera, el rango de la matriz es siempre 1. El autovalor de  $W$  distinto de cero es igual a la dimensión  $n$  de la matriz y  $w$  es el vector propio asociado. Podemos observar que cada columna de la matriz  $W$  es múltiplo constante del vector  $w$ . De este modo, podemos encontrar el vector  $w$  mediante la normalización de una columna cualquiera de  $W$ .

Igualmente, se dice que  $W$  es consistente porque satisface la condición  $w_{ik} \cdot w_{ki} = w_{ii}$  para todo  $1, j, k$ . Podemos observar que la suma de los elementos de la matriz de la columna  $j$  es igual a:

$$\frac{1}{w_j} \cdot \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

**Figura 2-10 Ecuación suma de elementos de una columna [10]**

De modo que, si se normaliza la matriz  $W$  sumando las columnas, en cada una de ellas se obtiene el vector  $w$ , por lo que obtendremos el promedio de cualquier fila  $i$ , siendo éste  $w_i$ . Debido a que la matriz de comparaciones  $R$  se construye con los juicios del decisor y que los pesos no son conocidos, la matriz  $R$  puede entenderse como una alteración de la matriz  $W$ . Luego, existe la posibilidad de que más de un valor propio distinto de cero. El máximo valor propio,  $\lambda_{max}$ , está asociado a un vector propio  $\vec{z}$ , que es considerado una aproximación de prioridades o pesos  $w$ . Puede decirse que:

$$R \cdot \vec{w} = \lambda_{max} \cdot \vec{w}$$

**Figura 2-11 Ecuación que relaciona  $R$  y  $w$  [10]**

Donde  $R$  es la matriz de comparación de criterios creada al inicio por el decisor, constituida por las preferencias entre unos criterios y otros.

En el momento en el que el decisor tiene que definir las prioridades a través de la comparación entre pares para obtener los pesos relativos de cada criterio, realmente está creando una matriz  $R$  donde los elementos son valores numéricos que representan la importancia entre dos criterios distintos respecto al nivel inmediatamente superior en el árbol de relaciones jerárquico al que pertenecen.

A la hora de establecer estas prioridades o preferencias, el decisor puede crear una escala para el caso en concreto o utilizar las escalas anteriormente expuestas y de uso generalizado. En nuestro caso, usaremos la escala fundamental de Saaty:

Juicio verbal de las preferencias entre Criterio <i>i</i> y Criterio <i>j</i> .	Clasificación numérica
<i>C<sub>i</sub></i> y <i>C<sub>j</sub></i> son igual de importantes	1
<i>C<sub>i</sub></i> es ligeramente más importante que <i>C<sub>j</sub></i>	3
<i>C<sub>i</sub></i> es más importante que <i>C<sub>j</sub></i>	5
<i>C<sub>i</sub></i> es bastante más importante que <i>C<sub>j</sub></i>	7
<i>C<sub>i</sub></i> es extremadamente más importante que <i>C<sub>j</sub></i>	9

**Figura 2-12 Escala fundamental de Saaty [12]**

**Clasificación numérica 1:** Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.

**Clasificación numérica 3:** El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.

**Clasificación numérica 5:** El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente un elemento frente al otro.

**Clasificación numérica 7:** Un elemento domina fuertemente. Esa dominación está aprobada en la práctica.

**Clasificación numérica 9:** Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.

Los números en la escala indican la proporción en la que uno de los elementos que se consideran en la comparación por pares domina al otro respecto a un criterio que tienen en común. El elemento menor recibe un valor inverso respecto al mayor. En otras palabras, si  $x$  es el número de veces que un elemento domina a otro, este último elemento recibe un valor  $\frac{1}{x}$ . Por lo tanto, de esta manera, se cumple el axioma de reciprocidad que se nombró anteriormente, ya que se cumple que la multiplicación entre ellos siempre es igual a 1.

MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	1/3	1/7	3	1/7
C2	3	1	1/3	5	1/5
C3	7	3	1	5	1/5
C4	1/3	1/5	1/5	1	1/9
C5	7	5	5	9	1
suma	18.333	9.533	6.676	23.000	1.654

**Figura 2-13 Ejemplo de matriz de comparación por pares**

Una vez creada la matriz  $R$ , calculando el auto vector asociado al autovalor máximo de dicha matriz, obtendremos los pesos  $w_j$ . Estos cálculos se pueden realizar de una manera sencilla con las aplicaciones informáticas de hoy en día, como es el Microsoft Excel. Sin embargo, los pasos que realizan dichas aplicaciones son los siguientes:

Obtención de la matriz normalizada,  $R_{Norm}$ , dividiendo cada elemento de la columna j-ésima por la misma de todos los elementos de dicha columna:

$$R_{Norm} = \left[ r_{ijNorm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \right]$$

**Figura 2-14 Obtención matriz normalizada [10]**

Estimación del vector de pesos, w, calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. De modo que:

$$\hat{w} = \left[ \hat{w}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{1jNorm}, \hat{w}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{2jNorm}, \dots, \hat{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ijNorm}, \dots, \hat{w}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{njNorm} \right]$$

**Figura 2-15 Obtención vector de pesos [10]**

La solución de este método se encuentra en dicho vector peso w. La alternativa que obtenga el mayor valor numérico de dicho vector será la primera solución que nos presenta esta herramienta de toma de decisiones. La segunda solución será aquella con el segundo valor numérico más alto y así sucesivamente.

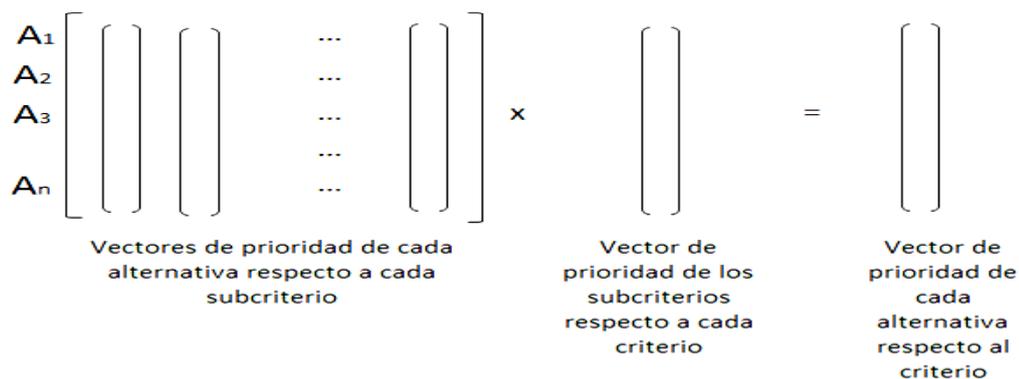
Llegados a este punto, el método AHP permite conocer la consistencia de las matrices, y en concreto, interesa conocer la consistencia de la matriz R. Puede existir la posibilidad de sesgo entre los criterios debido a que el decisor no es preciso con los juicios verbales que ha definido. Para ello, haremos uso del Índice de Consistencia para obtener los valores de la consistencia mediante la fórmula:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

**Figura 2-16 Fórmula Índice de Consistencia [12]**

Para calcular el valor de  $\lambda_{max}$ , se multiplica en primer lugar la matriz R por el vector w, obteniendo un vector columna. Cada elemento del vector columna se divide por el mismo vector w, generando así un segundo vector columna. Se hace un promedio de estos valores y se obtiene  $\lambda_{max}$ . Para definir las prioridades locales entre los subcriterios, se deberán hacer los siguientes pasos. En el caso de que en la modelización del problema de decisión como una jerarquía se ha considerado la subdivisión de algunos o todos los criterios en subcriterios, se deberá calcular el vector de pesos asociado a dichos subcriterios. El procedimiento es similar al descrito en el paso anterior, pero en vez de comparar criterios, se deberán realizar las comparaciones pareadas entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. De esta manera, se puede calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio originario.

Una vez que obtenemos los vectores de prioridad de todas las alternativas relativos a cada subcriterio, se obtiene una matriz que se multiplica por el vector de prioridad de los subcriterios respecto al criterio del cual proceden. De este modo, se obtiene el vector de prioridad de cada una de las alternativas con respecto a ese criterio en concreto. Este proceso se repite con cada uno de los criterios y cada una de las alternativas, quedando resumido en la siguiente figura:



**Figura 2-17 Obtención del vector de prioridad de cada alternativa [10]**

Dicho valor de CI se compara, a continuación, con el Índice de Consistencia Aleatorio (IA) que se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100 000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty. El valor de IA viene reflejado en la siguiente tabla que depende de la dimensión de la matriz.

Table 2. Alonso-Lamata RI values and standard deviation (for 100000 and 500000 matrices).

n	100000 matrices		500000 matrices	
	RI	std	RI	std
3	0.5245	0.6970	0.5247	0.6973
4	0.8815	0.6277	0.8816	0.6277
5	1.1086	0.5087	1.1086	0.5087
6	1.2479	0.4071	1.2479	0.4071
7	1.3417	0.3312	1.3417	0.3310
8	1.4056	0.2779	1.4057	0.2777
9	1.4499	0.2383	1.4499	0.2381
10	1.4854	0.2076	1.4854	0.2074
11	1.5141	0.1847	1.5140	0.1844
12	1.5365	0.1670	1.5365	0.1667
13	1.5551	0.1516	1.5551	0.1514
14	1.5713	0.1383	1.5713	0.1380
15	1.5838	0.1279	1.5838	0.1276

**Tabla 2-4 Índice de Consistencia Aleatorio (IA) con respecto a la dimensión de la matriz [13]**

Dividiendo el Índice de Consistencia (IC) entre el Índice de Consistencia Aleatorio (IA) obtenemos el denominado Ratio de Consistencia (RC) que determina si la matriz es consistente o no.

$$RC = IC / IA$$

**Figura 2-18 Fórmula ratio de consistencia**

<b>Valor de RC</b>	<b>Resultado</b>
RC=0	La matriz es consistente
RC < 0,1	El vector de los pesos obtenido se da por válido, la inconsistencia de la matriz es admisible
RC > 0,1	La inconsistencia de la matriz R es inadmisibile y se requiere revisar los juicios del decisor

**Figura 2-19 Resumen resultados ratio de consistencia**

Toda esta información ha sido consultada en las referencias [10] y [12].

## 2.5 Toma de decisiones en la Armada

Se puede afirmar que en la Armada se toman decisiones a diario, desde un marinero hasta un almirante. Estas decisiones pueden llevarse a cabo sobre la marcha cuando se están realizando trabajos rutinarios donde aquellas personas, por experiencia, deciden sobre los problemas a los que se ven enfrentados. No obstante, cuando hablamos de decisiones a alto nivel, la marina cuenta con una sección concreta, la sección de planes, la cual es dependencia directa del Segundo AJEMA (Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada). En esta sección se decide el futuro de la Armada en la mayoría de los aspectos de organización y futuro.

Hasta hace pocos años, esta “empresa” debía elegir entre uno u otro producto basándose en herramientas como la experiencia o la intuición, sin embargo, los criterios para la toma de decisiones han incrementado significativamente. Donde antes solo tenían en cuenta un criterio mayormente, hoy en día influyen diversos factores como el coste, la operatividad, la logística, o incluso factores políticos. De esta manera, las decisiones son cada vez más complejas.

De una manera resumida, tradicionalmente las técnicas de optimización se tenían en cuenta en decisiones donde tan solo había que cumplir con un único objetivo, donde, minimizando o maximizando algunas variables con sencillas ecuaciones, se obtenía una solución clara sobre la decisión a tomar. Sin embargo, existen hoy en día muchos aspectos como el desarrollo y modernización o la competitividad en el mundo empresarial que hacen que la Armada haya de enfrentarse a tomar decisiones en situaciones donde se requiere un producto o servicio que cumpla con un mayor número de requisitos para el beneficio propio. Esto hace que el proceso de toma de decisiones se dificulte en cualquier ámbito.

Como conclusión, es evidente la necesidad de utilizar técnicas de ayuda a la toma de decisiones o modelos matemáticos para resolver de una manera más efectiva este problema.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Metodología

La decisión de elegir el mejor mini-UAV para Infantería de Marina depende principalmente de la elección de las aplicaciones a las que va a ser utilizado y los requisitos y criterios que se van a tener en cuenta. De nada sirve, establecer unas hipotéticas funciones que no se puedan llevar a cabo en la realidad por falta de presupuesto o por falta de modelos en el mercado debido a unas aplicaciones que no estén basadas en información fiable y corroborada.

Para ello, realizamos una serie de entrevistas a oficiales experimentados en el cuerpo de Infantería de Marina para obtener las principales aplicaciones que tiene un mini-UAV hoy en día, para a continuación, determinar los requisitos materiales que son necesarios para dichas aplicaciones y, por último, decidir cuáles son criterios y subcriterios, si los hubiera, para tener en cuenta a la hora de aplicar el método AHP y resolver el problema de la compra del mejor mini-UAV.

#### 3.1.1 Entrevistas

Una vez planteado y analizado el problema de elegir el mejor mini-UAV para la Infantería de Marina, pasamos a decidir cuáles son las principales aplicaciones y funciones que podemos obtener en las entrevistas y, así mismo, decidir los requisitos y criterios que vamos a establecer para la aplicación del método jerarquizado AHP. En una primera fase, entrevistamos a expertos en la materia como son el Comandante de IM D. Sergio Diez González, el Comandante de IM D. Andrés Ignacio Torre López, el Capitán de IM D. Andrés García Yubero y el Capitán de IM D. José Manuel Esnaola Rico para sacar el dictamen de las mejores aplicaciones y los requisitos que necesitaremos para el dron. En una segunda tanda de entrevistas, gracias a su experiencia, obtendremos cuáles son los criterios y subcriterios, si los hubiera, que aplicaremos a dicho método en función de las principales aplicaciones que hayamos sacado en conclusión.

En la primera entrevista realizada al Comandante Diez González destacamos tres usos generalizados de los mini-drones en Infantería de Marina: observación de tiro, operaciones de combate en población o CQB y operaciones de reconocimiento. En cada caso, detalla que es necesario el uso de cámaras, ya sean convencionales o infrarrojas o térmicas, sistemas de posicionamiento GPS y un telémetro láser para la medición de distancias (ver Anexo 1,62).

En cuanto al Comandante Torre López, nos explica, por un lado, el uso de drones para operaciones de observación, no solo de tiro, si no observaciones más generales y adquisición de blancos. Por otro lado, comenta que pueden ser utilizados como estaciones meteorológicas o realizando operaciones a modo de *relé* en las comunicaciones. Para estos casos, son necesarios, de nuevo, cámaras, GPS y

telémetros y para recogida de datos meteorológicos, una estación meteorológica y una antena para que funcione a modo de *relé* (ver Anexo 1,64).

El Capitán García Yubero encuentra un uso en operaciones de vigilancia y observación, ISTAR (Inteligencia, Vigilancia, Adquisición de blancos y Reconocimiento, por sus siglas en inglés). Piensa que puede funcionar como *relé*, pero de manera secundaria. Una vez más, afirma que son necesarios cámaras, GPS y una antena receptora/emisora si se emplea como *relé* (ver Anexo 1,66).

Por último, el Capitán Esnaola Rico cuenta que se pueden emplear para vigilancia, reconocimiento de objetivos o en combate en población, además de, observación de tiro. Comenta que son esenciales cámaras, preferiblemente térmicas, GPS y telémetros láser (ver Anexo 1,69).

Como norma general, todos los entrevistados coinciden en que la estación meteorológica en el dron, su uso como *relé* y utilizarlo en operaciones de decepción son todas funciones secundarias del dron. Destacan que como misiones principales son reconocimiento, vigilancia, adquisición de blancos, observación de tiro y combate en población.

### 3.1.2 Aplicaciones

En base a las entrevistas expuestas por oficiales de Infantería de Marina, definimos las principales aplicaciones que vamos a dar a nuestro mini-dron, de modo, que podamos explicar a continuación los requisitos que serán necesarios y los criterios que vamos a tener en cuenta para aplicar el método AHP.

Después de realizar 4 entrevistas personales, sacamos en definitiva 5 funciones compatibles entre ellas: operaciones de reconocimiento, vigilancia, adquisición de blancos, observación de tiro y operaciones de CQB (combate en población, según sus siglas en inglés). Para comprender en qué consiste cada una, las definimos y explicamos.

**Operaciones de reconocimiento y vigilancia.** Existen debido a que el Comandante de la unidad necesita, en todo momento, conocer información para transformarla en inteligencia y realizar las operaciones con garantías de éxito, y, al mismo tiempo, debe impedir que el enemigo adquiera información sobre su unidad. Para ello, debe establecer un sistema de vigilancia tan completo como le sea posible, mediante puestos de observación y de escucha y reconocimiento, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), cámaras de vídeo o fotográficas, radares de vigilancia y sensores. Asimismo, para evitar que el enemigo pueda llevar a cabo acciones por sorpresa, establecerá un dispositivo de seguridad que comprenda operaciones de reconocimiento y vigilancia [14].

Por lo tanto, las operaciones de reconocimiento son operaciones encaminadas a obtener información sobre unidades, personas, infraestructuras y terreno o a conseguir datos sobre las características de una zona determinada.

Las operaciones de vigilancia se realizan mediante asentamientos fijos y camuflados e implica observación continua desde posiciones estáticas mientras que el reconocimiento implica movimiento.

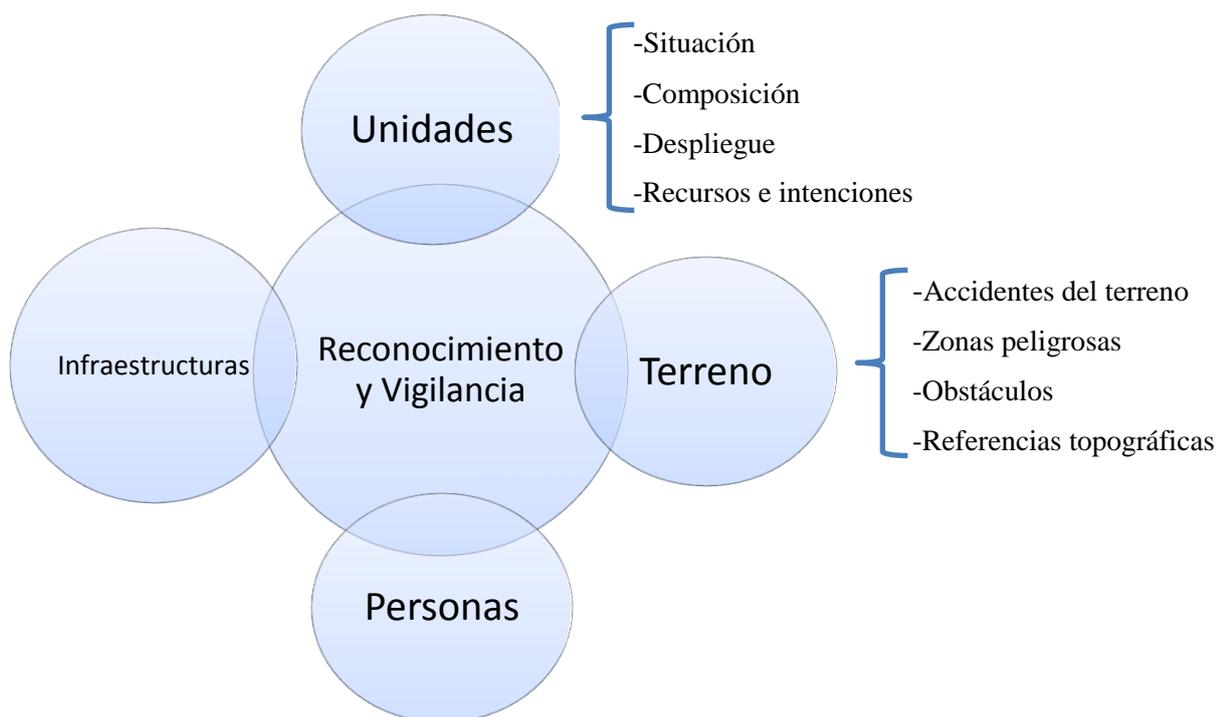


Figura 3-1 Esquema Reconocimiento y Vigilancia

**Operaciones de adquisición de blancos.** Existen cuatro métodos para localizar un blanco. Por coordenadas rectangulares, por transporte desde un punto conocido, por coordenadas polares, y por disparo de jalonamiento. Cualquiera que sea el método empleado, el observador remitirá siempre al Centro de Dirección de Fuegos (FDC, ahora en adelante) la dirección, es decir, la orientación de la línea observador-blanco, que se redondeará en 10 milésimas [15].

1. Coordenadas rectangulares. Es el método más deseable, si el oficial artillero ha efectuado un estudio correcto del plano y del terreno. Comprende las coordenadas del blanco y la orientación observador-blanco.
2. Transporte desde un punto conocido. Es necesario que la referencia a usar sea conocida por el FDC. Su exactitud es relativamente buena, aunque es el más lento de los cuatro métodos. El oficial artillero no necesita normalmente el empleo del plano. Un punto conocido puede ser un blanco sobre el que se haya tirado anteriormente o un punto característico del terreno.
3. Coordenadas polares. Es el único método en que el FDC debe conocer las coordenadas de la situación del oficial artillero. La precisión de este método depende de la habilidad del oficial artillero para calcular distancias.
4. Disparo de jalonamiento. Es el método menos deseable por su poca precisión. Se emplean cuando el oficial artillero no dispone de plano y no puede localizar el blanco por otros métodos.

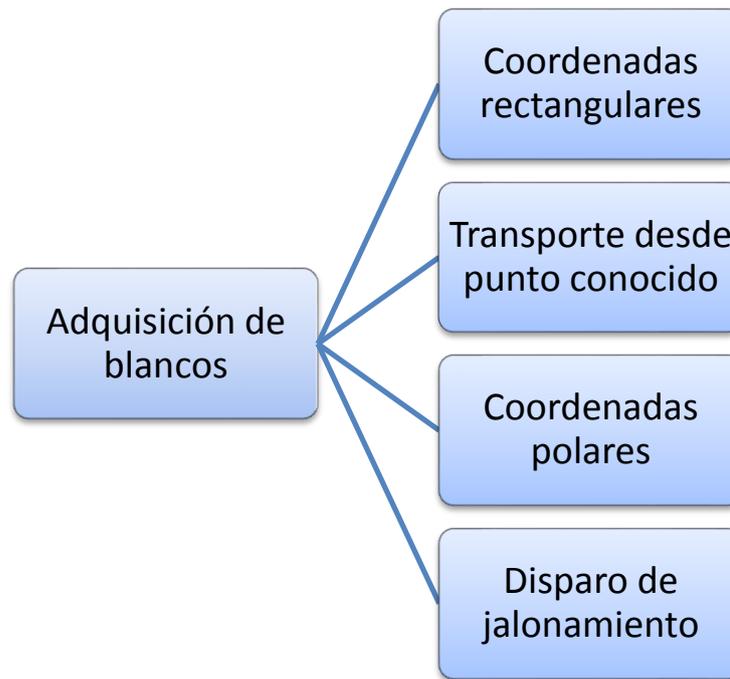


Figura 3-2 Esquema Adquisición de Blancos

**Observación de tiro.** Los fuegos de artillería y morteros son las armas que más bajas producen en el combate convencional, sin embargo, para que sean eficaces necesitan ser observados, así como ser efectuados sobre blancos previamente identificados y situados. Por ello, la observación es vital para la ejecución del tiro y todo el personal combatiente de Infantería de Marina debe conocer estos procedimientos. La observación se emplea para [16]:

1. La detección, identificación y situación de blancos. Una vez detectado un blanco, el observador avanzado envía los datos necesarios para que el Centro de Dirección de Fuego pueda resolver el problema del tiro y decidir cómo batirlo.
2. La corrección del tiro. Permite batir el blanco, subsanando los errores topográficos y balísticos producidos por la variación de las condiciones del momento.
3. Batir blancos con eficacia. Para obtener los efectos deseados e informar al Centro de Dirección de Fuego.
4. La vigilancia general de la zona de combate. Para que los observadores avanzados, sin retrasar las misiones de fuego, tengan informado al mando.

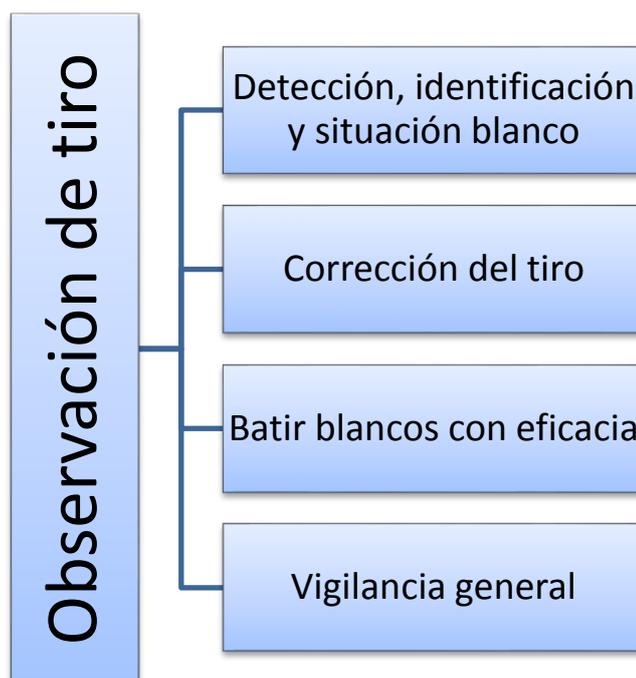


Figura 3-3 Esquema Observación de Tiro

**Operaciones de CQB.** La ONU estima que, que el año 2020, dos tercios de la población mundial se concentrará en núcleos urbanos. Como consecuencia de ello se puede decir que, con mucha probabilidad, nuestro Ejército, junto con otros de su entorno, participará en operaciones de paz en las que el escenario será principalmente el medio urbano.

En el medio urbano, la primera premisa que se debe tener en cuenta es que cada población es un caso único; si esto no se considera, se puede fracasar en el cumplimiento de nuestra misión. Por lo tanto, hay que tener en cuenta [17]:

1. La estructura urbana. Antes del inicio de la operación se estudiará el lugar donde actuará la unidad para determinar, en función de la estructura urbana, el procedimiento a utilizar. No siempre será útil el ensayarlo durante el enfrentamiento.
2. El problema humano. El respaldo de la población civil será indispensable para el éxito de la misión. Se aplicará el dicho *“No hagas nada que no quisieras para tu propia familia”*.
3. La amenaza. El enemigo se nos enfrentará, generalmente, dentro de las ciudades, organizado en pequeños grupos reunidos tan sólo para acciones esporádicas. Tendrá personal infiltrado cerca de nosotros, por lo que habrá que extremar la seguridad y el secreto en la preparación de las acciones. Se aplicarán los dichos *“La amenaza no descansa, mantén el secreto”* y *“El exceso de confianza será el peor enemigo”*.

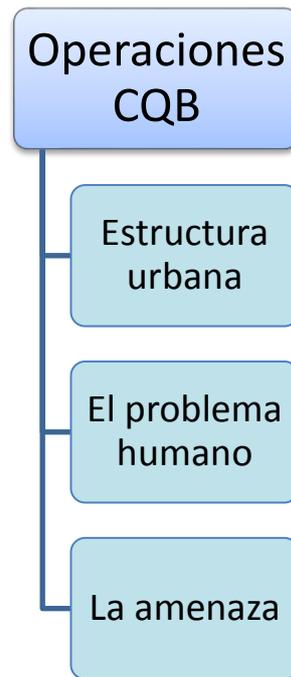


Figura 3-4 Esquema Operaciones CQB

### 3.1.3 Requisitos

Si bien queremos que el mini-dron cumpla las funciones que acabamos de describir, necesitará unos medios materiales que le hagan cumplir con las misiones encomendadas. En este caso, todas las misiones relacionadas con reconocimiento, vigilancia, observación, adquisición de blancos y combate en población tienen la necesidad de llevar incorporados en todos los drones una cámara, ya sea ésta fotográfica, de vídeo, infrarroja o térmica y en algunos casos un sistema de posicionamiento como el GPS y un telémetro para el caso concreto de una mayor eficacia en la observación de tiro.

**Cámara fotográfica o de vídeo.** Una cámara de fotografía o cámara de fotos es un dispositivo utilizado para capturar imágenes o fotografías. Las cámaras actuales se combinan con elementos sensibles (películas o sensores) al espectro visible o a otras porciones del espectro electromagnético, y su uso principal es capturar la imagen que se encuentra en el campo visual [18].

La cámara de vídeo es un dispositivo generalmente portátil que permite registrar imágenes y sonidos, convirtiéndolos en señales eléctricas que pueden ser reproducidos por un aparato determinado [19].

Hoy en día, en el ámbito civil, el principal uso que le damos a los drones, y en especial, a los mini-drones son la toma de fotografías y vídeos. Desde que salieran al mercado, a principios del siglo XX, se han utilizado con fines de investigación o de entretenimiento. Con el desarrollo de la tecnología, las cámaras que encontramos en los drones del mercado son las más avanzadas, de modo, que tenemos a nuestro alcance la máxima resolución, a día de hoy, para nuestros drones (Ilustración 3-1 Ejemplo Fotografía desde ).

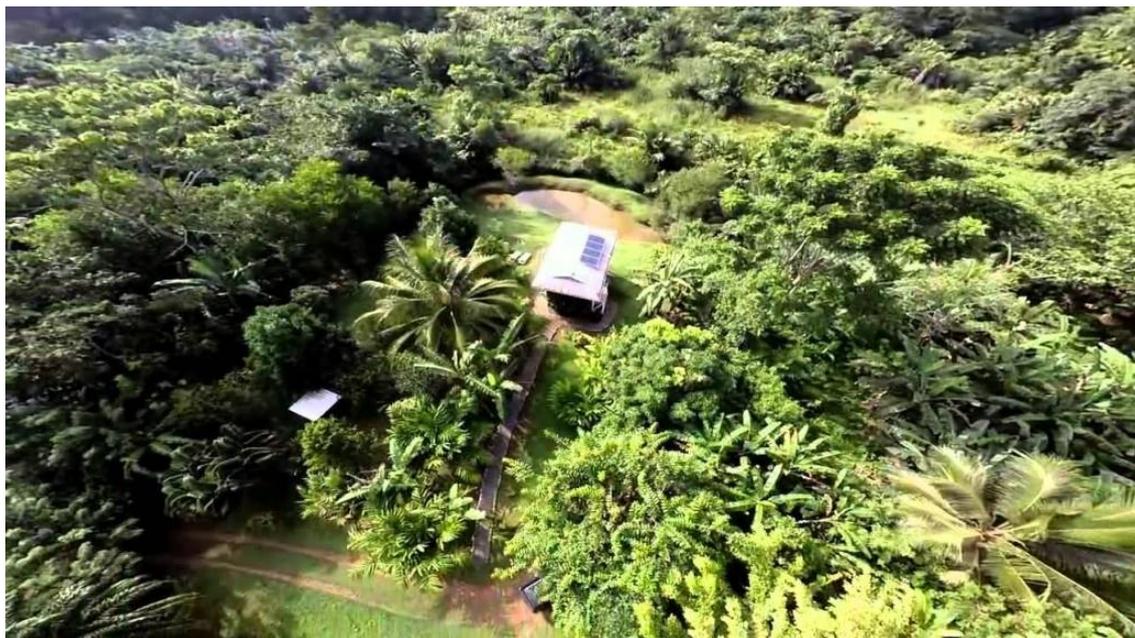


Ilustración 3-1 Ejemplo Fotografía desde Dron [20]

**Cámara de visión nocturna.** Son usados como visores nocturnos, centrados en la banda del IR (infrarrojo) cercano (es decir, la parte del espectro IR que se encuentra más próxima a la luz visible), que intensifican la luz residual del ambiente (cualquier tipo de luz residual). Existen dos tipos de visores: en escala de grises y en escala de verdes. Pese a lo que pudiera parecer, los mejores son los que muestran las imágenes en escala de verdes, dado que el verde es la frecuencia central del funcionamiento del ojo humano, y, por tanto, donde nuestra percepción es mucho más aguda [11].

**Cámara térmica.** La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o la radiación térmica, situada en el infrarrojo medio. Cualquier objeto que tenga una temperatura superior al cero absoluto ( $0^{\circ}$  Kelvin o  $-273^{\circ}$  C), irradia ondas en la banda infrarroja. Cuando un objeto no tiene la temperatura suficiente para emitir ondas en el espectro visible, emitirá la mayor parte de su energía como ondas infrarrojas. La emisión se incrementa a medida que las moléculas que integran un cuerpo cualquiera adquieren mayor temperatura (Ilustración 3-2 Comparativa Imagen IR y Térmica) [11].

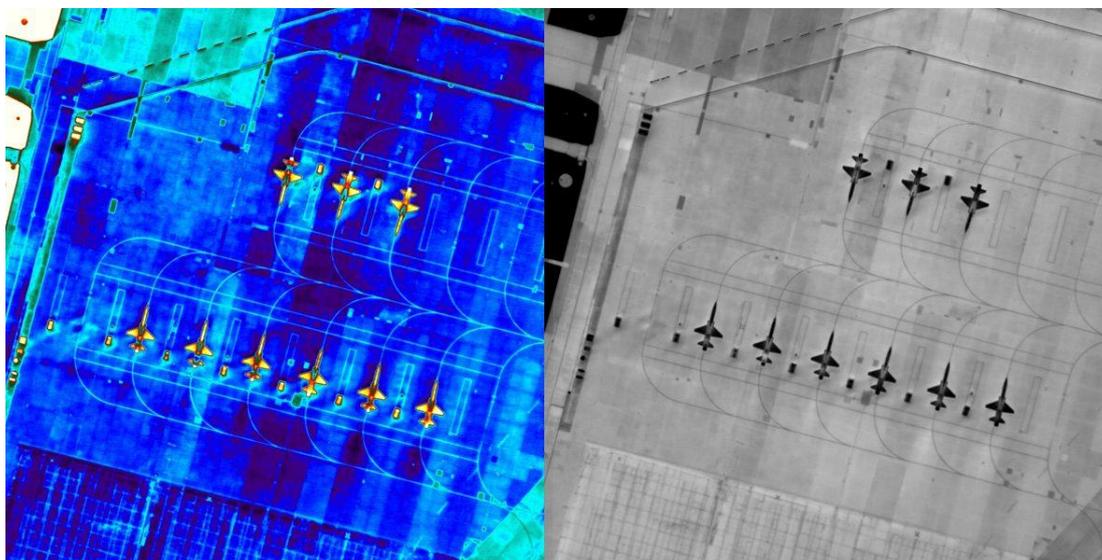


Ilustración 3-2 Comparativa Imagen IR y Térmica [20]

**Sistema de posicionamiento GPS (Global Positioning System).** Es un sistema de posicionamiento por satélite que surge de la idea de que, si desde una estación de tierra se puede predecir la órbita de un satélite, también se puede determinar la posición de un punto de la tierra si la órbita del satélite se conoce.

Se define como un sistema militar/civil de posicionamiento basado en 24 satélites, que proporciona posiciones en tres dimensiones, velocidad y tiempo, las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y en todas las condiciones climáticas.

A la hora de realizar el posicionamiento, hace falta un conjunto de parámetros que definen el punto fundamental o de referencia llamado “*Datum*”. Un *Datum*, define entre otras cosas, la posición de origen y la orientación de las líneas de latitud y longitud del sistema de coordenadas. El WGS-84 es el sistema referencia con *Datum* en el centro de la Tierra y con dirección del eje de rotación de la Tierra creado entre los años 1900 y 1905 para el sistema GPS.

Los satélites GPS llevan relojes atómicos de alto grado de precisión. La información horaria se sitúa en los códigos de transmisión de los satélites, de forma que un receptor puede determinar en cada momento en cuánto tiempo se transmite la señal. El receptor utiliza la diferencia de tiempo entre el momento de la recepción y el tiempo de transmisión para calcular la distancia al satélite. Con tres distancias a tres satélites y conociendo la ubicación del satélite desde donde se envió la señal, el receptor calcula su posición en tres dimensiones.

El sistema GPS se divide en tres grandes segmentos: el segmento espacial, que se compone de los satélites, cohetes Delta y lanzaderas; el segmento control, que incluye las estaciones situadas próximas al Ecuador y que se encargan de calcular las efemérides de cada uno de los satélites; y, por último, el segmento usuario, que está formado por los receptores GPS (Ilustración 3-3 Ejemplo de GPS en mini-) [21].



**Ilustración 3-3 Ejemplo de GPS en mini-dron [22]**

**Telémetro láser.** Un telémetro láser funciona de forma muy parecida a un radar. Estos dispositivos emiten un pulso de luz láser (normalmente en la banda de IR) y cronometran cuánto tiempo tarda en llegar de vuelta. En función de dicho tiempo, son capaces de calcular la distancia al objetivo. Tienen una serie de limitaciones. Por un lado, la distancia mínima de medida, que viene dada por la longitud del pulso transmitido. Tienen, por otro lado, problemas a la hora de medir superficies muy lisas, pero que están lejanas al telémetro, y que, además, tienen una cierta inclinación frente al rayo incidente. Dichas superficies generarán un fuerte rayo reflejado, pero que no irá en la dirección original del telémetro. Por último, problemas a la hora de medir superficies muy irregulares (como la distancia a la copa de un árbol con follaje abundante), porque la señal láser sufre una fuerte dispersión (Ilustración 3-4 Dron con Telémetro) [11].

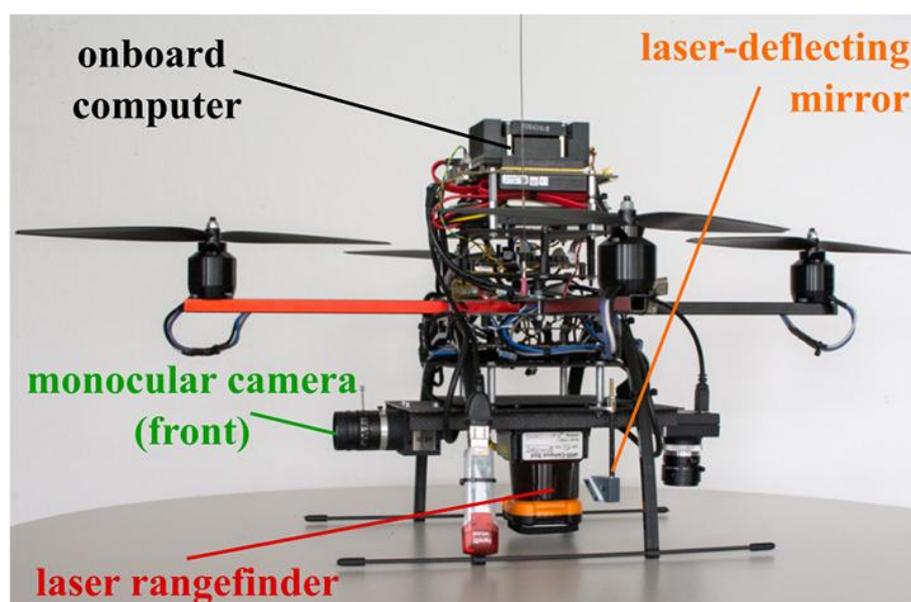


Ilustración 3-4 Dron con Telémetro [23]

### 3.1.4 Criterios y subcriterios

De acuerdo con las aplicaciones que hemos decidido que tendrá nuestro mini-dron, se plantea ahora la cuestión de establecer los criterios y subcriterios que se usarán en las matrices de comparación del método AHP. Es una parte muy importante de la elección del dron ya que estos criterios van a influir de forma directa en la elección, de manera que, si optamos por unos criterios frente a otros, las ponderaciones que obtendremos en las matrices, y, en consecuencia, el resultado final puede cambiar de forma significativa.

De esta forma, establecemos tres criterios principales: coste económico, diseño del dron y el equipamiento. El primero de ellos es evidente que se tenga en cuenta ya que, hoy en día, los presupuestos para realizar cualquier compra son, generalmente, muy estrictos y, más si cabe, en los presupuestos destinados al Ministerio de Defensa. En segundo lugar, es igualmente trascendental conocer las características de cada dron para poder hacer una comparación entre ellos. En este criterio, se ha dividido en cinco subcriterios: autonomía, tamaño, peso, ruido y velocidad. Por último, para cumplir con las misiones encomendadas, han de cumplir con un mínimo equipamiento donde destacamos otros cinco subcriterios: cámara de vídeo, cámara visión nocturna, cámara térmica, telémetro y GPS (Figura 3-5 Criterios y subcriterios).

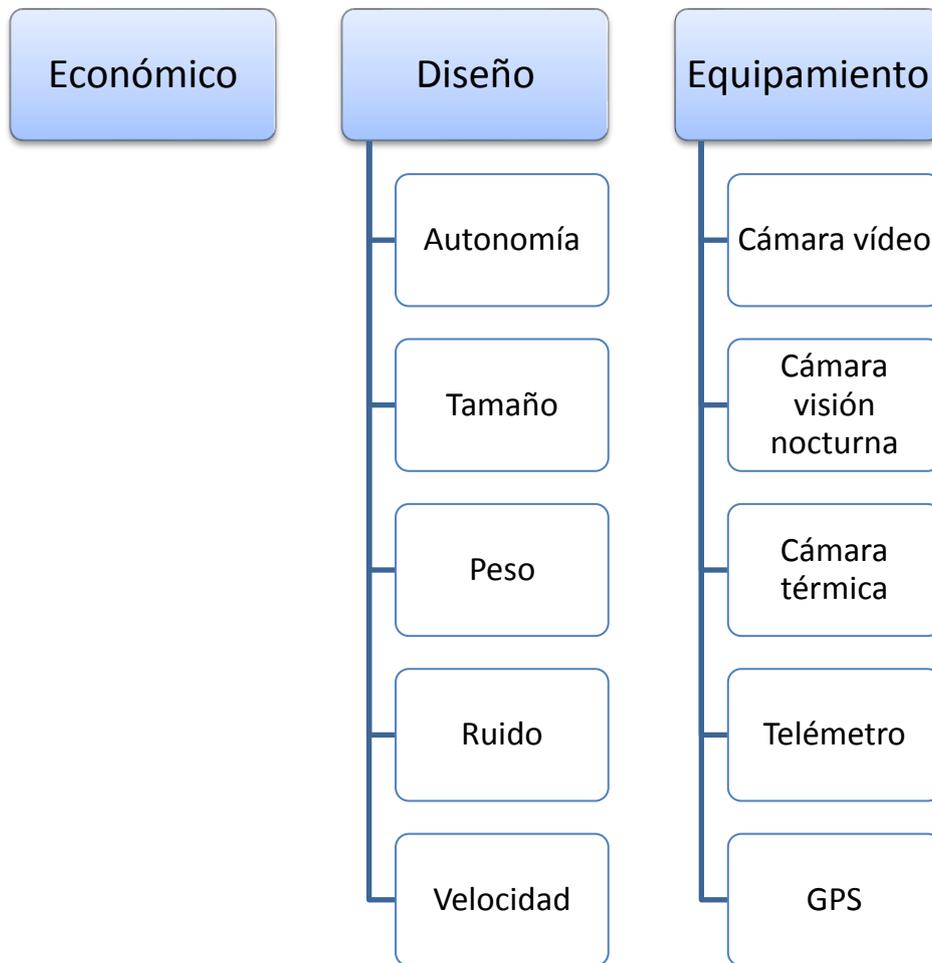


Figura 3-5 Criterios y subcriterios

### 3.1.5 Ponderaciones

Llegados a este punto, comienza la segunda ronda de entrevistas donde se le plantea un breve cuestionario a los oficiales previamente entrevistados para obtener opiniones, subjetivas pero basadas en sus experiencias en el cuerpo, sobre los criterios y subcriterios que hemos desarrollado. Para ello, se enfrentan al problema de decidir, por pares, cuáles son los criterios y subcriterios más importantes. De esta manera, se compara uno a uno todos los criterios y subcriterios mediante la escala de Saaty, Tabla 2-2 Escala de Saaty. Para aquellos que sean más importantes, obtienen una numeración del 1 al 9 donde el 1 equivale a que son igual de importantes y el 9 que es extremadamente más importante el primer criterio que el segundo (Tabla 3-1 Clasificación Numérica de Criterios).

Juicio verbal de las preferencias entre Criterio $i$ y Criterio $j$ .	Clasificación numérica
$C_i$ y $C_j$ son igual de importantes	1
$C_i$ es ligeramente más importante que $C_j$	3
$C_i$ es más importante que $C_j$	5
$C_i$ es bastante más importante que $C_j$	7
$C_i$ es extremadamente más importante que $C_j$	9

Tabla 3-1 Clasificación Numérica de Criterios

De acuerdo con los resultados de los cuatro cuestionarios realizados por los oficiales entrevistados, sacamos en conclusión las siguientes tablas de ponderaciones para los criterios y subcriterios. En estas tablas (Tabla 3-2 Ponderaciones Criterios, Tabla 3-3 Ponderaciones Subcriterios Diseño y Tabla 3-4 Ponderaciones Subcriterios Equipamiento) se representa la comparación por pares de todos los criterios y subcriterios, donde, en los juicios verbales, se destaca en negrita y subrayado el criterio o subcriterio que los expertos consideran más importante de la comparación. Seguidamente, en la escala numérica definen el valor numérico de importancia de este criterio o subcriterio sobre el comparado mediante la Tabla 3-1 Clasificación Numérica de Criterios.

<b>Juicio verbal de criterios</b>	<b>Clasificación numérica</b>
ECONÓMICO VS <b><u>DISEÑO</u></b>	5
DISEÑO VS <b><u>EQUIPAMIENTO</u></b>	3
ECONÓMICO VS <b><u>EQUIPAMIENTO</u></b>	7

Tabla 3-2 Ponderaciones Criterios

<b>Juicio verbal de los subcriterios de diseño</b>	<b>Clasificación numérica</b>
<b><u>AUTONOMÍA VS TAMAÑO</u></b>	1
<b><u>AUTONOMÍA</u></b> VS PESO	3
<b><u>AUTONOMÍA</u></b> VS RUIDO	3
<b><u>AUTONOMÍA</u></b> VS VELOCIDAD	7
<b><u>TAMAÑO</u></b> VS PESO	3
<b><u>TAMAÑO</u></b> VS RUIDO	5
<b><u>TAMAÑO</u></b> VS VELOCIDAD	9
<b><u>PESO</u></b> VS RUIDO	3
<b><u>PESO</u></b> VS VELOCIDAD	5
<b><u>RUIDO VS VELOCIDAD</u></b>	1

Tabla 3-3 Ponderaciones Subcriterios Diseño

<b>Juicio verbal de los subcriterios de equipamiento</b>	<b>Clasificación numérica</b>
CÁMARA VÍDEO VS <b><u>CÁMARA VISIÓN NOCTURNA</u></b>	3
CÁMARA VÍDEO VS <b><u>CÁMARA TÉRMICA</u></b>	7
<b><u>CÁMARA VÍDEO</u></b> VS TELÉMETRO	3
CÁMARA VÍDEO VS <b><u>GPS</u></b>	7
CÁMARA VISIÓN NOCTURNA VS <b><u>C. TÉRMICA</u></b>	3
<b><u>CÁMARA VISIÓN NOCTURNA</u></b> VS TELÉMETRO	5
CÁMARA VISIÓN NOCTURNA VS <b><u>GPS</u></b>	5
<b><u>CÁMARA TÉRMICA</u></b> VS TELÉMETRO	5
CÁMARA TÉRMICA VS <b><u>GPS</u></b>	5
TELÉMETRO VS <b><u>GPS</u></b>	9

Tabla 3-4 Ponderaciones Subcriterios Equipamiento

### 3.1.6 Matrices de criterios y subcriterios

Las matrices de criterios y subcriterios son elaboradas en una plantilla de Excel donde se crean las matrices en si junto a la correspondiente matriz normalizada y razón de consistencia. En las matrices se compara las columnas con las filas donde el caso de que una comparación sea desfavorable, se aplicará el número inverso. La matriz normalizada es usada para obtener los pesos, o en este caso el promedio, de cada criterio o subcriterio. El índice de inconsistencia es un valor porcentual que debe ser inferior al 10%. Esto significa, que no existen grandes incoherencias a la hora de haber establecido las ponderaciones de importancia entre criterios.

CRITERIOS	económico	diseño	equipamiento
económico	1	1/5	1/7
diseño	5	1	1/3
equipamiento	7	3	1
suma	13.000	4.200	1.476

NORMALIZADA	económico	diseño	equipamiento	promedio
económico	0.07692308	0.04761905	0.096774194	0.07377211
diseño	0.38461538	0.23809524	0.225806452	0.28283902
equipamiento	0.53846154	0.71428571	0.677419355	0.64338887

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
5.65%	0.03275591	0.58

AW	AW/W	nmáx
0.222252607	3.01269163	3.06551183
0.866162511	3.06238685	
2.008310686	3.12145699	

Tabla 3-5 Matriz de Criterios y Matriz Normalizada

SUBCRITERIOS DISEÑO	autonomía	tamaño	peso	ruido	velocidad
autonomía	1	1	3	3	7
tamaño	1	1	3	5	9
peso	1/3	1/3	1	3	5
ruido	1/3	1/5	1/3	1	1
velocidad	1/7	1/9	1/5	1	1
suma	2.810	2.644	7.533	13.000	23.000

NORMALIZADA	autonomia	tamaño	peso	ruido	velocidad	promedio
autonomia	0.3559322	0.3781513	0.3982301	0.2307692	0.3043478	0.3334861
tamaño	0.3559322	0.3781513	0.3982301	0.3846154	0.3913043	0.3816467
peso	0.1186441	0.1260504	0.1327434	0.2307692	0.2173913	0.1651197
ruido	0.1186441	0.0756303	0.0442478	0.0769231	0.0434783	0.0717847
velocidad	0.0508475	0.0420168	0.0265487	0.0769231	0.0434783	0.0479629

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
3.73%	0.0417619	1.12

AW	AW/W	nmáx
1.761585862	5.2823363	5.1670478
2.00108095	5.2432817	
0.858665612	5.2002622	
0.362278808	5.046742	
0.242817538	5.0626164	

Tabla 3-6 Matriz Subcriterio Diseño y Matriz Normalizada

Cabe destacar que en la matriz de subcriterios de equipamiento, la razón de consistencia está en el límite con un valor del 10,31%, lo que significa que puede existir algún sesgo. Sin embargo, como el método para definir los criterios está basado en una comisión de expertos (Comandantes y Capitanes de infantería de Marina) y dicho valor se encuentra en el límite, se acepta este valor.

SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO	cámara vídeo	cámara nocturna	cámara térmica	telémetro	GPS
cámara vídeo	1	1/3	1/7	3	1/7
cámara nocturna	3	1	1/3	5	1/5
cámara térmica	7	3	1	5	1/5
telémetro	1/3	1/5	1/5	1	1/9
GPS	7	5	5	9	1
suma	18.333	9.533	6.676	23.000	1.654

NORMALIZADA	cámara vídeo	cámara nocturna	cámara térmica	telémetro	GPS	promedio
cámara vídeo	0.05454545	0.034965035	0.021398003	0.1304348	0.0863724	0.0655431
cámara nocturna	0.16363636	0.104895105	0.049928673	0.2173913	0.1209213	0.1313546
cámara térmica	0.38181818	0.314685315	0.14978602	0.2173913	0.1209213	0.2369204
telémetro	0.01818182	0.020979021	0.029957204	0.0434783	0.0671785	0.035955
GPS	0.38181818	0.524475524	0.7489301	0.3913043	0.6046065	0.5302269

1

Razón de inconsistencia	IC	CA
RI= IC/CA <10%	0.11546138	1.12
<b>10.31%</b>		

AW	AW/W	nmáx
0.326785342	4.98580638	5.461845537
0.692777601	5.27410432	
1.37560616	5.80619488	
0.19037177	5.2947288	
3.153998356	5.9483933	

**Tabla 3-7 Matriz Subcriterio Equipamiento y Matriz Normalizada**

### 3.2 Alternativas

Una vez establecidos los criterios y subcriterios que vamos a emplear para decidir el mejor mini-dron, seleccionamos en el mercado cuatro mini-drones que sean capaces de realizar las funciones que hemos establecido. Por un lado, y de modo general, hemos escogido dos modelos de dron de la empresa *dji*, el modelo *Inspire 2* con una configuración que contiene sistema de posicionamiento GPS y cámara de vídeo y el modelo *Inspire 1* con una configuración que contiene sistema de posicionamiento GPS y cámara térmica. Por otro lado, el modelo *Spark*, de la misma empresa, con sistema de posicionamiento GPS y cámara de vídeo y menores dimensiones que los anteriores. Y, por último, el modelo, de la empresa noruega *Sky-Watch*, *Huginn X 1*, que actualmente está en servicio en Infantería de Marina y que cuenta con cámara de vídeo, cámara de visión nocturna y sistema de posicionamiento GPS.

### 3.2.1 Modelo 1: Inspire 1 Pro/Raw

Este modelo tiene la peculiar característica de tener incorporado una cámara térmica además del sistema GPS que le diferencia de los drones comunes con cámaras de vídeo. Los datos más relevantes de la ficha técnica (Anexo 2, 1) del modelo *Inspire 1 Pro/Raw* son:

<b>Inspire 1 Pro/Raw</b>	<b>Coste por unidad \$1999 (± 1630€)</b>
Autonomía	18,5 min
Dimensiones	45x43x30 cm
Peso	3500 g
Ruido	4 álabes de 33 cm
Velocidad máx.	72 km/h
Cámara térmica	Vídeo 4k (4096x2160, 4:3)
Precisión GPS	Vertical ±0,5 m Horizontal ±0,1m

**Tabla 3-8 Resumen Ficha Técnica Modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw**



**Ilustración 3-5 Modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw [24]**

### 3.2.2 Modelo 2: Inspire 2

Este segundo modelo incluye una cámara de vídeo de mejor calidad, mayor autonomía, pero mayor peso que la versión anterior *Inspire 1*. Por otro lado, alcanza mayores velocidades y tiene mejor resolución de vídeos que se reflejan en su mayor coste. Exponemos a modo de resumen los datos más relevantes del modelo 2 *Inspire 2*, (ver Anexo 2, 2):

<b>Inspire 2</b>	<b>Coste por unidad</b> <b>\$2999 (± 2445€)</b>
Autonomía	25 min
Dimensiones	45x43x30 cm
Peso	4000 g
Ruido	4 álabes de 33 cm
Velocidad máx.	94 km/h
Cámara de vídeo	Vídeo 6k (6016x3200, 16:9)
Precisión GPS	Vertical ±0,5 m Horizontal ±0,1m

Tabla 3-9 Resumen Ficha Técnica Modelo 2 Inspire 2



Ilustración 3-6 Modelo 2 Inspire 2 [24]

### 3.2.3 Modelo 3: Spark

El modelo 3 *Spark* destaca por su pequeño tamaño y menor peso y coste que le puede otorgar cierta ventaja con respecto a las otras alternativas. Además, cuenta con el menor tamaño de álabes para volar con lo que le consideraremos como el dron más silencioso. Por el contrario, cuenta con una autonomía bastante reducida a pesar de alcanzar una velocidad máxima considerable. De este modo, sus características fundamentales (ver Anexo 2, 3) son:

<b>Spark</b>	<b>Coste por unidad</b> <b>\$499 (± 405€)</b>
Autonomía	16 min
Dimensiones	14,3x14,3x5,5 cm
Peso	300 g
Ruido	4 álabes de 12 cm
Velocidad máx.	50 km/h
Cámara de vídeo	Vídeo 1920x1080
Precisión GPS	Vertical ±0,5 m
	Horizontal ±0,1m

**Tabla 3-10 Resumen Ficha Técnica Modelo 3 Spark**



**Ilustración 3-7 Modelo 3 Spark [24]**

### 3.2.4 Modelo 4: Huginn X1

El último modelo presenta interesantes características como su cámara de visión nocturna con cámara de vídeo y GPS, y, además, la posibilidad de incorporar un sistema de telemetría secundario. Este último, le ofrece una capacidad que las otras alternativas no tienen. Por otro lado, presenta una alta autonomía y un peso considerablemente pequeño. Sin embargo, cuenta con las mayores dimensiones y la menor velocidad de los cuatro modelos. Cabe destacar que este modelo está en servicio en Infantería de Marina con finalidades de reconocimiento y vigilancia, aplicaciones similares a las establecidas en el presente TFG, y será interesante comparar este mini-dron con los demás escogidos en el mercado y sacar nuestras propias conclusiones. El resumen de la ficha técnica (ver Anexo 2, 4) correspondiente es el siguiente:

<b>Huginn X1</b>	<b>Coste por unidad</b> <b>\$1499 (± 1200€)</b>
Autonomía	25 min
Dimensiones	76x56x26 cm
Peso	940 g
Ruido	4 álabes de 45 cm
Velocidad máx.	21,6 km/h
Cámara de vídeo	Vídeo 1920x1080
Cámara visión nocturna	Vídeo 640x480
Precisión GPS	± 4 m

Tabla 3-11 Resumen Ficha Técnica Modelo 4 Huginn X1



Ilustración 3-8 Modelo 4 Huginn X1 [25]

### 3.3 Matrices de comparación de alternativas

En este momento, realizamos las matrices de comparación de subcriterios y del criterio económico, al ser este último el nivel más bajo. En estas matrices, además de hacer las respectivas comparaciones de cada subcriterio, se realizan los índices de consistencia para asegurarse de que no haya riesgo de sesgo. Antes de cada matriz, realizamos una breve explicación de las ponderaciones que vamos a tener en cuenta para valorar la importancia de cada subcriterio entre los modelos. Nos basaremos en datos de las fichas técnicas facilitadas por las empresas oficiales vendedores de dichos drones y en casos como el ruido, que es un valor no medido en ninguno de los casos, aplicaremos los conocimientos de la física aplicados al ruido generado por los álabes.

A la hora de establecer las comparaciones por pares según la escala de Saaty, comparamos la clasificación numérica de las respectivas tablas de los juicios verbales de cada subcriterio: Si la diferencia de dicho valor numérico es 0, obtendrán un 1 en la escala de Saaty; si la diferencia es igual 1, obtendrán un 3 en la escala de Saaty; si la diferencia es 2, obtendrán un valor de 5 en la escala de Saaty, y así, sucesivamente. Pueden existir pequeñas variaciones debido a que no todos los datos coinciden con los datos del juicio verbal, por lo que, se adaptará de la manera más lógica el valor de la escala de Saaty. Comenzamos por la matriz del subcriterio autonomía.

**Autonomía.** A la hora de realizar la comparación de la autonomía de cada de los drones, se tiene en cuenta datos proporcionados por los fabricantes. El juicio de mayor importancia será aquel que tenga la mayor autonomía, que es la cuestión que nos interesa, que tenga la mayor autonomía posible para poder operar con él el mayor tiempo posible en las operaciones designadas. Por lo que, de esta manera, nos basamos en la siguiente tabla con valores numéricos de importancia según los tiempos de autonomía:

Juicio verbal del subcriterio autonomía	Clasificación numérica
Autonomía > 16 minutos	1
Autonomía > 18 minutos	2
Autonomía > 20 minutos	3
Autonomía > 22 minutos	4
Autonomía > 25 minutos	5

Tabla 3-12 Juicio verbal subcriterio autonomía

AUTONOMÍA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1/7	3	1/7
Modelo 2	7	1	9	1
Modelo 3	1/3	1/9	1	1/9
Modelo 4	7	1	9	1
suma	15.333	2.254	22.000	2.254

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.0652174	0.0633803	0.1363636	0.0633803	0.0820854
Modelo 2	0.4565217	0.443662	0.4090909	0.443662	0.4382341
Modelo 3	0.0217391	0.0492958	0.0454545	0.0492958	0.0414463
Modelo 4	0.4565217	0.443662	0.4090909	0.443662	0.4382341

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
3.47%	0.0312213	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.331634073	4.0401104	4.0936639
1.824082837	4.1623476	
0.166193472	4.00985	
1.824082837	4.1623476	

Ilustración 3-9 Matriz Subcriterio Autonomía

**Tamaño.** Al igual que el caso anterior, tenemos datos proporcionados por los fabricantes en los cuales nos apoyaremos para realizar el juicio verbal de las dimensiones. El dron de menor dimensiones será aquel que obtenga el juicio de mayor importancia ya que nos interesa que el mini-dron sea lo más pequeño posible, para de esta manera, tener mayor agilidad y portabilidad. De modo que, los juicios quedan de la siguiente manera:

Juicio verbal del subcriterio tamaño	Clasificación numérica
LongitudxAnchuraxAltura < 110000 cm <sup>3</sup>	1
LongitudxAnchuraxAltura < 96000 cm <sup>3</sup>	2
LongitudxAnchuraxAltura < 50000 cm <sup>3</sup>	3
LongitudxAnchuraxAltura < 20000 cm <sup>3</sup>	4
LongitudxAnchuraxAltura < 10000 cm <sup>3</sup>	5

**Tabla 3-13 Juicio verbal subcriterio tamaño**

TAMAÑO	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1	1/7	3
Modelo 2	1	1	1/7	3
Modelo 3	7	7	1	9
Modelo 4	1/3	1/3	1/9	1
suma	9.333	9.333	1.397	16.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.1071429	0.1071429	0.1022727	0.1875	0.1260146
Modelo 2	0.1071429	0.1071429	0.1022727	0.1875	0.1260146
Modelo 3	0.75	0.75	0.7159091	0.5625	0.6946023
Modelo 4	0.0357143	0.0357143	0.0795455	0.0625	0.0533685

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
3.40%	0.0306331	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.511363636	4.057971	4.0918992
0.511363636	4.057971	
2.939123377	4.231376	
0.214556277	4.0202788	

**Ilustración 3-10 Matriz Subcriterio Tamaño**

**Peso.** El peso es una característica objetiva que se obtiene de las fichas técnicas de cada modelo. En este caso, nos interesa que el peso sea el menor, para que, de este modo, tengamos mayor agilidad y portabilidad. El juicio de mayor importancia será para el dron de menor peso y viceversa para aquel de mayor peso. Dicho esto, la tabla de juicio de importancia del subcriterio peso queda:

Juicio verbal del subcriterio peso	Clasificación numérica
Peso < 4000 g	1
Peso < 3000 g	2
Peso < 2000 g	3
Peso < 1000 g	4
Peso < 500 g	5

Tabla 3-14 Juicio verbal subcriterio peso

PESO	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	3	1/9	1/5
Modelo 2	1/3	1	1/9	1/7
Modelo 3	9	9	1	3
Modelo 4	5	7	1/3	1
suma	15.333	20.000	1.556	4.343

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.0652174	0.15	0.0714286	0.0460526	0.0831746
Modelo 2	0.0217391	0.05	0.0714286	0.0328947	0.0440156
Modelo 3	0.5869565	0.45	0.6428571	0.6907895	0.5926508
Modelo 4	0.326087	0.35	0.2142857	0.2302632	0.280159

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
6.73%	0.0605993	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.337103356	4.052958	4.1817978
0.177613288	4.0352341	
2.57783998	4.3496778	
1.201691729	4.2893211	

Ilustración 3-11 Matriz Subcriterio Peso

**Ruido.** El ruido es una característica que no ha sido proporcionada por ningún fabricante de los drones que hemos seleccionado. Ahora bien, con nuestros conocimientos de física y acústica y el número de álabes y sus dimensiones, podemos hacer unas estimaciones a la hora de realizar los juicios de importancia del ruido. El ruido es beneficioso cuanto menor sea para reducir la posibilidad de que el enemigo detecte el dron, por lo que, el juicio de mayor importancia será para el dron de menor ruido. El número de álabes y las dimensiones son directamente proporcionales al ruido generado, de modo que, cuanto más pequeños sean los álabes y menor número de ellos, menor será el ruido que realicen. La siguiente tabla muestra como quedan dichos juicios:

Juicio verbal del subcriterio ruido	Clasificación numérica
4 álabes y dimensiones < 45	1
4 álabes y dimensiones < 40	2
4 álabes y dimensiones < 33	3
4 álabes y dimensiones < 25	4
4 álabes y dimensiones < 15	5

**Tabla 3-15 Juicio verbal subcriterio ruido**

RUIDO	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1	1/7	3
Modelo 2	1	1	1/7	3
Modelo 3	7	7	1	9
Modelo 4	1/3	1/3	1/9	1
suma	9.333	9.333	1.397	16.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.1071429	0.1071429	0.1022727	0.1875	0.1260146
Modelo 2	0.1071429	0.1071429	0.1022727	0.1875	0.1260146
Modelo 3	0.75	0.75	0.7159091	0.5625	0.6946023
Modelo 4	0.0357143	0.0357143	0.0795455	0.0625	0.0533685

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
3.40%	0.0306331	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.511363636	4.057971	4.0918992
0.511363636	4.057971	
2.939123377	4.231376	
0.214556277	4.0202788	

**Ilustración 3-12 Matriz Subcriterio Ruido**

**Velocidad.** La velocidad es un dato muy fácil de obtener que está incluido en todas las especificaciones de los drones. Cuanto mayor sea la velocidad que pueda alcanzar el dron, mejor podrá evitar ataques enemigos o desplazarse más rápidamente a otro punto que sea interesante. El juicio de importancia 5 será para el dron más rápido e importancia 1 será el más lento. La tabla de juicios es la siguiente:

Juicio verbal del subcriterio velocidad	Clasificación numérica
Velocidad > 20 Km/h	1
Velocidad > 40 Km/h	2
Velocidad > 60 Km/h	3
Velocidad > 80 Km/h	4
Velocidad > 90 Km/h	5

**Tabla 3-16 Juicio verbal subcriterio velocidad**

VELOCIDAD	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1/3	3	7
Modelo 2	3	1	5	9
Modelo 3	1/3	1/5	1	5
Modelo 4	1/7	1/9	1/5	1
suma	4.476	1.644	9.200	22.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.2234043	0.2027027	0.326087	0.3181818	0.2675939
Modelo 2	0.6702128	0.6081081	0.5434783	0.4090909	0.5577225
Modelo 3	0.0744681	0.1216216	0.1086957	0.2272727	0.1330145
Modelo 4	0.0319149	0.0675676	0.0217391	0.0454545	0.041669

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
6.47%	0.058234	0.9

AW	AW/W	nmáx
1.144228241	4.2759872	4.174702
2.400598227	4.3042878	
0.542102173	4.0755112	
0.168468811	4.0430217	

Ilustración 3-13 Matriz Subcriterio Velocidad

**Cámara de vídeo.** Llegados a los subcriterios de equipamiento, no todos los modelos van a poder ser comparados por importancia ya que no todos tienen los mismos requisitos materiales. Esto hace que, aquellos drones que sí dispongan de dichos equipamientos obtengan ventaja con respecto a aquellos que no. De modo que, en base a datos técnicos de las cámaras de vídeo, aquellos que tengan mayor resolución recibirán el mayor juicio de importancia. La tabla de juicios de la cámara de vídeo queda de esta manera:

Juicio verbal del subcriterio cámara de vídeo	Clasificación numérica
Resolución > 720x480	1
Resolución > 1920x1080	2
Resolución > 2K (2048x1080)	3
Resolución > 4K (4096x2160)	4
Resolución > 6K (6016x3200)	5

Tabla 3-17 Juicio verbal subcriterio cámara vídeo

C. Vídeo	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1/3	5	5
Modelo 2	3	1	9	9
Modelo 3	1/5	1/9	1	1
Modelo 4	1/5	1/9	1	1
suma	4.400	1.556	16.000	16.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.2272727	0.2142857	0.3125	0.3125	0.2666396
Modelo 2	0.6818182	0.6428571	0.5625	0.5625	0.6124188
Modelo 3	0.0454545	0.0714286	0.0625	0.0625	0.0604708
Modelo 4	0.0454545	0.0714286	0.0625	0.0625	0.0604708

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
1.22%	0.0109419	0.9

AW	AW/W	nmáx
1.075487013	4.0334855	4.0328256
2.500811688	4.083499	
0.242316017	4.0071588	
0.242316017	4.0071588	

Ilustración 3-14 Matriz Subcriterio Cámara de Vídeo

**Cámara visión nocturna.** De nuevo, este equipamiento, sólo lo tiene un dron, el modelo cuatro lo que le otorga una ventaja sobre los demás competidores. En este caso, recibirá un juicio de importancia en la escala de Saaty de 5 sobre aquellos que no tengan la capacidad de ver de noche. En el caso de que tengan, por ejemplo, una cámara térmica, su importancia será de 3 debido a que ambos realizan la principal función de poder ver sin luz solar. La matriz de comparación por pares queda así:

C. Nocturna	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1	1	1/3
Modelo 2	1	1	1	1/5
Modelo 3	1	1	1	1/5
Modelo 4	3	5	5	1
suma	6.000	8.000	8.000	1.733

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.1666667	0.125	0.125	0.1923077	0.1522436
Modelo 2	0.1666667	0.125	0.125	0.1153846	0.1330128
Modelo 3	0.1666667	0.125	0.125	0.1153846	0.1330128
Modelo 4	0.5	0.625	0.625	0.5769231	0.5817308

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
1.22%	0.010936	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.612179487	4.0210526	4.032808
0.534615385	4.0192771	
0.534615385	4.0192771	
2.368589744	4.0716253	

Ilustración 3-15 Matriz Subcriterio Cámara Visión Nocturna

**Cámara térmica.** Al igual que el caso anterior, solo un dispositivo de dron tiene incorporado una cámara térmica. El modelo 1, por lo tanto, tiene cierta ventaja sobre los demás, de modo, que sobre aquel que no tiene esta capacidad ni de obtener imágenes en las horas nocturnas, tendrá un juicio de valor 5 de más importancia sobre los demás en la escala de Saaty. Por otro lado, en el caso del modelo 4, que, si tiene la capacidad con la cámara de visión nocturna, tendrá una importancia 3. La matriz de comparación del subcriterio de la cámara térmica queda:

C. Térmica	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	5	5	3
Modelo 2	1/5	1	1	1
Modelo 3	1/5	1	1	1
Modelo 4	1/3	1	1	1
suma	1.733	8.000	8.000	6.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.5769231	0.625	0.625	0.5	0.5817308
Modelo 2	0.1153846	0.125	0.125	0.1666667	0.1330128
Modelo 3	0.1153846	0.125	0.125	0.1666667	0.1330128
Modelo 4	0.1923077	0.125	0.125	0.1666667	0.1522436

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
1.22%	0.010936	0.9

AW	AW/W	nmáx
2.368589744	4.0716253	4.032808
0.534615385	4.0192771	
0.534615385	4.0192771	
0.612179487	4.0210526	

Ilustración 3-16 Matriz Subcriterio Cámara Térmica

**Telémetro.** Desafortunadamente, hoy en día, no existen mini-drones con la capacidad exclusiva de montar un telémetro. Entre los modelos que hemos escogido, solo el Huginn X1 incorpora un telémetro como función secundaria y que habrá que instalar a posteriori. Esto hace, que tenga ventaja sobre las demás alternativas que no tienen esta capacidad. De modo, que, en la matriz de comparaciones de juicios, el modelo 4 obtendrá una calificación de 5 sobre los demás en la escala de Saaty.

Telémetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1	1	1/5
Modelo 2	1	1	1	1/5
Modelo 3	1	1	1	1/5
Modelo 4	5	5	5	1
suma	8.000	8.000	8.000	1.600

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Modelo 2	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Modelo 3	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Modelo 4	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
0.00%	0	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.5	4	4
0.5	4	
0.5	4	
2.5	4	

Ilustración 3-17 Matriz Subcriterio Telémetro

**GPS.** El sistema de posicionamiento GPS es un elemento fundamental que llevan incorporados las cuatro alternativas. A la hora de hacer los juicios verbales de importancia, tendremos en cuenta la precisión del sistema. Cuanto más preciso sea, o, dicho de otra manera, cuanto menor error en la posición tenga, mejor será el GPS y mayor importancia tendrá. La tabla de juicio del subcriterio GPS queda de la siguiente manera:

Juicio verbal del subcriterio GPS	Clasificación numérica
Precisión < 4 m	1
Precisión < 3 m	2
Precisión < 2 m	3
Precisión < 1 m	4
Precisión < 0,5 m	5

**Tabla 3-18 Juicio verbal subcriterio GPS**

GPS	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	1	1	9
Modelo 2	1	1	1	9
Modelo 3	1	1	1	9
Modelo 4	1/9	1/9	1/9	1
suma	3.111	3.111	3.111	28.000

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286
Modelo 2	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286
Modelo 3	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286	0.3214286
Modelo 4	0.0357143	0.0357143	0.0357143	0.0357143	0.0357143

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
0.00%	0	0.9

AW	AW/W	nmáx
1.285714286	4	4
1.285714286	4	
1.285714286	4	
0.142857143	4	

**Ilustración 3-18 Matriz Subcriterio GPS**

**Criterio económico.** Por último, al ser un criterio único donde no existen subcriterios, incluimos en las matrices de comparación al criterio económico, donde, lógicamente, obtendrán juicios de mayor importancia aquellas alternativas que tengan menor coste por su adquisición. Por lo tanto, los juicios de valor se resumen en la siguiente tabla:

Juicio verbal del criterio económico	Clasificación numérica
Coste < \$3000	1
Coste < \$2000	2
Coste < \$1500	3
Coste < \$1000	4
Coste < \$500	5

**Tabla 3-19 Juicio verbal criterio económico**

ECONÓMICO	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Modelo 1	1	3	1/5	1/3
Modelo 2	1/3	1	1/9	1/5
Modelo 3	5	9	1	3
Modelo 4	3	5	1/3	1
suma	9.333	18.000	1.644	4.533

NORMALIZADA	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	promedio
Modelo 1	0.1071429	0.1666667	0.1216216	0.0735294	0.1172401
Modelo 2	0.0357143	0.0555556	0.0675676	0.0441176	0.0507388
Modelo 3	0.5357143	0.5	0.6081081	0.6617647	0.5763968
Modelo 4	0.3214286	0.2777778	0.2027027	0.2205882	0.2556243

1

Razón de inconsistencia		
RI= IC/CA <10%	IC	CA
2.85%	0.0256801	0.9

AW	AW/W	nmáx
0.469943893	4.0083874	4.0770402
0.204987761	4.0400622	
2.386119313	4.1397166	
1.053170818	4.1199946	

**Ilustración 3-19 Matriz Criterio Económico**

## 4 RESULTADOS DE LAS MATRICES

### 4.1 Toma de decisión

#### 4.1.1 Elección final de la mejor alternativa

Una vez terminado la normalización de todas las matrices y se ha comprobado la consistencia en todas ellas, solo nos resta el paso más importante, la elección final de la mejor alternativa, en este caso el mejor mini-dron.

Para esta elección debemos desarrollar el vector de prioridad global, el cual se obtiene multiplicando el vector prioridad de cada criterio, obtenido en la misma matriz final, por la matriz de prioridad de alternativas. El resultado queda reflejado en la siguiente matriz y posterior tabla resumen.

AHP		ALTERNATIVAS				
CRITERIOS		promedios	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
C1	Económico	0.074	0.104	0.046	0.609	0.241
C2	Diseño	0.283	0.111	0.237	0.433	0.219
SC1	Autonomía	0.333	0.082	0.438	0.041	0.438
SC2	Tamaño	0.382	0.126	0.126	0.695	0.053
SC3	Peso	0.165	0.083	0.044	0.593	0.280
SC4	Ruido	0.072	0.126	0.126	0.695	0.053
SC5	Velocidad	0.048	0.268	0.558	0.133	0.042
C3	Equipamiento	0.643	0.350	0.264	0.228	0.158
SC6	C. Vídeo	0.066	0.267	0.612	0.060	0.060
SC7	C. Nocturna	0.131	0.152	0.133	0.133	0.582
SC8	C. Térmica	0.237	0.582	0.133	0.133	0.152
SC9	Telémetro	0.036	0.125	0.125	0.125	0.625
SC10	GPS	0.530	0.321	0.321	0.321	0.036
RESULTADOS AHP			0.264	0.240	0.314	0.181

**MODELO ÓPTIMO 0.314 MODELO 3**

Ilustración 4-1 Matriz AHP

<b>Mini-Dron</b>	<b>Resultado AHP</b>
Modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw	0,264
Modelo 2 Inspire 2	0,240
Modelo 3 Spark	0,314
Modelo 4 Huginn X1	0,181

**Tabla 4-1 Vector de Prioridad Global**

El método AHP establece que debemos seleccionar el modelo con el mayor valor numérico, pues éste será el valorado como el mejor entre las alternativas que hemos expuesto con los criterios establecidos.

Según la Tabla 4-1 Vector de Prioridad Global, el mini-dron que debemos seleccionar para la realización de su compra según los criterios elegidos es el modelo tres *Spark*. Cabe destacar que este modelo de mini-UAV tiene una cierta ventaja sobre el resultado de la segunda y tercera opción de compra ya que estos son muy próximos. En todo caso, llega a triplicar el resultado sobre el modelo menos deseado, el *Huginn X1*, modelo que está en servicio hoy en día en Infantería de Marina. De la matriz final del método AHP podemos destacar que este modelo, *Spark*, tiene la mayor puntuación en el criterio económico y en el criterio diseño, aunque estos criterios solo representen el 7,4% y 28,3% de importancia respecto al tercer criterio, equipamiento. Es decir, tiene la mejor valoración en los dos criterios menos importantes. Por otro lado, ocupa la tercera posición en cuanto al criterio equipamiento. Sin embargo, en este criterio, las importancias de cada modelo están repartidas casi de manera equitativa al tener un reparto del 35%, 26,4%, 22,8% y 15,8% del modelo uno al cuatro respectivamente. Es decir, no existe un modelo que claramente sea superior a los demás en cuanto al equipamiento. Este equilibrio del modelo *Spark* hace que por este proceso obtenga la primera posición como solución a nuestro problema con un porcentaje del 31,4% respecto a las otras tres alternativas.

Analizando el segundo y tercer resultado, ambos muy parecidos, con porcentajes del 26,4% y 24% respectivamente, los modelos *Inspire 1* e *Inspire 2* no quedan muy alejados del modelo tres. Sin bien es que el modelo uno es el segundo modelo más caro de las alternativas, también tiene la peor puntuación respecto al criterio diseño donde obtiene un 11,1% de importancia. Podemos observar que ningún subcriterio obtiene la mayor valoración, lo que se refleja en este pobre porcentaje respecto a sus competidores. No obstante, en el criterio equipamiento, el más importante de los tres criterios, obtiene una ventaja sobre los demás con un porcentaje del 35%, el mayor de los cuatro porcentajes. Esto se debe a su potencial en el sistema de posicionamiento GPS (el mejor) y a su cámara térmica, que ambos subcriterios representan el 76,7% de importancia del criterio equipamiento. Gracias a ello, obtiene la segunda mejor resultado de nuestro problema. Por otro lado, el modelo dos, *Inspire 2*, obtiene el peor dato económico, al ser éste el más caro de los mini-drones. Hablando de diseño, obtiene la segunda mejor puntuación gracias, mayormente, a su gran autonomía y en menor medida a su velocidad de desplazamiento. Por último, en el equipamiento, no ha salido mal parado con la segunda posición, 26,4%, gracias principalmente a su GPS, además de su gran cámara de vídeo.

En último lugar, el modelo *Huginn X1* ha quedado como cuarto resultado, es decir, la última opción. Si bien es cierto que es competente en cuanto a su coste, el segundo más barato con un 24,1%, además también lo es el criterio de diseño con la tercera posición y un 21,9%. Pero ambos criterios suponen un 35,7% de todos los criterios, es decir, que el criterio equipamiento es representa un 64,3% respecto a los otros dos criterios, y en este caso, obtiene la peor valoración con un 15,8% en este último criterio. Obtiene las más altas valoraciones en los subcriterios de cámara nocturna y telémetro, pero esto solo supone un 16,7% del total del criterio equipamiento. Es ahí la razón por la cual en el proceso AHP es el último resultado.

Queda patente, que, en el caso de adquirir nuevos mini-drones con estos objetivos para la Armada Española, el más adecuado será el modelo *Spark*. De todos modos, ambos modelos, *Huginn XI* y *Spark*, se complementan al tener el primero la capacidad de portar telémetro para mejor precisión en aplicaciones de observación de tiro y el segundo mejores capacidades para operaciones de reconocimiento, vigilancia, adquisición de blancos y combate en población.

#### *4.1.2 Consideraciones susceptibles de afectar al resultado*

Como hemos podido observar durante todo el proceso del método AHP, la toma de decisión en el resultado final es completamente objetiva y efectiva, basada en una serie de matrices y fórmulas matemáticas.

En este caso en concreto de compra de material militar, queda demostrado que la elección más objetiva de compra, basándonos en valores reales, de un mini-dron para el cuerpo de Infantería de Marina, sería el modelo *Spark* de la compañía *Dji*.

No obstante, en determinadas ocasiones, el resultado final de decisión se ve afectado por razones ajenas al proceso, como pueden ser razones económicas de presupuestos, acuerdos internacionales o simples acuerdos con otros ejércitos, no solo nacionales, si no también internacionales.

Por otro lado, también debemos de tener en cuenta posibles ofertas, ya que suele ser común que, al realizar una compra de varios drones, las empresas realicen rebajas de precio, lo cual haría, que, en este caso, por ejemplo, variasen los precios y de ahí las importancias económicas de las alternativas. Esto podría afectar a los resultados, sobre todo en otros casos donde el criterio económico tenga mayor peso que en nuestro caso.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones finales

Afirmamos que el método AHP es un proceso completamente efectivo y objetivo para la ayuda a la toma de decisiones basada en opiniones de expertos en la materia y que puede funcionar en casi cualquier ámbito de la Armada Española o empresa privada.

En nuestro caso, para la selección de un mini-dron que lleve a cabo determinadas funciones para el cuerpo de Infantería de Marina, hemos tenido en cuenta, gracias a la opinión de Comandantes y Capitanes del cuerpo y nuestra experiencia, tres criterios principales y subcriterios correspondientes que hemos considerado los más importantes en el planteamiento de nuestro problema.

Queda demostrado que los criterios que hemos elegido han sido suficientes en calidad y cantidad para demostrar la efectividad y la facilidad de la aplicación del método AHP. Sin embargo, cuanto más desarrollada, en cuanto a medios y personal dedicado en el estudio de los criterios de selección, mejores resultados obtendremos, es decir, mayor objetividad y adecuación en la compra de nuestras necesidades.

Realizando una comparación entre el modelo que está en servicio hoy en día en Infantería de Marina, el mini-dron *Huginn XI*, y el resultado del proceso que hemos aplicado, el mini-dron *Spark*, sacamos en conclusión que ambos son aptos y compatibles. El modelo *Huginn XI* tiene la ventaja de poder utilizar la cámara de visión nocturna en los periodos con ausencia de luz además de su mayor autonomía y la capacidad de incorporar un sistema de telemetría. Por otro lado, el modelo *Spark* tiene la ventaja de ser mucho más pequeño y menos pesado además de tener mayor resolución del sistema de posicionamiento GPS y tener un coste menor. Teniendo en cuenta la relevancia de su tamaño, es completamente compatible el uso de ambos drones debido a la facilidad de portarlo en la mochila de un soldado de Infantería en maniobras.

No hay que olvidar que este método es una herramienta y no la verdad absoluta. En el día a día, nos enfrentamos a multitud de problemas a la hora de realizar compras de este tipo, donde precisamente, en el Ministerio de Defensa encontramos cantidad de restricciones económicas que alteran los resultados de estas herramientas. La necesidad de adquirir un determinado número de drones y la restricción presupuestaria, es un factor determinante en el resultado final.

## 5.2 Líneas futuras

Conforme hemos ido desarrollando este Trabajo de Fin de Grado, hemos ido construyendo una serie de matrices y tablas en el programa Microsoft Excel que nos han ayudado a simplificar los numerosos, aunque sencillos, cálculos matemáticos necesarios para el método AHP.

Cabe destacar que estas matrices y tablas solo sirven para solucionar el problema que estamos estudiando en este trabajo, con los criterios y subcriterios que hemos seleccionado para este caso concreto. Hemos sacado, en conclusión, que incorporar un nuevo criterio o una nueva alternativa es una labor bastante complicada y difícil cuando ya hemos obtenido los resultados.

Este problema nos hace pensar que, si en un hipotético caso se incorporase esta metodología en la Armada, tal y como la hemos enfrentado en este trabajo, sería un herramienta laboriosa y complicada para trabajar donde en otras ocasiones, tendremos muchas más alternativas, criterios y subcriterios y constantes cambios.

Si realmente queremos que se incorpore a la Armada, deberíamos ser capaces de estandarizar su proceso a través de una herramienta informática que simplificase los pasos y mostrara de una forma más intuitiva como llevar a cabo dichos cambios y la introducción de nuevos datos.

Dicha herramienta configuraría las alternativas, criterios y subcriterios y solo habría que introducir los valores de cada uno de los criterios y subcriterios para que el programa realizara todos los cálculos directamente, ahorrando tiempo y esfuerzo, que, al fin y al cabo, se resume en ahorrar dinero.

## 5.3 Cumplimiento de objetivos

Con todo lo que hemos expuesto anteriormente llegamos a punto donde evaluamos los objetivos que se han alcanzado conforme a lo establecido al comienzo del trabajo:

- 1- En primer lugar, hemos conseguido exponer e investigar sobre los métodos de decisión multicriterio más actuales y en concreto el Proceso de Análisis Jerárquico, AHP.
- 2- En segundo lugar, hemos realizado dos rondas de entrevistas con el fin de determinar las aplicaciones reales que tienen los mini-drones en Infantería de Marina y asimismo obtener los requisitos materiales que deben de poseer dichos drones. En la segunda ronda de entrevistas, establecemos las prioridades entre los criterios y subcriterios que hemos establecido para la selección del mejor mini-UAV por parte de una comisión de expertos, Comandantes y Capitanes de la Armada Española.
- 3- En tercer lugar, hemos aplicado el Proceso de Análisis Jerárquico desarrollando todos los cálculos necesarios para llegar a un resultado final de elección. Además, hemos calculado la ratio de consistencia en cada una de las matrices.
- 4- Por último, hemos conseguido asesorar el cuerpo de Infantería de Marina, no solo con la elección a nuestro criterio del mejor mini-dron, sino que también ofreciendo una herramienta para la toma de decisiones que puede ser aplicada en multitud de situaciones.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. D. Hernando, «Portal web El Drone,» 2016. [En línea]. Available: eldrone.es. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [2] R. AUSTIN, Unmanned aircraft Systems. UAVS design, Development and Deployment, Chichester (Reino Unido): Jonh Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [3] L. R. Newcome, Unmanned Aviation. A brief History os Unmanned Aerial Vehicles, Reston, Virginia (EE.UU): American Istitute os Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [4] Diccionario Real Academia Española, 2018.
- [5] J. M. D. L. A. M. F. M. C. S. Sonia Chopo, Fundamentos de Administración de Empresas para estudiantes de ingeniería, Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa, 2011.
- [6] J. L. L. Criado, «La toma de decisioines de la empresa,» Universidad de Jaén.
- [7] J. R. C. Armenta, «Medición de la innovación en las pymes mediante la aplicación de métodos multicriterio,» 2010.
- [8] B. Vitoriano, «Teoría de la decisión: Decisión con incertidumbre, Decisión Multicriterio y Teoría de Juegos,» Universidad Complutense de Madrid, 2007.
- [9] C. Romero, «Análisis de la Deciones Multicriterio,» Isdefe Ingeniería de Sistemas, Madrid, 1996.
- [10] M. d. S. G. Cascales, «Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión, Tesis Doctoral,» Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2009.
- [11] P. G. Pérez, «Sistemas de control y sensores navales,» de *Seminario 6: Sensores optoelectrónicos*, Centro Universitario de la Defensa, 2017.
- [12] M. T. L. María Socorro García-Casales, «Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process,» Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2008.

- [13] M. T. L. José Antonio Alonso, «Consistency in the analytic hierarchy process: a new reproach,» Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Cádiz, Cádiz, 2005.
- [14] A.-C. G. I. D. MARINA, RIM 02-003 La sección de reconocimiento, 2009.
- [15] C. G. I. d. Marina, D-RIM-341 Armas colectivas de Batallón, 2012.
- [16] C. G. I. D. MARINA, RIM-801 La observación del tiro, 2011.
- [17] C. G. I. D. MARINA, PIFIM MI4-001 COMBATE DE PU EN ZONAS URBANIZADAS, 2008.
- [18] «Portal web tecnología de cámara fotográfica,» noviembre 2008. [En línea]. Available: [www.tecnología-camarafotografica.blogspot.com.es](http://www.tecnología-camarafotografica.blogspot.com.es). [Último acceso: 12 Febrero 2018].
- [19] J. P. Porto, «Portal web Definicion,» 2009. [En línea]. Available: [www.definicion.de/video-camara.com](http://www.definicion.de/video-camara.com). [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [20] «Portal web dron planet,» Mayo 2016. [En línea]. Available: [www.dronplanet.com](http://www.dronplanet.com). [Último acceso: 24 Enero 2018].
- [21] S. R. D. Portillo, «Astronomía y navegación,» de *Sistemas de navegación satélite. GPS.*, 2017.
- [22] «Portal web grupo geek,» [En línea]. Available: [www.grupogeek.com](http://www.grupogeek.com). [Último acceso: 24 Enero 2018].
- [23] «Portal web de drones MX,» 26 abril 2017. [En línea]. Available: [www.drones-mx.com](http://www.drones-mx.com). [Último acceso: 14 Febrero 2018].
- [24] DJI, «Portal web empresa Dji,» [En línea]. Available: [www.dji.com/inspire-2](http://www.dji.com/inspire-2). [Último acceso: 27 Enero 2018].
- [25] «Portal web empresa Sky-Watch,» [En línea]. Available: [www.sky-watch.com/products/huginnx1d/](http://www.sky-watch.com/products/huginnx1d/). [Último acceso: 26 Enero 2018].

## ANEXO I: ENTREVISTAS

### 1. Primera entrevista al Comandante de IM D. Sergio Díez González

La entrevista da comienzo a las 16:00 horas del 18 de enero de 2018 en el departamento nº4.

En esta primer primera ronda de entrevistas, se le plantea una serie de cuestiones relativas a las aplicaciones que tiene un mini-dron, o que puede tener, al Comandante D. Sergio Díez González.

Desde que salió con el empleo de Teniente de la Escuela Naval Militar, el Comandante D. Sergio Díez González ha estado destinado en el *TERSUR, en la Compañía de Seguridad BD-I Sección de Reconocimiento*, una vez ascendido al empleo de Capitán en el *Juan Carlos I* como oficial de carga y combate, en la *Escuela Naval Militar*, en el *Tercio Norte en la Compañía de Seguridad* y de nuevo en la *ENM*, como Comandante en el destino actual. Además, ha estado desplegado en la misión *OSCE* en Bosnia-Herzegovina durante 7 meses entre 2001 y 2002.

En base a la experiencia relacionada, el Comandante establece tres principales aplicaciones de los drones: el uso de drones en operaciones de observación de tiro, en operaciones de reconocimiento y en la modalidad de combate en población. Estas tres funciones están bien diferenciadas entre sí, donde se puede apreciar la variedad de empleo de los drones. En cuanto a la observación del tiro de las unidades de artillería, se puede situar un dron a una altura determinada en la que estemos capacitados para observar sobre un objetivo en la vertical y mandar, mediante coordenadas GPS, los datos a un receptor y abrir fuego, corrigiendo el fuego desde una posición cenital con tan solo un disparo al centro del objetivo, aunque éste esté en movimiento. Por otro lado, el experto militar afirma que otra de las aplicaciones eficaces, que hoy en día ya está en uso, es el reconocimiento de habitaciones, por ejemplo, en combate en población, donde una de los principales factores en dicha especialidad es la determinación, mediante dichos drones, de presencia de combatientes o población civil antes del asalto. En cuanto al reconocimiento, el oficial de marina cuenta que tiene diversos usos como reconocimiento de unidades enemigas, reconocimiento de la situación desde la cual estamos recibiendo fuego enemigo para poder actuar sobre ellos o el reconocimiento de las inmediaciones de las unidades donde se puede comprobar el terreno sobre el cual está avanzando la unidad o pelotón para detectar peligros geográficos.

Preguntándole sobre cuestiones más específicas, el Comandante llega a la conclusión de que, además de las aplicaciones que nos ha detallado, existe la posibilidad de utilizar el dron como estación meteorológica, en donde, a diferentes alturas, podría medir datos meteorológicos de interés para la realización de tiro de artillería. Hoy en día, existen otros métodos.

De acuerdo a las aplicaciones descritas anteriormente, el entrevistado responde a los requisitos materiales necesarios para cumplir con los objetivos. Dependiendo de los casos, necesitaremos unos u otros: para la disponibilidad del dron para realizar observación de tiro, es un requisito indispensable la utilización de un sistema de posicionamiento como es el GPS, además de un sistema de medición de distancias lo suficientemente preciso como son los telémetros láser y una cámara para poder situar el dron en una posición estratégica donde tengamos acceso a la posición del objetivo y sea difícil su detección por parte del enemigo. En segundo lugar, si uso está enfocado a las operaciones de observación, es estrictamente necesario disponer de cámaras con visión nocturna para su uso tanto en observación de día como de noche. Por último, el Comandante afirma que para los casos en los que se utilice para las operaciones de combate en población sería conveniente una cámara infrarroja para aquellos casos donde la habitación a registrar, por ejemplo, padezca de luz solar.

La entrevista finaliza a las 16:20 horas del 18 de enero de 2018.

El Comandante EOF-CIM



Sergio Diez González

## 2. Segunda entrevista al Comandante de IM. D. Sergio Diez González

### **Importancia de los criterios comparados por pares en escala de 1 a 9**

#### CRITERIOS

ECONÓMICO/DISEÑO 3

DISEÑO/EQUIPAMIENTO 1

ECONÓMICO/EQUIPAMIENTO 3

#### SUBCRITERIOS DISEÑO

AUTONOMÍA/TAMAÑO 1

AUTONOMÍA/PESO 5

AUTONOMÍA/RUIDO 3

AUTONOMÍA/VELOCIDAD 3

TAMAÑO/PESO 1

TAMAÑO/RUIDO 5

TAMAÑO/VELOCIDAD 9

PESO/RUIDO 1

PESO/VELOCIDAD 3

RUIDO/VELOCIDAD 5

#### SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA VISIÓN NOCTURNA 1

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA TÉRMICA 9

CÁMARA VÍDEO/TELÉMETRO 5

CÁMARA VÍDEO/GPS 1

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/CÁMARA TÉRMICA 3

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/TELÉMETRO 5

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/GPS 5

CÁMARA TÉRMICA/TELÉMETRO 9

CÁMARA TÉRMICA/GPS 5

TELÉMETRO/GPS 9

### 3. Primera entrevista al Comandante de IM D. Andrés Ignacio Torre López

La entrevista da comienzo a las 16:10 horas del 22 de enero de 2018 en los despachos de Jefatura de Estudios.

En esta primera entrevista, al igual que los demás entrevistados, se le plantea varias cuestiones al Comandante Torre López relativas a las aplicaciones que puede desempeñar los mini-drones en Infantería de Marina.

El Comandante ha estado destinado en la *Brigada de Infantería de Marina*, en el *TEAR*, como 2º Comandante del GAD y jefe 3ª Batería ATP y equipos ACAF, en el *Estado Mayor del TEAR*, en la *SIAF (Spain-Italian Amphibious Force in Brindisi como coordinador de Fuegos)*, y actualmente en la *Escuela Naval Militar*. Ha realizado la misión *Libre Hidalgo* durante 6 meses entre 2011 y 2012, *EUFOR-ALTEA* en Bosnia-Herzegovina durante 4 meses en 2010 y la misión de ayuda humanitaria en Haití durante 4 meses en 2005. Es especialista Artillería y Coordinación de Fuegos.

Nos cuenta el Comandante que dentro de su especialidad encuentra dos funciones principales para los mini-drones. Por un lado, su uso como observación avanzada, de modo, que apoye al equipo de observación pudiendo desplegarlo reduciendo el riesgo de exponerse al observador y de igual manera que pueda operarlo desde una posición más protegida. En segundo lugar, puede realizar adquisición de blancos, corrección de tiro, obtención de los resultados del fuego o incluso hacer una designación láser para guiado terminal de bombas de guiado láser o designación de blancos para aeronaves que dispongan de LST (Laser Spot Tracker).

Por otro lado, se le ocurre su uso como estación meteorológica en la cual recopile datos meteo para realizar tiros de artillería. Hoy en día, nos explica que se usan globos que son lanzados y éstos recogen los datos y los transmiten a los receptores para la corrección del tiro y aportar los datos del boletín meteorológico que permiten entrar en eficacia sin fase de corrección. O, por ejemplo, también se le ocurre, que se usen a modo de *relé* para tener mayores alcances a la hora de enlazar entre el observador y la unidad que abre fuego, y, al mismo tiempo, utilizar radio UHF en vez de HF (actual) ya que es más fiable obtener línea directa para permitir comunicaciones UHF. También dice que se usa de manera más general en Infantería de Marina para reconocimiento y obtener mucha información que es muy valiosa a muy corto plazo.

Para cumplir con éxito operaciones de reconocimiento será necesario cámaras de TV, infrarrojas o térmicas, donde destaca, que, según las distancias, será conveniente utilizar unas u otras dependiendo de la resolución o precisión que queremos obtener. Comenta, que, las cámaras térmicas pueden ser las que tengan mayor detección, pero, a lo mejor, no tienen la misma precisión que otras de TV o IR. Para temas de observación y adquisición de blancos es fundamental que tuviera un designador láser para la telemetría y GPS para obtener los datos de un blanco en cuanto a su posicionamiento ya sea visual o GPS y el telémetro para obtener la distancia y dirección. Para el empleo por parte de las unidades de adquisición de blancos (TAR/ACAF) es fundamental que el sistema sea sencillo, ligero y preciso en cuanto a poder aportar los datos de los blancos de forma rápida y segura.

La entrevista finaliza a las 16:30 horas del 22 de enero de 2018.

El Comandante EOF-CIM



Andrés Ignacio Torre López

#### 4. Segunda entrevista Comandante de IM D. Andrés Ignacio Torre López

### Importancia de los criterios comparados por pares en escala de 1 a 9

#### CRITERIOS

ECONÓMICO/DISEÑO 7

DISEÑO/EQUIPAMIENTO 7

ECONÓMICO/EQUIPAMIENTO 9

#### SUBCRITERIOS DISEÑO

AUTONOMÍA/TAMAÑO 5

AUTONOMÍA/PESO 5

AUTONOMÍA/RUIDO 3

AUTONOMÍA/VELOCIDAD 5

TAMAÑO/PESO 3

TAMAÑO/RUIDO 3

TAMAÑO/VELOCIDAD 9

PESO/RUIDO 5

PESO/VELOCIDAD 7

RUIDO/VELOCIDAD 3

#### SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA VISIÓN NOCTURNA 3

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA TÉRMICA 5

CÁMARA VÍDEO/TELÉMETRO 3

CÁMARA VÍDEO/GPS 7

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/CÁMARA TÉRMICA 7

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/TELÉMETRO 5

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/GPS 5

CÁMARA TÉRMICA/TELÉMETRO 5

CÁMARA TÉRMICA/GPS 5

TELÉMETRO/GPS 7

## 5. Primera entrevista al Capitán de IM D. Andrés García Yubero

La entrevista da comienzo a las 13:00 horas del 22 de enero de 2018 en el departamento nº 4.

Manteniendo la misma filosofía que las demás entrevistas, buscamos en la experiencia del Capitán D. Andrés García Yubero en el cuerpo de Infantería de Marina encontrar más aplicaciones y en concreto en el ámbito de las comunicaciones, debido a su especialidad.

Los diferentes destinos en los que ha estado el Capitán D. Andrés García Yubero son el *Cuartel General de la fuerza de Infantería de Marina*, la *compañía CIS en el Batallón del Cuartel General TEAR G. 6*, *Estado Mayor del TEAR* y la *Escuela Naval Militar*, éste último en la actualidad. Así mismo, participó en la misión internacional en Bosnia durante 6 meses en 2004. Es especialista en comunicaciones.

Empezando las primeras preguntas concretando en su especialidad de comunicaciones, el Capitán cuenta que a día de hoy no existe ningún tipo de dron que sea utilizado en el ámbito de las comunicaciones en sí, confirmando que son usados fundamentalmente en operaciones de vigilancia u observación, ISTAR (Inteligencia, Vigilancia, Adquisición de Blanco y Reconocimiento, por sus siglas en inglés). No obstante, el Capitán cree que podría funcionar como *relé* en el caso de poder instalar una antena emisor y receptor. Habría una posibilidad, comenta, de que desde los puestos de mando se utilice el dron como modo *relé*, ya no solo de redes radio, sino también de redes Wi-fi de datos. Es decir, un batallón podría tener un dron en el aire para que sus unidades aprovecharan el posicionamiento y enviaran datos a través de la red Wi-fi. Sin embargo, reconoce que este sistema tendría que tener un circuito táctico, seguro o certificado, para asegurar las comunicaciones. Ciertamente es que hoy en día se está trabajando en ello. En definitiva, el Capitán considera que, dentro del mundo de las comunicaciones, una de las pocas aplicaciones que tendría sería como *relé* en comunicaciones, tanto radio como Wi-fi.

Preguntado por otros empleos más generalizados en el cuerpo de Infantería de Marina, el capitán responde que como bien había mencionado anteriormente en otra pregunta, en operaciones de vigilancia y reconocimiento son fundamentales el uso de mini-drones. Comenta que el apoyo al posicionamiento de las unidades con un modo *relé*, ya que hoy en día los UAVs cogen toda la gama de ISTAR y de ataque, son un claro ejemplo de su uso. En cuanto al reconocimiento, afirma que un pelotón o una patrulla en la que establezca un dron para ver el objetivo puede comprobar si corresponde con el planeamiento que acababan de hacer y así poder colocar sus elementos alrededor del objetivo.

Como aplicación secundaria, según el Capitán sería la instalación de una estación meteorológica en el dron. En los tiros de artillería, dice, son los casos donde empiezan a influir las condiciones meteorológicas. A día de hoy, explica, que las unidades del Ejército de Tierra no utilizan UAVs y sí globos que recopilan la información necesaria. Explica que sería un avance dicho uso, pero no le sería una prioridad para la decisión de la aplicación del UAV.

Siendo preguntado por operaciones de decepción con uso de drones, el entrevistado descarta dicha utilidad. Piensa, por ejemplo, que, utilizando un mini-dron en una determinada dirección en el campo, los enemigos puedan pensar que nuestras unidades se encuentran cerca pero no tiene por qué en esa exacta dirección. No obstante, hará que reaccionen al detectar nuestra presencia en las inmediaciones más cercanas. Ahora bien, el Capitán no cree que sea algo factible el hecho de disponer de un dron para su uso exclusivo en operaciones de decepción.

Por último, se le plantea la posibilidad de perturbación de comunicaciones enemigas mediante drones lo cual piensa que es algo complicado. Hasta donde sabe el Capitán, hoy en día no existen perturbadores de frecuencias los suficientemente pequeños como para que lo soporte un mini-dron. En cambio, se le ocurre la instalación de un inhibidor para, por ejemplo, el caso de tener un convoy con un dron adelantado y actuando de dicha manera.

Respondiendo a los equipamientos que serían necesarios para las aplicaciones descritas por el mismo, se diferencia dependiendo de la función del dron. Por un lado, para las operaciones de exploración sería necesaria una pequeña cámara infrarroja o cámara térmica. Por otro lado, para operaciones donde se tenga en cuenta el posicionamiento, evidentemente, sería necesario un sistema de GPS con emisor y receptor. Si bien la finalidad es como medio Wi-fi, el requisito sería un punto de acceso Wi-fi o radio montado en el dron. Por último, afirma que, si se da el uso del dron para obtener datos meteorológicos, evidentemente exige tener una estación meteo.

La entrevista finaliza a las 13:20 horas del 22 de enero de 2018.

El Capitán EOF-CIM



Andrés García Yubero

## 6. Segunda entrevista al Capitán de IM D. Andrés García Yubero

### CRITERIOS

ECONÓMICO/DISEÑO 7

DISEÑO/EQUIPAMIENTO 1

ECONÓMICO/EQUIPAMIENTO 7

### SUBCRITERIOS DISEÑO

AUTONOMÍA/TAMAÑO 1

AUTONOMÍA/PESO 1

AUTONOMÍA/RUIDO 3

AUTONOMÍA/VELOCIDAD 7

TAMAÑO/PESO 5

TAMAÑO/RUIDO 5

TAMAÑO/VELOCIDAD 5

PESO/RUIDO 5

PESO/VELOCIDAD 5

RUIDO/VELOCIDAD 7

SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA VISIÓN NOCTURNA 5

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA TÉRMICA 5

CÁMARA VÍDEO/TELÉMETRO 1

CÁMARA VÍDEO/GPS 7

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/CÁMARA TÉRMICA 5

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/TELÉMETRO 5

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/GPS 3

CÁMARA TÉRMICA/TELÉMETRO 5

CÁMARA TÉRMICA/GPS 1

TELÉMETRO/GPS 9

## 7. Primera entrevista al Capitán de IM D. Juan Manuel Esnaola Rico

La entrevista da comienzo a las 16:00 horas del 23 de enero de 2018 en el departamento nº 4.

Por último, realizamos una entrevista al Capitán D. Juan Manuel Esnaola Rico el cual puede aportar interesantes aplicaciones debido al curso de *Jaca* que ha realizado recientemente y su abundante experiencia en el cuerpo.

Su primer destino como Teniente fue la *3º compañía del 1º Batallón de desembarco*. En su tercer año de teniente estuvo 6 meses en el *Tercio del Sur*, donde a continuación como Capitán pasó al destino del *Primer Batallón de Desembarco del TEAR*. Actualmente, se encuentra destinado en la *Escuela Naval Militar*. Cabe destacar las tres misiones *EUFOR-ALTEA* en Bosnia-Herzegovina durante 4 meses en 2006, 7 meses en 2007 y la misión de la Unión Europea en Bosnia-Herzegovina durante 4 meses en 2008. Ha realizado el curso de *Jaca* o también conocido como curso de *operaciones especiales*. Es ingeniero naval e instructor de buceo.

Habiendo realizado dicho característico curso, es evidente que la primera pregunta a la que se enfrenta el Capitán ha de ser sobre las aplicaciones que tienen los drones en operaciones especiales. Aunque no tenga la especialidad de Fuerza de Guerra Naval Especial, debido que no pudo realizar el curso de *buceador de combate*, Juan Manuel tiene muchos conocimientos de operaciones especiales y es por ello que nos detalla varias aplicaciones. La primera de ellas, patrullas de reconocimiento vehiculares, de modo que, el dron se usa como punta de vanguardia de la columna de vehículos. Del mismo modo, reconocimiento de objetivos mediante la adquisición de imágenes y blancos. Por otro lado, en operaciones de combate en población (CQB), cuando una patrulla se encuentra en una posición protegida puede hacer uso del dron para saber de dónde les están abriendo fuego. Esos son los principales usos en términos del curso de *Jaca*, nos comenta.

Preguntado por otras funcionalidades que se le pueden dar al dron, nos explica varios usos como, por ejemplo, parecido al caso anterior, una columna de vehículos Caat que en caso de caer en una emboscada saber rápidamente desde dónde están disparando. En ejercicios de observación de tiro, es muy común el empleo de drones junto con el sistema TALOS para la adquisición de los diferentes objetivos y marcarlos directamente en el mortero 81 y corregir el tiro. A modo de resumen, se hace uso para reconocimiento en observatorios, adquisición de fotografías y datos, y, por otro lado, en observación de tiro.

Siendo preguntado por operaciones de decepción o recogida de datos meteorológicos, desestima ambos como aplicación principal. Explica, en el primer caso, que todas las operaciones de decepción son intentos de engañar al enemigo, donde un dron puede ser efectivo, o no. En todo caso, no debe ser la única función del dron. En el segundo caso, hablando con sus conocimientos básicos de artillería, piensa que no sería eficaz. Se explica de modo que el mortero 81 tiene unos alcances de 6/7 kilómetros donde la señal radio de la estación meteorológica del dron no tendría cobertura a dichas distancias, lo cual no funcionaría para recoger los datos necesarios.

Una vez desarrolladas las aplicaciones que encuentra el oficial de Infantería de Marina, es necesario cámaras térmicas para realizar fotografías a la hora de adquirir blancos y reconocerlos. Explica que la razón de cámaras térmicas antes que cámaras de TV o IR (Infrarrojos) es que pueden asegurar la presencia de enemigos con mayor capacidad de detección que con cámaras convencionales e IR. Para determinar la posición y distancia a la hora de ejecutar ejercicios de tiro, es indispensable un sistema de posicionamiento GPS y un telémetro.

La entrevista finaliza a las 16:20 horas del 23 de enero de 2018.

El Capitán EOF-CIM

Juan Manuel Esnaola Rico



## 8. Segunda entrevista al Capitán de IM D. Juan Manuel Esnaola Rico

### **Importancia de los criterios comparados por pares en escala de 1 a 9**

#### CRITERIOS

ECONÓMICO/DISEÑO 5

DISEÑO/EQUIPAMIENTO 3

ECONÓMICO/EQUIPAMIENTO 7

#### SUBCRITERIOS DISEÑO

AUTONOMÍA/TAMAÑO 5

AUTONOMÍA/PESO 5

AUTONOMÍA/RUIDO 5

AUTONOMÍA/VELOCIDAD 9

TAMAÑO/PESO 5

TAMAÑO/RUIDO 1

TAMAÑO/VELOCIDAD 5

PESO/RUIDO 3

PESO/VELOCIDAD 5

RUIDO/VELOCIDAD 3

#### SUBCRITERIOS EQUIPAMIENTO

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA VISIÓN NOCTURNA 5

CÁMARA VÍDEO/CÁMARA TÉRMICA 7

CÁMARA VÍDEO/TELÉMETRO 3

CÁMARA VÍDEO/GPS 9

CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/CÁMARA TÉRMICA 5

**CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/TELÉMETRO 1**

**CÁMARA VISIÓN NOCTURNA/GPS 1**

**CÁMARA TÉRMICA/TELÉMETRO 3**

**CÁMARA TÉRMICA/GPS 3**

**TELÉMETRO/GPS 7**

## ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE DRONES

### 1. Ficha técnica modelo 1 Inspire 1 Pro/Raw

#### Appendix

- **Aircraft (Model: T600)**

Weight	2845 g (Battery and Propellers Included, Zenmuse X3 Excluded)
Weight	3060 g (Battery, Propellers and Zenmuse X3 Included)
Maximum Weight of Payload	3500 g
Max Tilt Angle	35°
Max Ascent Speed	5 m/s
Max Descent Speed	4 m/s
Max Speed	20 m/s (ATTI mode, no wind)
Max Altitude Above Sea Level	14,700 feet (4,500 meters)
Max Flight Time	Approximately 18.5 minutes
Operating Temperature Range	14° to 104° F (-10° to 40° C)
- **Gimbal (Model: ZENMUSE X3)**

Angular Vibration Range	±0.03°
Controllable Range	Pitch: -90° to +30° Pan: ±320°
Max Controllable Speed	Pitch: 120°/s Pan: 180°/s
- **Vision Positioning System**

Velocity Range	<8 m/s @Altitude 6.56 feet (2 m)
Altitude Range	0.16 feet - 16.4 feet (5 cm-500 cm)
Operating Range	<9.84 feet (<300 cm)
Operating Environment	Surface with clear pattern and adequate lighting (>15 Lux )
- **Camera (Name/Model: X3/FC350)**

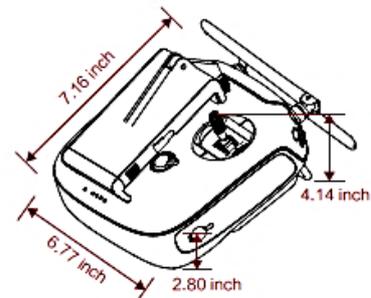
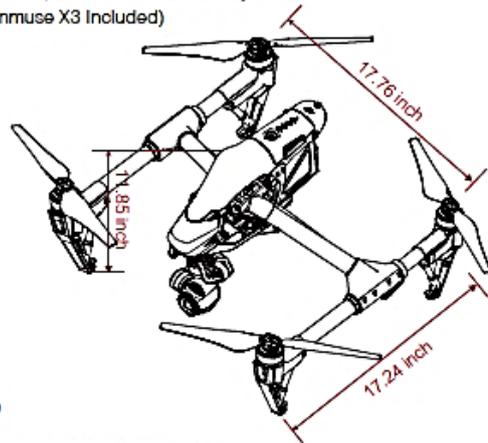
Sensor	Sony Exmor R CMOS (Type 1/2.33), Effective pixels: 12.4M (total pixels: 12.76M)
Lens	FOV (Field Of View) 94° 20 mm (35 mm format equivalent) f/2.8
ISO Range	100-3200 (video) 100-1600 (photo)
Electronic Shutter Speed	8 s-1/8000 s
Image Max Size	4000x3000
Still Photography Modes	Single shoot; Burst shooting: 3/5/7 frames
Video Recording Modes	Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 bracketed frames at 0.7EV Bias; Time-lapse
Max Bitrate Of Video Storage	60 Mbps
Supported File Systems	FAT32 (≤ 32 GB), exFAT (> 32 GB)
Photo Formats	JPEG, DNG
VideoFormats	MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Supported SD Card Types	Micro SD, Max capacity: 64GB. Class 10 or UHS-1 rating required
Operating Temperature Range	32° to 104° F (0° to 40° C)
- **Remote Controller (Name: C1)**

Operating Frequency	922.7 MHz-927.7 MHz (Japan only) 5.725 GHz-5.825 GHz 2.400 GHz-2.483 GHz
Transmitting Distance	Up to 6 km or 3.1 miles (unobstructed, free of interference) when FCC compliant Up to 3.6 km or 2.1 miles (unobstructed, free of interference) when CE compliant
Video Output Port	USB, Mini-HDMI
Operating Temperature Range	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Battery	6000 mAh LiPo 2S
- **Charger (Model: A14-100P1A)**

Voltage	26.3 V
Rated Power	100 W
- **Intelligent Flight Battery (Model: TB47, Standard)**

Capacity	4500 mAh
Voltage	22.2 V
Battery Type	LiPo 6S High voltage battery
Energy	99.9 Wh
Net Weight	570 g
Operating Temge	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Max Charging Power	180 W
- **Intelligent Flight Battery (Model: TB48, Optional)**

Capacity	5700 mAh
Voltage	22.8 V
Battery Type	LiPo 6S High voltage battery
Energy	129.96 Wh
Net Weight	670 g
Operating Temge	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Max Charging Power	180 W



※ This Quick Start Guide is subject to change without prior notice.

YC.BZ.S00284.04

## 2. Ficha técnica modelo 2 Inspire 2

### Especificaciones

- **Aeronave (Modelo: T650)**

Peso	3290 g (7,25 lbs) con dos baterías, sin el estabilizador con cámara
Distancia diagonal (sin hélice)	605 mm (23,8 pulgadas, modo de aterrizaje)
Peso máximo en orden de vuelo	4000 g (8,82 lbs)
Altitud de despegue máx. desde nivel del mar	2500 m (1,55 mi); 5000 m (3,1 mi) con hélice diseñada especialmente
Tiempo de vuelo máximo	Aprox. 25 min. (con Zenmuse X5S)
Ángulo de inclinación máximo	Modo P: 35° (Sistema de Visión Frontal activado: 25°); Modo A: 35°; Modo S: 40°
Velocidad de ascenso máx.	Modo P/Modo A: 5 m/s (16,4 pies/s); Modo S 6 m/s (19,7 pies/s)
Velocidad de descenso máx.	Vertical: 4 m/s (13,1 pies/s); Inclinación: 4-9 m/s (13,1-29,5 pies/s)
Precisión de Vuelo Estacionario con GPS	Vertical: ±0,5 m (1,64 pies) o ±0,1 m (0,33 pies, Sistema de Visión Inferior activado) Horizontal: ±1,5 m (4,92 pies) o ±0,3 m (0,98 pies, Sistema de Visión Inferior activado)
Temperatura operativa	-20 a 40 °C (-4 a 104 °F)
- **Estabilizador**

Intervalo de vibración angular	±0,01°
Rango controlable	Inclinación: -130° a +40°; Alabeo: ±20°; Giro: ±320°
Velocidad máx. controlable	Cabeceo: 180°/s; Guiñada: 180°/s; Giro: 270°/s
Tipo de interfaz	DGC2.0
- **Sistema de visión inferior**

Rango de velocidad	< 10 m/s (32,8 pies/s) a una altitud de 2 m (6,56 pies)
Intervalo de altitud	< 10 m (32,8 pies)
Rango de funcionamiento	< 10 m (32,8 pies)
Entorno de funcionamiento	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)
Rango de funcionamiento de sensores ultrasónicos	10-500 cm (0,33-16,4 pies)
Entorno de funcionamiento de sensores ultrasónicos	Material no absorbente, superficie rígida (las alfombras o moquetas gruesas reducen el rendimiento en interiores)
- **Sistema de visión frontal**

Rango de detección de obstáculos	0,7 a 30 m (2,3 a 98,4 pies)
FOV	Horizontal: 60°; Vertical: 54°
Entorno de funcionamiento	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)
- **Sensor infrarrojo superior**

Rango de detección de obstáculos	0 a 5 m (0 a 16,4 pies)
FOV	±5°
Entorno de funcionamiento	Obstáculos de gran tamaño no reflectantes de gran reflectividad (reflectividad > 10 %)
- **Control remoto**

Frecuencia operativa	2,400-2,483 GHz; 5,725-5,825 GHz
Distancia de transmisión máxima (sin obstáculos, libre de interferencia) EIRP	2,4 GHz: 7 km (4,3 millas, FCC); 3,5 km (2,2 millas, CE); 4 km (2,5 millas, SRRC) 5,8 GHz: 7 km (4,3 millas, FCC); 2 km (1,2 millas, CE); 5 km (3,1 millas, SRRC)
Batería	2,4 GHz: 26 dBm (FCC); 17 dBm (CE); 20 dBm (SRRC) 5,8 GHz: 28 dBm (FCC); 14 dBm (CE); 20 dBm (SRRC)
Potencia de salida	LiPo 2S de 6000 mAh
Alimentación por USB	9 W (sin alimentación para dispositivo móvil)
Temperatura operativa	iOS: 1 A a 5,2 V (máx.); Android: 1,5 A a 5,2 V (máx.) -20 a 40 °C (-4 a 104 °F)
- **Cargador (Modelo: IN2C180)**

Voltaje	26,1 V
Potencia nominal	180 W
- **Batería de vuelo inteligente (Modelo: TB50-4280mAh-22.8V)**

Capacidad	4280 mAh
Voltaje	22,8 V
Tipo de batería	LiPo 4S
Energía	97,68 Wh
Peso neto	515 g
Temperatura de carga	41 a 104 °F (5 a 40 °C)
Temperatura operativa	-20 a 40 °C (-4 a 104 °F)
Potencia de carga máx.	180 W
- **Centro de Carga (Modelo: IN2CH)**

Voltaje de entrada	26,1 V
Corriente de salida	6,9 A

**HDMI™**  
High-Definition Multimedia Interface

DJI incorpora tecnología HDMI™. The terms HDMI and HDMI High-Definition Multimedia Interface, and the HDMI Logo are trademarks or registered trademarks of HDMI Licensing LLC in the United States and other countries.

Descargue el manual de usuario completo en:  
[www.dji.com/inspire-2](http://www.dji.com/inspire-2)

※ El contenido está sujeto a cambios sin previo aviso.

INSPIRE y DJI son marcas registradas de DJI.  
Copyright © 2018 DJI Todos los derechos reservados.

Diseñado por DJI. Impreso en China.

### 3. Ficha técnica modelo 3 Spark

#### Specifications

<b>• Aircraft</b>	
Weight	300 g
Dimensions	143x143x55 mm
Max Speed	31 mph (50 kph) in Sport Mode without wind
Operating Temperature	32° to 104° F (0° to 40° C)
<b>• Gimbal</b>	
Controllable Range	Pitch: -85° to 0°
Stabilization	2-axis (pitch, roll)
<b>• 3D Sensing System</b>	
Sensing Range	0.6 - 16 ft (0.2 - 5 m)
Operating Environment	Surface with diffuse reflection material, size > 20x20 mm and reflectivity > 20% (such as wall, trees, humans, etc.)
<b>• Vision System</b>	
Velocity Range	≤ 22.4 mph (36 kph) at 6.6 ft (2 m) above ground
Altitude Range	0 - 26 feet (0 - 8 m)
Operating Range	0 - 98 feet (0 - 30 m)
Operating Environment	Surfaces with a clear patterns and diffuse reflection material, reflectivity > 20%, adequate lighting (lux > 15)
<b>• Camera</b>	
Sensor	1/2.3" CMOS Effective pixels: 12 Megapixels
Video Recording Modes	FHD: 1920x1080 30p
Lens	25 mm (35 mm format equivalent), f/2.6
<b>• Remote Control Device</b>	
Operating Frequency	2.4 GHz / 5.8 GHz
Max Transmission Distance	Wi-Fi: 100 m (Distance), 50 m (Height)
(Unobstructed, free of interference)	Remote Controller:
	2.4 GHz: 2000 m (FCC), 500 m (CE), 500 m (SRRC)
	5.8 GHz: 2000 m (FCC), 300 m (CE), 1200 m (SRRC)
<b>• Charger</b>	
Input	100-240 V, 50/60 Hz, 0.5 A
Output	5 V = 3 A / 9 V = 2A / 12 V = 1.5 A
<b>• Intelligent Flight Battery</b>	
Capacity	1480 mAh
Battery Type	LiPo 3S
Charging Temperature	41° to 104° F (5° to 40° C)

#### 4. Ficha técnica modelo 4 Huginn X1

## TECHNECAL SPECIFICATIONS

DIMENSIONS	L x W x D	Weight
Huginn X1 (folded)	509mm x 133mm x 133mm	940g
Huginn X1 (maximum unfolded with rotor blades)	760mm x 560mm x 260mm	940g
Huginn X1 (minimum unfolded without rotor blades)	370mm x 380mm x 133mm	880g
Huginn Ground station	240mm x 105mm x 65mm	810g
Huginn Battery	110mm x 85mm x 32mm	450g
Huginn Camera Mount (Single/Dual)	92mm x 90mm x 80mm	Single 104g / Dual 208g
VIDEO		
Receiver	5.8 GHz diversity	
Transmitter	5.8 GHz 500 mW	
Antenna type	Sky-Watch dipole 5.8 GHz 1.6 dBi	
Radio frequency	5.8GHz	
Transmission range	Up to 2 km	Line of sight
Transmission power	Up to 500mW	(-3 dBW or 27 dBm)
Estimated radiation power	200mW	(-7 dBW or 23 dBm)
COMMUNICATION		
Module	868 MHz or 900 MHz encrypted 128bit duplex communication	
Antenna type	Sky-Watch dipole 868 or 900 MHz 1.5 dBi	
Radio frequency	868 or 900 MHz	
Transmission range	Up to 5 km	Line of sight
Transmission power	200 - 300 mW	
SUPPORTED ADD-ONS		
X1 Full HD video/still	1080p 60 FPS / 16 MP (containing meta data)	10 x zoom
X1 FLIR Quark 2 thermal camera	640 * 480 resolution	
X1 dual mount thermal/HD	Combined HD/FLIR lens	
PERFORMANCE		
Auto. take-off height	Selectable for each take-off	
Max hover time	25 min	With single camera
Ground Station battery time	> 10 hours	
Max cruise speed (ground speed)	6 m/s	(21,6 km/h)
Max vertical speed	6 m/s	(21,6 km/h)
Min take-off GPS accuracy	4 m	
Min flight GPS accuracy	6 m	
Maximum absolute altitude	10.000 feet AMSL	
Maximum waypoint step	10 km	
Minimum hover height	0,7 m	
Sonar range	0 - 5 m	
Maximum operating temp.	45 C °	
Minimum operating temp.	-20 C °	
Auto land battery voltage	13,7V	
Battery charge time	< 90 min	
Charger power supply voltage	12 V	
Huginn battery voltage	14,8 V	16v when fully charged
Huginn battery capacity	5000 mAh	

Ver. 1.4  
19.06.2015