

03-040

ASSESSMENT OF MULTIROLE AIRCRAFT FOR TRANSPORT MISSIONS OF THE SPANISH AIR FORCE. A FUZZY MULTI-CRITERIA DECISION PROBLEM

Sánchez Lozano, Juan Miguel ⁽¹⁾; Castellanos Guerrero, Juan ⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro Universitario de la Defensa de San Javier, ⁽²⁾ Ala 35 Base Aérea de Getafe. Ejército del Aire

The main goal of this study is to, in first place, know about the situation and actual needs of air transport in the Spanish Air Force, so that it can offer different alternatives which cover the required needs previously found. Decision problems of this type involve not only quantitative criteria (service ceiling, autonomy, power, etc.), but also parameters that are difficult to quantify due to their subjective nature (tactical capacity, ergonomics, compatibility with other platforms, etc.). That is why the choice as the best alternative among the proposals will be based on the combination of two consolidated methods of multi-criteria decision making (AHP and TOPSIS methodologies) and logic of fuzzy sets. This will all be grouped in an objective decision approved by the experience of a group of experts who can look at different evaluation aspects that are beyond the technical ones.

Keywords: transport aircrafts; Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS); Analytic Hierarchy Process (AHP); fuzzy logic; criteria; experts

EVALUACIÓN DE AERONAVES MULTI-ROL PARA MISIONES DE TRANSPORTE DEL EJÉRCITO DEL AIRE ESPAÑOL. UN PROBLEMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO DIFUSO

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, conocer la situación y necesidades actuales del transporte aéreo militar en el Ejército del Aire, para ofrecer, en segundo lugar, una serie de alternativas capaces de cubrir las necesidades expuestas. En problemas de decisión de este tipo intervienen no sólo criterios de naturaleza cuantitativa (techo de servicio, autonomía, potencia, etc.) sino también parámetros de difícil cuantificación por su marcado carácter subjetivo (capacidad táctica, ergonomía, compatibilidad con otras plataformas, etc.). Es por ello por lo que la elección como mejor alternativa entre las propuestas será en base a la combinación de dos métodos consolidados de toma de decisiones multi-criterio (metodologías AHP y TOPSIS) y la lógica de conjuntos difusos, apoyada en los criterios de idoneidad para ser elegida, concluyendo todo ello en una decisión objetiva complementada por la experiencia de un grupo de expertos que abarca aspectos en la evaluación más allá de los meramente técnicos.

Palabras clave: aviones de transporte; Técnica de Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS); Proceso Analítico Jerárquico (AHP); lógica difusa; criterios; expertos

Agradecimientos: Este trabajo está financiado por el proyecto de investigación PID2020-112754GB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España) y por el proyecto Fundación Séneca (22069/PI/22). España.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En la actualidad solo es entendible una aviación conjunta enmarcada en el entorno europeo e internacional de asociaciones como la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) o el European Air Transport Command (en adelante EATC). Esto se explica dentro de un marco de globalización y cooperación entre los distintos países que integran las alianzas, y que buscan el beneficio mutuo a través de la unión de medios y esfuerzos, así como la necesidad de hacer frente a unas amenazas cada vez más sofisticadas y más fácilmente extensibles a nivel mundial (Delgado Morán, Jiménez Reina, & Jiménez Reina, 2019).

Cabe señalar este contexto ya que es la situación actual que condiciona la aviación militar en general, y en concreto la del transporte aéreo militar (TAM) español, donde la mitad de sus aeronaves, el A330 MRTT, el A310, el Falcon 900, el C-295 y el A400M, están cedidas al EATC, siendo las restantes el Lockheed P.3 Orión, la Cessna Citation V, el Bombardier CL-215T, la Beechcraft C90, el CN-235 y el C-212 aviocar (Ejército del Aire, n.d.). Esta relación de dependencia de un organismo superior y conjunto justifica las operaciones a nivel nacional de las diferentes unidades que lo conforman, y que muchas veces se ven marcadas y guiadas desde el marco común tanto en el tipo de misiones como en su importancia y reiteración, con el objetivo de que en un posible escenario las distintas fuerzas puedan operar conjuntamente (Gómez de Ágreda, 2009).

Por otra parte, son algunas de estas aeronaves que no forman parte de organizaciones internacionales las que se encuentran más obsoletas y con el fin de su vida operativa próximo, siendo incluso complicado encontrar repuestos para aquellas que ya no se fabrican en la actualidad como el C-212 aviocar (Maíz Sanz, 2020). Otros, como el P-3 Orión solo cuenta con una unidad operativa en su escuadrón, y se está tratando de encontrar un sustituto pues su vida operativa ya tiene fecha de caducidad para el año siguiente, y lo puede buscar conjuntamente con el CN-235 de Vigilancia Marítima (VIGMA), que se suma a la necesidad (Navarro García, 2021).

Por lo tanto, la búsqueda de un aeronave de transporte multi-rol es un asunto de especial relevancia y urgencia en las operaciones del Ejército del Aire (EA) español, que puede ver como una parte de su flota pierde su operatividad en el corto o medio plazo. Asimismo, es una problemática real, que como se ha podido expuesto en este punto se está tratando de dar solución a fecha de hoy, por lo que también es un tema de actualidad. Este problema de decisión real para el EA constituye el caso de estudio a abordar en este trabajo.

En procesos de selección de aeronaves, la toma de decisión es una actividad intelectual que resulta necesario e imprescindible afrontar. Antes de adoptar cualquier decisión, los hechos, el conocimiento y la experiencia se deben reunir para evaluar el contexto del problema y, aunque a nivel español, el Estado Mayor del Aire y el Mando del Apoyo Logístico de este ejército son los principales órganos decisores, resulta aconsejable realizar una evaluación preliminar que tenga en cuenta los criterios técnicos más significativos y refleje, además, la experiencia de grupos de asesoramiento tan importantes como son los pilotos de transporte del Ejército del Aire español. En este tipo de procesos de toma de decisiones preliminares no existe un único criterio de decisión sino, más bien, habrá que considerar un número elevado de criterios que influyen en la decisión (Wang & Chang, 2007), constituyendo por tanto un claro ejemplo de problema de decisión multi-criterio.

Además, es de destacar que no todos los criterios de decisión presentan la misma naturaleza ya que, por un lado, intervienen criterios cuantitativos (velocidad de crucero, peso máximo, potencia, etc.) y, por otro criterios de naturaleza cualitativa (ergonomía y comodidad de la tripulación, capacidad táctica, compatibilidad de medios, etc.) por lo que

para su resolución, no sólo será recomendable aplicar metodologías de decisión multicriterio (MCDM) ampliamente extendidas en la actualidad como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1980) o el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) (Hwang & Yoon, 1981), sino que éstos deberán combinarse con lógica difusa (Klir, 1995) con la finalidad de poder llevar a cabo la extracción del conocimiento y resolver el problema planteado. En el ámbito militar son numerosos los estudios en los que se han aplicado estas técnicas (Araújo Costa et al., 2022) y el Ejército del Aire español no es una excepción (Sánchez-Lozano, Serna & Dolón Payán, 2015; Sánchez-Lozano & Rodríguez; 2020; Sánchez-Lozano, Correa-Rubio & Fernández-Martínez, 2022).

El presente estudio se estructura de la forma siguiente: en la sección 2 se describirá la metodología utilizada para obtener los pesos o coeficientes de importancia de los criterios y la evaluación de las alternativas. En la sección 3 se planteará y resolverá el caso de estudio propuesto discutiendo y mostrando los resultados obtenidos. Con el objetivo de verificar la robustez de las metodologías aplicadas se efectuará un análisis de sensibilidad (sección 4) y, finalmente, en la sección 5 se indicarán las conclusiones extraídas así como posibles líneas de investigación futuras.

2. Metodología

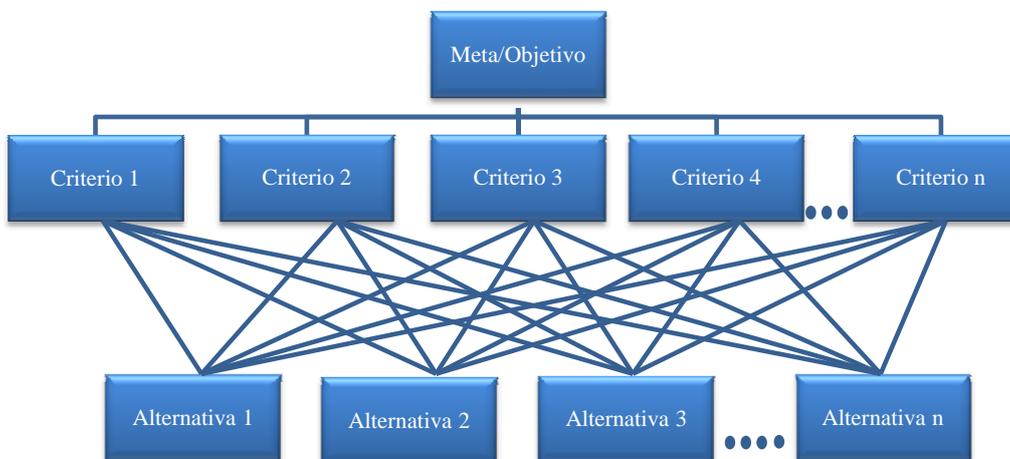
En infinidad de ocasiones y de manera inconsciente a consecuencia de la cotidianidad de sus actos, el ser humano se encuentra ante la necesidad de tener que responder cuestiones prácticamente a diario en las que debe seleccionar, de entre varias alternativas, aquella que considere que es la mejor opción. Un problema de decisión surge cuando, para dar respuesta a una situación planteada, existen dos o más alternativas entre las que, de manera individual o colectiva, es necesario escoger una de ellas o al menos indicar una serie de preferencias.

En la mayoría de las ocasiones, el decisor no es capaz de definir la importancia de los criterios de una forma estricta. La teoría de los conjuntos difusos permite definir este tipo de problemas, difíciles de acotar con precisión. Dicha teoría fue planteada por el matemático Lofti A. Zadeh para el que no todos los valores se encuadraban bajo una lógica clásica de dos valores, sino dentro de una lógica de verdades difusas (Zadeh, 1965, 1975). Estas constituyen un conjunto de conceptos sin fronteras nítidamente definidas y que no poseen unas características binarias, como ser alto o bajo, rápido o lento, etc. Así pues, Zadeh definió los subconjuntos difusos de un espacio como aplicaciones en referencia a ese espacio, de manera que estas representasen mediante un número el grado de pertenencia al subconjunto difuso. Cuanto más se acerque la aplicación al número 1 mayor será el grado de pertenencia al subconjunto, mientras que cuanto más se acerque al 0 menor será el grado de membresía. Dentro de las distintas funciones de membresía o pertenencia destaca por su sencillez de cálculo, las funciones de pertenencia triangular basadas en números difusos triangulares. Según Vaziri & Beheshtinia (2016) este tipo de números son fáciles de utilizar, fáciles de calcular y fáciles de comprender. Por ello, en el presente estudio se recurrirá al empleo de la lógica difusa mediante números difusos triangulares.

2.1. El proceso AHP

Las principales características del proceso AHP (Saaty, 1980) se fundamentan en: 1) Modelar el problema de decisión mediante una jerarquía (Figura 1) en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema y, en la base se sitúan las posibles alternativas a evaluar, 2) Establecer una comparación por pares de elementos en cada nivel de la jerarquía con respecto a cada criterio en el nivel anterior y, 3) Sintetizar verticalmente los juicios sobre diferentes niveles de la jerarquía.

Figura 1. Jerarquía proceso AHP.



Los juicios proporcionados por el decisor sobre los pares criterios (C_i, C_j) están representados en una matriz C de dimensiones $n \times n$ de forma que el valor de C_{12} es una aproximación de la importancia relativa de C_1 a C_2 , es decir, $C_{12} \approx (w_1 / w_2)$, así que, se afirma lo siguiente:

1. $c_{ij} \approx (w_i / w_j)$ $i, j = 1, 2, \dots, n$
2. $c_{ii} = 1, i=1, 2, \dots, n$
3. Si $c_{ij} = \alpha, \alpha \neq 0$, entonces $a_{ji} = 1/\alpha, i=1, 2, \dots, n$
4. Si C_i es más importante que C_j entonces $c_{ij} (w_i / w_j) > 1$

Esto implica que C debe ser positiva y recíproca con 1 en la diagonal principal. Los valores asignados a c_{ij} según la escala de Saaty estarán situados en el intervalo de 1-9 o sus inversos. En el caso de recurrir al empleo de números difusos, dicha escala tendrá la forma mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala fundamental de comparación pareada

Juicios de valor de preferencias entre el criterio i y el criterio j	Números difusos
C_i es igualmente importante que C_j	[1, 1, 1]
C_i es ligeramente más/menos importante que C_j	[2, 3, 4]
C_i es fuertemente más/menos importante que C_j	[4, 5, 6]
C_i es fuertemente mucho más/menos importante que C_j	[6, 7, 8]
C_i es extremadamente más/menos importante que C_j	[8, 9, 9]

Dicha metodología permite analizar la consistencia de los juicios emitidos por el sistema de expertos a través del denominado ratio de consistencia de forma que, si éste es inferior al 105 % se consideran válidos los juicios emitidos por el grupo de expertos, y por ende consistentes.

De igual modo, en los problemas basados en la versión difusa de la metodología AHP, donde los valores son números difusos triangulares, en lugar de utilizar λ como estimador del peso, se utilizará la media geométrica normalizada, expresada de la forma siguiente:

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}))^{1/n}}{\sum_{i=1}^m (\prod_{j=1}^n (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}))^{1/n}} \quad (1)$$

donde (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) es un número difuso triangular.

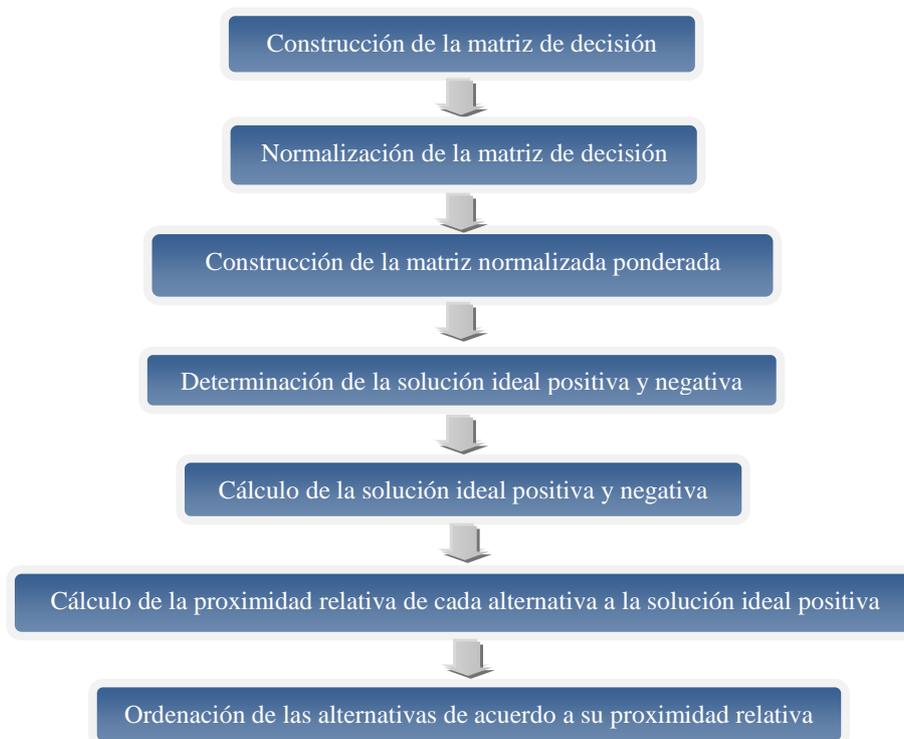
El proceso AHP será utilizado en el presente estudio para obtener los pesos de los criterios.

2.2. El método TOPSIS

El método TOPSIS desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, nos introduce en el concepto de “alternativa ideal”, definida como aquella solución que presenta, por un lado, la distancia más próxima a la solución ideal positiva (PIS – Positive Ideal Solution), y por otro, la distancia más lejana a la solución ideal negativa (NIS).

En este sentido, asumimos que la técnica TOPSIS encara el dilema de trabajar a la par, con una combinación de soluciones ideal y anti-ideal para cada uno de los criterios seleccionados, sobre las cuales el resto de las alternativas se comparan. La metodología integra una lógica sólida, que representa el propio razonamiento del ser humano ante la visualización única de las alternativas en un poliedro, e integrado bajo un valor escalar que representa lo mejor y lo peor de dichas alternativas de forma simultánea. Para la resolución del problema propuesto en este estudio, y dado que confluyen criterios de naturaleza cuantitativa y cualitativa, se recurrirá a la versión difusa del método TOPSIS. Por tanto, las etapas del algoritmo TOPSIS se abordarán empleando números difusos triangulares mediante sus operaciones correspondientes (García-Cascales, Lamata, & Sánchez-Lozano, 2021). A continuación se muestran las etapas o fases del algoritmo TOPSIS (Figura 2).

Figura 2. Etapas del algoritmo TOPSIS



Dado que en este estudio se recurrirá a la versión difusa de la metodología TOPSIS, se abordarán cada una de las etapas de dicho algoritmo mediante números difusos triangulares. Es por ello por lo que resulta necesario realizar un proceso de defuzzificación con carácter previo a la ordenación de las alternativas. En este estudio se utilizará el proceso desarrollado por García-Cascales & Lamata (2007), el cual se resume con la siguiente expresión:

$$I_{1/3,1/2}(R_i) = \frac{1}{3} \frac{a_i + 4b_i + c_i}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

donde (a_i, b_i, c_i) corresponde con el valor R_i expresado mediante números difusos triangulares. Dicho coeficiente $(I_{1/3,1/2}(R_i))$ estará situado en el intervalo $(0,1)$ de forma que, cuanto más se aproxime a la unidad, mayor prioridad tendrá la alternativa sometida a evaluación. En el caso de estudio el cual será detallado en la sección posterior, las alternativas cuyos valores sean próximos a la unidad corresponderán con las mejores aeronaves multi-rol para misiones militares de transporte.

3. Caso de estudio

3.1 Descripción del problema de decisión y definición de alternativas y criterios

Una vez se ha abordado en la sección anterior la metodología que se va a seguir en la selección de la mejor opción como aeronave de transporte multi-rol cabe presentar las distintas alternativas propuestas y los criterios a partir de los cuales se van a evaluar.

Para definir las alternativas se han tenido en cuenta criterios de diversidad (en cuanto al rol propio de la aeronave, nacionalidad o características) dentro de la idoneidad (adecuación de las capacidades tácticas y logísticas, performances, modernidad) inherente a la elección. De cara a preservar la fiabilidad de este estudio se han tenido en cuenta solo aquellas aeronaves de las que se disponen de datos contrastados y fiables, motivo por el cual se han descartado algunos modelos de aeronaves civiles sin información en el ámbito militar u otras de nacionalidades con información reservada.

Alternativa A1.- Alenia C-27J Spartan next generation: El Spartan, o también conocido como Hércules mini por sus similitudes en motor y fuselaje, pero reducida longitud, es un avión turbohélice de construcción italiana conocido por sus altas capacidades tácticas y versatilidad.

Alternativa A2.- Casa C-295: Postulado por su creador, Airbus, como el avión de transporte táctico más versátil y eficiente de su sector, el 295 cuenta ya con 20 años de historia y más que sobradas experiencias en las que ha sido puesto a prueba y comprobado, como son las misiones internacionales en las que participa el EA.

Alternativa A3.- Xian MA60: De características similares a los dos anteriores (mismos motores que el C295), la aeronave china es uno de los turbohélice más comercializados de oriente en su sector. Fabricado por la empresa china Xi'An Aircraft Industrial Corporation, la aeronave cuenta también con múltiples variantes que le permiten abarcar desde la operación civil hasta la totalidad de las militares, con sus diferentes versiones.

Alternativa A4.- Ilyushin Il-112: El proyecto de este avión ruso nace para sustituir a los viejos modelos de transporte de la URSS aún en servicio. Pese a su mayor longitud es solo capaz de transportar la mitad de carga que el C-295. Esa desventaja le confiere otras características tácticas interesantes como su facilidad para operar en pistas cortas y sin preparar.

Alternativa A5.- AN-132: Esta aeronave es la apuesta de la empresa ucraniana por la aviación de transporte ligera y media. Con una carga superior a la del Spartan y a la del C-295 se presenta también como una alternativa versátil (con capacidad para los mismos roles que las anteriores aeronaves) y económica (tan solo 2 millones de dólares estadounidenses más costoso que el avión de Airbus). Además, integra otra serie de ventajas, como son sus performances o su modernizada aviónica.

Una vez identificadas las alternativas a evaluar, es necesario definir los criterios que influyen en la evaluación de dichas alternativas. Estos fueron consensuados y consultados con expertos procedentes de Airbus y pilotos de transporte del EA, que los remarcaron como los más relevantes para un estudio general de una aeronave multi-rol. La evaluación ha abarcado criterios que valoran las alternativas más allá únicamente de sus capacidades tácticas, pero que son igual de importantes, como son el coste de la aeronave o su compatibilidad con otros medios del EA, que, sin influir directamente en la adecuación de la aeronave para realizar misiones multipropósito, son de vital importancia a la hora de valorar su adquisición. Otros, como la ergonomía de la tripulación, se hacen esenciales en su operación del día a día. A continuación se enumeran brevemente tales criterios:

Criterio C1.- Techo de servicio (ft.): Es la máxima altitud a la que una aeronave puede operar dentro de unos márgenes de seguridad. En este estudio este parámetro es un criterio cuantitativo a maximizar.

Criterio C2.- Autonomía (Nautical Miles, NM): Este criterio está relacionado con la capacidad de la aeronave para permanecer el máximo tiempo en el aire. También será un criterio cuantitativo a maximizar.

Criterio C3.- Potencia (Horse Power, HP): La potencia de la aeronave vendrá definida por las potencias conjuntas de sus motores. Nuevamente, este parámetro tendrá una naturaleza cuantitativa y deberá ser maximizado.

Criterio C4.- Peso máximo al despegue (kg.): el MTOW (Maximum take-off weight) se define como el peso máximo al despegue de una aeronave, contando con la carga de esta, el combustible necesario para el vuelo, los sistemas del avión, etc. En este estudio, el peso de despegue deberá ser maximizado.

Criterio C5.- Velocidad de crucero (kts): Es uno de los factores más críticos de la aeronave ya que además de a la propia velocidad de la aeronave también afectará al consumo de esta, y con ello a las características que de ello dependen, alcance, carga, etc. Parámetro, la velocidad de crucero, cuantitativo a maximizar.

Criterio C6.- Capacidad táctica: Este factor se define como el tipo de operación que pueda llevar a cabo una aeronave, sobre todo en las fases relativas al despegue y al aterrizaje, que es cuando más expuesta va a estar frente amenazas. En este caso, la naturaleza de este criterio es cualitativa y también deberá ser máximo.

Criterio C7.- Ergonomía y comodidad de la tripulación: Esta característica, aunque ajena al propósito múltiple de la aeronave, podría ser decisiva por el uso prolongado de esta ya que, en el EA, este tipo de aeronaves pueden desempeñar misiones de incluso once horas de duración. La tendencia en los estudios modernos señala cada vez más al factor humano como la causa de la mayoría de accidentes aéreos, y una de las razones a las que se pueden deber es la ergonomía de la tripulación (Arcúrio, Nakamura, & Armborst, 2018). Al igual que el anterior, este criterio también es de naturaleza cualitativa y deberá ser maximizado.

Criterio C8.- Compatibilidad medios EA: Uno de los valores que más coste supone en la sociedad actual y más difíciles de transmitir es el conocido como know-how, o saber hacer, cuya importancia es máxima en la manipulación y mantenimiento de aeronaves, ya que este

conocimiento debe ser transferido de forma práctica, además de teórica. En el caso del C-295 por ejemplo, el cual se encuentra encuadrado en el EA desde el año 2000, aparte de este conocimiento adquirido, se dispone ya de los materiales adecuados para su mantenimiento como son los hangares propios y herramientas. Este parámetro es un criterio cualitativo que se buscará maximizar por ende.

Criterio C9.- Coste de la aeronave (millones de dólares americanos): Se trata del coste de fabricación de cada una de las cinco alternativas en millones de dólares americanos (USD). Es por tanto un criterio cuantitativo que se busca minimizar.

3.2 Obtención del peso o coeficiente de importancia de los criterios

El listado de criterios indicado en la sección anterior está compuesto por 6 criterios cuantitativos (C1-C5 y C9) y 3 criterios cualitativos (C6-C8); éstos constituyen la totalidad de criterios del problema de decisión propuesto. La extracción del conocimiento para la obtención de los pesos de los criterios se lleva a cabo mediante un grupo de 7 expertos (pilotos de transporte del EA) a través de un cuestionario basado en la aplicación de la metodología AHP. Para ello, mediante el uso de la escala de valoración indicada en la Tabla 1 del proceso de comparación por pares, la aplicación del método AHP, junto con la media geométrica normalizada y la agregación homogénea a través de la media aritmética (para tener en cuenta la totalidad de expertos), se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2. Pesos o coeficientes de importancia de los criterios

Criterios	Números difusos triangulares	Orden de prioridad	Pesos (%)
C1	(0.048, 0.092, 0.188)	4	9,2
C2	(0.053, 0.103, 0.208)	3	10,3
C3	(0.113, 0.187, 0.294)	2	18,7
C4	(0.048, 0.090, 0.179)	5	9,0
C5	(0.038, 0.070, 0.126)	6	7,0
C6	(0.191, 0.319, 0.507)	1	31,9
C7	(0.026, 0.042, 0.071)	9	4,2
C8	(0.029, 0.049, 0.085)	7	4,9
C9	(0.028, 0.048, 0.082)	8	4,8

Por tanto, se puede concluir una vez aplicada la versión difusa del método AHP y en base a la opinión de los expertos, que a la hora de evaluar las capacidades de una aeronave militar de transporte multi-rol el criterio más importante es C6, su capacidad táctica (entendida desde el punto de vista militar en el que es posible que se presenten amenazas en algún punto de la misión). A continuación, C3, la potencia de la aeronave, para seguir con su autonomía (C2), el techo de servicio (C1), su peso máximo al despegue (C4), la velocidad de crucero (C5) y, por último, con mucho menor orden de importancia, los criterios de compatibilidad con los medios del EA (C8), coste de la aeronave (C9) y la ergonomía y comodidad de la tripulación (C7).

3.3 Proceso de evaluación de alternativas

Una vez obtenidos los pesos de los criterios es posible abordar la segunda etapa del estudio, consistente en la evaluación de las alternativas (aeronaves de transporte multi-rol) aplicando la versión difusa de la metodología TOPSIS. Los valores para cada alternativa de los criterios cuantitativos, junto con las valoraciones de los criterios cualitativos definidas a través de etiquetas lingüísticas asociadas a números difusos triangulares (Tabla 3) constituyen la matriz de decisión del problema planteado (Tabla 4). En dicha matriz, las valoraciones de los criterios cuantitativos (criterios C1-C5 y C9) se representan como una terna de valores con el mismo valor es decir, si a es el valor de un criterio para una alternativa dada, éste será representado como la terna (a, a, a) . Los valores de los criterios cualitativos (criterios C6-C8) corresponden con la media aritmética de las valoraciones realizadas por cada uno de los 7 expertos, empleando para ello las etiquetas lingüísticas mencionadas.

Tabla 3. Etiquetas lingüísticas asociadas a números difusos triangulares

Descripción	Número difuso triangular
Pésima	(0, 1, 3)
Mala	(1, 3, 5)
Aceptable	(3, 5, 7)
Buena	(5, 7, 9)
Muy buena	(7, 9, 10)

Tabla 4. Matriz de decisión de alternativas y criterios

Alternativas	Criterios											
	C1			C2			C3			C4		
A1	30000	30000	30000	3160	3160	3160	9274	9274	9274	31800	31800	31800
A2	25000	25000	25000	1920	1920	1920	5290	5290	5290	23200	23200	23200
A3	25000	25000	25000	864	864	864	5500	5500	5500	21800	21800	21800
A4	25000	25000	25000	1830	1830	1830	5600	5600	5600	21000	21000	21000
A5	27000	27000	27000	1930	1930	1930	10142	10142	10142	31500	31500	31500

Alternativas	Criterios														
	C5			C6			C7			C8			C9		
A1	325	325	325	4,6	6,4	8,3	4,1	6,1	8,1	3,0	5,0	7,0	38	38	38
A2	259	259	259	7,0	9,0	10	4,7	6,7	8,7	7,0	9,0	10	22,8	22,8	22,8
A3	232	232	232	2,4	4,4	6,4	2,4	4,4	6,4	1,3	3,3	5,3	18	18	18
A4	243	243	243	3,0	5,0	7,0	4,7	6,7	8,4	1,3	3,3	5,3	40	40	40
A5	297	297	297	3,9	5,9	7,9	4,7	6,7	8,4	1,0	3,0	5,0	35	35	35

3.4. Resultados y discusión

La versión difusa de la metodología TOPSIS proporciona una ordenación de las alternativas de acuerdo a su proximidad relativa a la solución ideal (Figura 3) de forma que, a través de un proceso de defuzzificación que transforme los números difusos en valores reales (expresión 2), es posible ordenar y obtener un ranking de alternativas (Tabla 5).

Figura 3. Clasificación de alternativas mediante números difusos triangulares

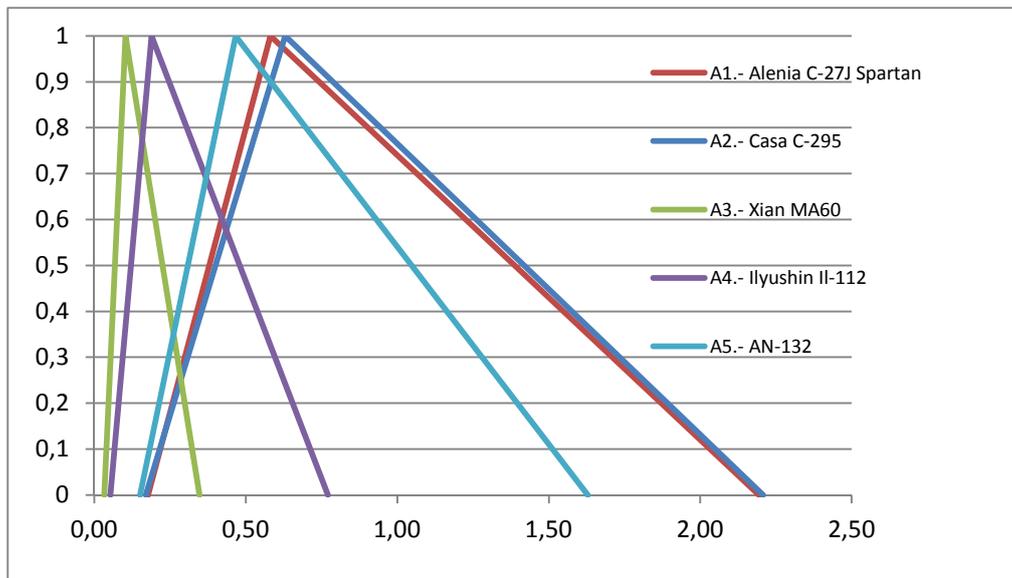


Tabla 5. Ranking de alternativas mediante versión difusa de la metodología TOPSIS

Alternativas	Números difusos			Valores reales	Ranking
	R_i	$I_{1/3,1/2}(R_i)$			
A1.- Alenia C-27J Spartan	0,18	0,58	2,19	0,782	2°
A2.- Casa C-295	0,17	0,63	2,21	0,816	1°
A3.- Xian MA60	0,03	0,10	0,35	0,132	5°
A4.- Ilyushin Il-112	0,05	0,19	0,77	0,264	4°
A5.- AN-132	0,15	0,47	1,63	0,608	3°

Según se indicó en la sección de metodología, cuanto más se aproxime el valor de los coeficientes de proximidad defuzzificados a la unidad, mejor se presentará esa alternativa como opción, y por lo tanto será la mejor entre todas las alternativas evaluadas. En base a esto, la alternativa considerada como la mejor opción de aeronave multi-rol es el Casa C-295. Cabe destacar que la principal razón de ser de esta ordenación son las excepcionales capacidades cualitativas de la aeronave española, en concreto las tácticas, que pese a no presentarse como la alternativa con mejores performances en ninguno de los criterios objetivos, pudiéndose contrastar esta condición en la matriz de decisión, la alta estima de los expertos en sus cualidades subjetivas lo sitúan en esa posición.

Asimismo, resulta llamativa la posición de la segunda alternativa favorita, el Alenia C-27J Spartan, ocupa el segundo lugar según el ranking TOPSIS, distanciándose unas centésimas con respecto a la primera alternativa, confirmando así su escasa diferencia. Esto es debido en parte a que los criterios con mayor peso son los cuantitativos, en los que la aeronave italiana es significativamente superior a la española, siendo los criterios cualitativos y el

coste los que han decantado la balanza en favor del Casa C-295 aplicando la metodología TOPSIS.

Por otro lado, y en cuanto a la última posición en el ranking de la alternativa china, el Xian M60, esta se hace comprensible ya que según los expertos que han intervenido en el estudio, “El Xian M60 parece tener puntos muy débiles. La versión con puerta trasera de carga es una modificación del diseño original; eso siempre trae grandes problemas. Además, ya ha tenido varios accidentes graves debidos al fallo del tren de aterrizaje y su incompatibilidad con la mentalidad occidental también es un hándicap importante”.

4. Análisis de sensibilidad

La escasa diferencia observada en los valores de las proximidades relativas de las dos primeras alternativas a la solución ideal, ha implicado la necesidad de verificar la robustez de las metodologías utilizadas. Por ello, en esta sección se resolverá nuevamente el caso de estudio propuesto aplicando las versiones difusas de dos metodologías de toma de decisiones multi-criterio. Por un lado se aplicará el Modelo de Suma Ponderada o WSM (Fishburn, 1967), una de las técnicas multi-criterio más antiguas y probablemente más utilizadas; y por otro la metodología VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), técnica desarrollada por Opricovic & Tzen (2004) que, desde la pandemia COVID-19, ha aumentado su frecuencia de aplicación (Sotoudeh-Anvari, A. 2022).

Los nuevos rankings de alternativas (Tabla 6) demuestran cómo éstos pueden variar según la metodología de toma de decisiones aplicada. De acuerdo a la técnica WSM la alternativa considerada la mejor opción, según la metodología TOPSIS, ha pasado a ser la segunda, intercambiándose el orden entre las dos primeras. De hecho, la metodología VIKOR no sólo confirma la primera posición de la alternativa A1 (Alenia C-27J Spartan) extraída de la técnica WSM, sino que incluso la alternativa situada en primer lugar según la metodología TOPSIS (A2.- Casa C-295) ha pasado a ocupar la tercera posición. También es de resaltar como las dos últimas alternativas no han cambiado de posición, con independencia de la metodología aplicada.

Tabla 6. Análisis comparativo de metodologías de toma de decisiones multi-criterio

Alternativas	Modelo de Suma Ponderada WSM		Metodología VIKOR	
	Proximidad relativa $I_{1/3,1/2}(R_i)$	Ranking	Proximidad relativa Q_i	Ranking
A1.- Alenia C-27J Spartan	0,579	1	0,020	1
A2.- Casa C-295	0,539	2	0,158	3
A3.- Xian MA60	0,365	5	0,301	5
A4.- Ilyushin Il-112	0,427	4	0,292	4
A5.- AN-132	0,526	3	0,096	2

Aunque este análisis de sensibilidad no ha podido corroborar la efectividad y robustez de ninguna de las técnicas de decisión multi-criterio aplicadas, sí que ha permitido descartar dos alternativas (A3.- Xian MA60 y A4.- Ilyushin Il-112) cuyos valores en comparación con el resto están claramente distanciados. Por tanto se confirma la existencia de un grupo de tres alternativas que debería de analizarse con mayor profundidad y detalle.

5. Conclusiones

La metodología aplicada al caso de estudio arroja resultados muy interesantes en un problema de decisión real de interés para el Ejército del Aire español: La selección de una aeronave de transporte multi-rol. Aunque no ha sido posible dilucidar cuál es la mejor alternativa, existen tres candidatas que deberían analizarse con mayor profundidad: La alternativa italiana (Alenia C-27J Spartan) presenta unas características sobresalientes en la mayoría de los criterios de naturaleza cuantitativa. La alternativa española (Casa C-295), en cambio, tiene una elevada consideración en aquellos criterios de naturaleza cualitativa. Entre estas dos alternativas ha surgido una tercera candidata como la del fabricante ucraniano (AN-132) que resulta interesante tener en consideración en estudios posteriores.

Las versiones difusas de las metodologías de toma de decisiones multi-criterio aplicadas en el estudio han permitido abordar esta difícil decisión desde otra perspectiva, en la que se han tenido en cuenta no solo los puntos de vista militar y de necesidades operativas, sino también el plano político, económico o las opiniones de expertos para la evaluación de las alternativas a partir de los criterios más significativos. En base a la metodología AHP y a un grupo de asesoramiento compuesto por expertos en este ámbito, los criterios más relevantes son la Capacidad táctica del avión (C6) seguida por su Potencia (C3), su Autonomía (C2) y el Techo de servicio (C1), contrariamente a lo que se creía en un principio, que se esperaba que la característica más relevante de una aeronave de transporte fuese su peso máximo al despegue (C4), que es la razón de ser de este sector.

Por último, y en vistas a un trabajo futuro; dados los resultados extraídos del análisis de sensibilidad realizado, se sugiere contar tanto con el asesoramiento de las distintas industrias aeronáuticas como de los naciones contratantes con vistas a generar alianzas para la concesión de los objetivos. De esta forma se podrá profundizar en el problema de decisión asegurando tanto la innovación como la exactitud y el compromiso de los resultados. Un claro ejemplo de ello es el coste de las aeronaves; este puede variar en función del número que se adquieran, o de la configuración escogida por las naciones contratantes.

Bibliografía

- Araújo Costa, I. P., Araújo Costa, A. P., Manzollilo Sanseverino, A., Simoes Gomes, C. F., & dos Santos, M. (2022). Bibliometric studies on multi-criteria decision analysis (MCDA) methods applied in military problems. *Pesquisa Operacional*, 42, 1-26
- Arcúrio, M. S. F., Nakamura, E. S., & Armborst, T. (2018). Human Factors and Errors in Security Aviation: An Ergonomic Perspective, *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 5173253.
- Delgado Morán, J., Jiménez Reina, J., & Jiménez, R. (2019). Military Air Transport in Modern Military Operations. *Ciencia y poder aéreo*, 14 (1), 114-147.
- Ejército del Aire. (n.d.). Ejército del Aire. Obtenido el 7 de abril de 2022, desde <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/aeronaves/avion/>
- Fishburn, P. C. (1967). *Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments*, Operations Research Society of America (ORSA), Baltimore, MD, USA.
- García-Cascales. M. S. Lamata, M. T. & Sánchez-Lozano, J. M. (2012). Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process. *Annals of Operations Research*, 199, 373–391.

Gómez de Ágreda, A. (2009). Transporte estratégico en la OTAN: opciones de futuro, *Boletín de información*, 32, 27-48.

Hwang, C.L.; Yoon, K. *Multiple attribute decision methods and applications*. Springer, Berlin, Germany, 1981.

Klir, G.J.; Yuan, B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1995.

Maíz Sanz, J. (2020) Los incombustibles Aviocar del Ejército del Aire necesitan un plan de renovación. Obtenido el 16 de septiembre de 2020 desde <https://www.defensa.com/espana/incombustibles-aviocar-ejercito-aire-necesitan-plan-renovacion>

Navarro García, J. M. (2021). defensa.com. Obtenido el 6 de abril de 2022 desde <https://www.defensa.com/espana/espana-sigue-buscando-reemplazo-para-p-3-cn-235-vigma-tras-otan>

Opricovic, S., & Tzeng, G.H. (2004). The compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445–55.

Saaty, T.L. *The analytic hierarchy process*. McGraw Hill, New-York, USA, 1980.

Sánchez-Lozano, J.M., Serna, J., & Dolón-Payán, A. (2015). Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. a case study in the Spanish Air Force Academy. *Aerospace Science & Technology*, 42, 58–65.

Sánchez-Lozano, J.M., & Rodríguez, O.N., (2020). Application of fuzzy reference ideal method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing*, 88, 106061.

Sánchez-Lozano, J. M., Correa-Rubio, J. C., & Fernández-Martínez, M. (2022). A double fuzzy multi-criteria analysis to evaluate international high-performance aircrafts for defense purposes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115, 105339.

Sotoudeh-Anvari, A. (2022). The applications of MCDM methods in COVID-19 pandemic: A state of the art review. *Applied Soft Computing*, 126, 109238

Vaziri, J., & Beheshtinia, M. A. (2016). A holistic fuzzy approach to create competitive advantage via quality management in services industry (case study: lifeinsurance services). *Management decision*, 54(8), 2035-2062.

Wang ,T.C., & Chang, T.H. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications* 2007, 33, 870–880

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.

Zadeh, L.A. (1975). The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8 (3), 199-249.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

