

Ayuda a la decisión sobre adquisiciones de defensa: estructuración de problemas multicriterio con el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

Support for defense procurement decision: structuring multi-criteria problems using the Analytic Hierarchy Process (AHP)

Resumen: La adquisición de productos, sistemas y sus componentes de defensa presenta características que hacen que la investigación operativa sea especialmente útil para los problemas en la selección de material para las Fuerzas Armadas, incluyendo la teoría de ayuda a la decisión multicriterio. El problema de las adquisiciones de defensa se ajusta a esta metodología, ya que implica el uso de criterios de decisión para una selección más adecuada entre un conjunto finito de productos de defensa, puesto que la alta tecnología y los grandes recursos necesarios para la fabricación de estos sistemas hacen que el mercado de la industria de defensa esté restringido a algunos pocos desarrolladores y proveedores. Un método multicriterio ampliamente utilizado en el sector de defensa es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), principalmente debido a su simplicidad de validar las evaluaciones de los especialistas. Aquí se detallan las ecuaciones para el cálculo del AHP, pudiéndose implementar en diferentes *softwares*, incluyendo Excel, R y Python, entre otros. La aplicación simulada mostró la forma de recolección de datos y la secuencia de cálculos del AHP para un problema de selección de tres aeronaves, evaluadas bajo seis criterios, indicando el orden de preferencia de acuerdo con un especialista.

Palabras clave: adquisición de defensa; ayuda a la decisión multicriterio; AHP.

Abstract: The procurement of products, systems and their defense components presents characteristics that make operational research particularly useful for solving problems about choosing materials for the Armed Forces, including the multi-criteria decision support theory. The problem about defense procurement fits this methodology, as it involves the use of decision criteria for the most satisfactory choice among a finite set of defense products, since the high technology and the large resources required for the production of these systems make the defense market restricted to a few developers and manufacturers. A multi-criteria method widely used in the defense industry is the Analytic Hierarchy Process (AHP), mainly due to its simplicity of validating expert's evaluations. The AHP calculation equations are described here and can be implemented in different pieces of software, including Excel, R, and Python, among others. A simulated application presented how data were collected and the sequence of AHP calculations for a problem about choosing three aircraft, evaluated under six criteria, indicating an expert's order of preference.

Keywords: defense procurement; support for multi-criteria decision; AHP.

Luiz Octávio Gavião 

Escola Superior de Guerra (ESG).
Programa de Pós-Graduação em Segurança
Internacional e Defesa.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
luiz.gaviao67@gmail.com

Sergio Kostin 

Escola Superior de Guerra (ESG).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
sfkostin@gmail.com

Recibido: 9 mar. 2023

Aprobado: 17 abr. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



1 INTRODUCCIÓN

La adquisición de productos, sistemas y sus componentes de defensa implica análisis complejos y multidimensionales, en los que es necesario evaluar varios factores técnicos, por ejemplo, la modernización de la capacidad militar del arsenal de defensa que se encuentra obsoleta (CORRÊA, 2020; VIANELLO; MARTINS, 2019); los costes del ciclo de vida de las posibles soluciones (SOUSA *et al.*, 2021); la capacidad de mantenimiento y actualización de los sistemas del país (NEGRETE; SOUSA, 2018; PACHECO; PEDONE, 2016); entre otros. La presencia de estos diferentes criterios de evaluación y un conjunto finito de posibles soluciones para cubrir las necesidades de las Fuerzas Armadas sugiere el uso de metodologías específicas de ayuda a la toma de decisiones, capaces de ofrecer un resultado técnico y positivo.

En general, el proceso de selección de productos, sistemas y sus componentes de defensa, que se ajusten a las necesidades de las Fuerzas Armadas, puede ser auxiliado por métodos de investigación operativa, que pretenden apoyar la toma de decisiones. Los modelos matemáticos producen resultados que dan más objetividad al proceso, proporcionando un cierto aislamiento de otros aspectos, que también pesan en la toma de decisiones, como aquellas de carácter político (KRUGER; VERHOEF; PREISER, 2019).

En cierto modo, es posible considerar que el portafolio del segmento de defensa es limitado, en cuanto a las opciones disponibles en el mercado de adquisiciones *off-the-shelf* (productos listos para usar) o incluso para la generación de proyectos de investigación y desarrollo (I+D). Este sector industrial depende cada vez más de la alta tecnología, por lo tanto, para mantenerse a la vanguardia, se necesitan recursos humanos competentes y valores financieros restringidos a unos pocos países que la desarrollan y fabrican en el mundo (ABREU, 2015). Así, para hacer frente a este conjunto finito de posibles soluciones al problema, la investigación operativa proporciona metodologías, denominadas genéricamente, como métodos de ayuda a la decisión multicriterio (MCDA – *Multicriteria Decision Aid*) (ALMEIDA, 2013).

Los métodos MCDA buscan una solución apropiada al problema, en lugar de una óptima solución, debido a que un conjunto finito de posibles soluciones difícilmente incluye una que muestre el mejor desempeño en todos los criterios de la decisión. Si una solución con estas características está presente en el conjunto de posibles soluciones, no habría necesidad de modelar el problema, ya que la mejor respuesta ya sería evidente para los tomadores de decisiones. Normalmente, las posibles alternativas al problema tienen comportamientos irregulares a lo largo de los criterios, funcionando unas veces como la mejor, otras siendo la peor y en algunos casos como una opción intermedia, con relación a otras posibilidades. En estas condiciones, no tenemos una solución óptima, sino alternativas más adecuadas o aceptables que otras (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Este artículo trata de la estructuración de los elementos esenciales de los métodos MCDA en problemas relacionados con la adquisición de productos de defensa, sus sistemas o componentes. También se presenta una aplicación práctica del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), principalmente porque es considerado ampliamente en problemas de adquisiciones de defensa (BELL; HOLODNIY; PAVLIN, 2016; BROWNE, 2018; CHO *et al.*, 2022; GAVIÃO *et al.*, 2020; GAVIÃO; DUTRA; KOSTIN, 2021; STERN; GROGAN, 2022).

El AHP muestra una lógica sencilla e intuitiva, ya que explora una escala específica para las evaluaciones y tiene un instrumento para la validación de los resultados, lo que da credibilidad y fiabilidad al proceso. Este método fue propuesto por Thomas Saaty, a principios de la década de 1970, y cuenta con un vasto respaldo de la bibliografía científica, con aplicaciones en las más variadas áreas del conocimiento (SAATY, 1972; YU *et al.*, 2021).

2 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELADO DE LA MCDA

Modelar problemas con métodos de MCDA implica tres tareas esenciales: seleccionar alternativas al problema, elegir los criterios de decisión y evaluar el desempeño de cada opción referente a los criterios seleccionados. Estos tres elementos configuran la denominada matriz de decisión del problema. Posteriormente, esta matriz de decisión necesita ser sometida a algún modelo matemático para inducir el resultado esperado, y que puede ser el orden de preferencia del conjunto finito de soluciones o la clasificación de soluciones en *clusters*, entre otros (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2012).

En las adquisiciones de defensa, estos elementos esenciales deben plantearse y evaluarse de acuerdo con los escenarios de ejecución de las Fuerzas Armadas (KRESS; MORGAN, 2018). La prospección de entornos no se analiza en este artículo, sin embargo, es una parte importante del proceso de selección de productos, sistemas y componentes de defensa. El portafolio de artículos de defensa a disposición de las Fuerzas Armadas debe permitir su uso en situaciones de corto, medio y largo plazo. De hecho, es justo suponer que los contextos impactan en las evaluaciones de los especialistas sobre la matriz de decisión, siendo posible que el mismo criterio o alternativa tenga diferentes resultados dependiendo del contexto presentado.

2.1 Selección de alternativas al problema

Se debe plantear un conjunto finito de opciones aptas para resolver el problema. En la práctica, estas alternativas son productos de defensa, sus sistemas o componentes que estaban previstos para su adquisición, o incluso proyectos de I+D, para su construcción en astilleros, fábricas e instalaciones de consorcios constituidos para este propósito. En el sistema de modelado clásico se supone que las alternativas son diferentes y que componen todo el conjunto de decisiones, sin poder escoger una solución mixta, compuesta por la unión de alternativas o, por una parte, de ellas. Si el tomador de decisiones introduce una nueva alternativa, entonces, en principio, el proceso de análisis debe repetirse con el conjunto de opciones recién formado (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2012).

El conjunto de alternativas no debe ser trivial, por ejemplo, el conjunto con solo dos posibilidades en donde una claramente tiene la mejor ejecución. Por otro lado, el conjunto de alternativas debe tener un tamaño que pueda ser administrado, evitando la selección preliminar de decenas o cientos de opciones posibles. Una forma de reducir el tamaño del conjunto de alternativas es eliminar aquellas que son similares o que están claramente dominadas por otras. Esta dominancia se caracteriza por el mejor desempeño de una alternativa con respecto a otra en todos los criterios.

Entonces, en este caso, no tiene sentido proceder con el modelado y análisis de alguna alternativa menos cualificada, la cual debe ser excluida del conjunto inicial.

Las alternativas planteadas para el análisis también deben ser factibles, en el sentido de que sean viables desde el punto de vista financiero y logístico. Es necesario que el país, su industria de defensa y las Fuerzas Armadas puedan adquirir, operar, mantener y desechar el producto de defensa al final de su ciclo de vida. Esto requiere capacidad de gestión para estructurar la logística integrada de los nuevos productos y la aquiescencia de la sociedad para respaldar un presupuesto de defensa compatible con los costos del ciclo de vida de los nuevos medios. Hay productos que funcionan durante décadas, como algunos buques y submarinos, que requieren recursos masivos para mantenerlos modernizados y en actividad durante largos períodos de tiempo, siguiendo el estatus de renovación de otros sistemas. Estos aspectos necesitan ser considerados durante el estudio del conjunto de alternativas al problema.

2.2 Selección de los criterios de decisión

Los criterios son atributos o características especiales del problema que el tomador prefiere en su selección. En problemas referentes a la gestión es común utilizar criterios relacionados con el precio de compra, la calidad, la durabilidad del material, la apariencia del producto y ahorro en el mantenimiento, entre otros. Algunos criterios son esencialmente cuantitativos, siendo medidos por unidades numéricas y escalas (peso, dimensiones y costos), mientras que otros son de naturaleza cualitativa, siendo mensurados por escalas ordinales de preferencia, que toman en cuenta la percepción del evaluador, en lugar de resultados o el desempeño (calidad, apariencia y riesgo).

Según Roy (1985), una familia de criterios se considera coherente si cumple tres requisitos:

- Integridad: no se olvidó ninguno de los atributos determinantes para discriminar las alternativas. La utilización plena de los criterios más relevantes para la búsqueda de una solución al problema no permitiría, en teoría, la existencia de pares con opciones de igual importancia, de tal forma que el tomador de decisiones pueda afirmar, sin dudar, la relación de preferencia entre ellos.
- Consistencia: las preferencias finales del tomador de decisiones deben ser coherentes con las preferencias en cada criterio. Esto quiere decir que si “a” y “b” son dos alternativas entre las cuales el tomador de decisiones es indiferente, alcanzando, por ejemplo, la misma puntuación para cada criterio, entonces la mejora de “a” en un criterio y/o el deterioro de “b” en otro criterio implica, de hecho, que “a” debería ser la preferida con respecto a “b” para el tomador de decisiones.
- No redundante: dos criterios no deben ser similares, en el sentido de evaluar las mismas variables de desempeño. La existencia de dos o más criterios con esta característica desequilibra la toma de decisiones, ya que un atributo en común habrá sido considerado más de una vez en el resultado. Debe prestarse especial atención al uso de índices para los criterios, puesto que generalmente están compuestos por variables que pueden ser frecuentes en otros criterios. Una familia de criterios coherente que cumpla los requisi-

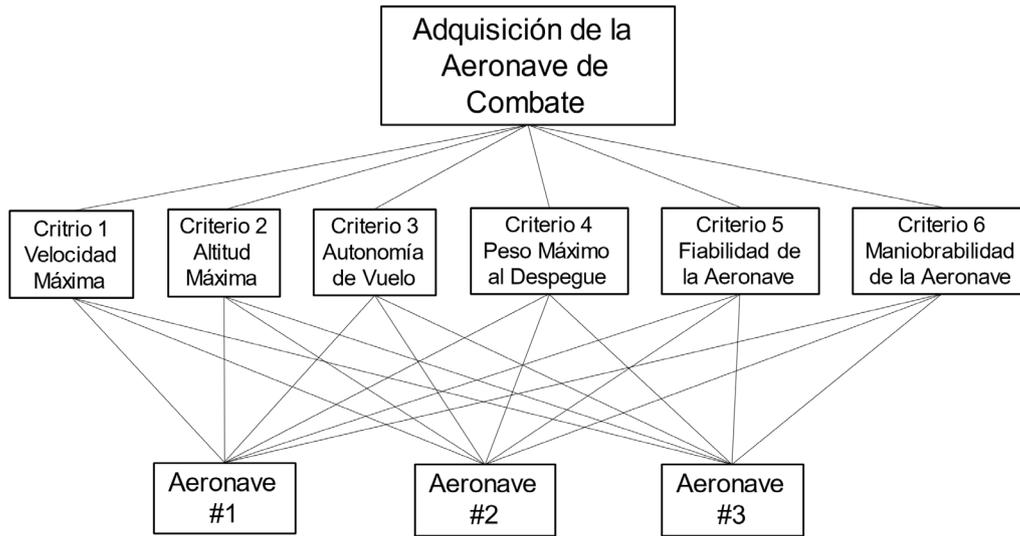
tos de integridad y consistencia no es redundante si la eliminación de un único criterio compromete el resto del conjunto precisamente en esos principios.

A la hora de modelar el problema, Pomerol y Barba-Romero (2012, p. 313) advierten que la integridad debe ser la exigencia prioritaria a la hora de elegir los criterios, ya que un tomador de decisiones racional, con experiencia y que comprende el problema, tiende a seleccionar los criterios que efectivamente deben ser considerados a la hora de designar la alternativa más eficaz. La integridad tiene un impacto positivo en los requisitos de consistencia y no redundancia en la familia de criterios. Esos autores también recomiendan que el modelado de MCDA evite un número elevado de criterios (mayor que siete), pero en caso de que fuese absolutamente necesario superar esta cifra, se debe construir una estructura jerárquica en los diferentes niveles de criterios y subcriterios. Este comentario refuerza la indicación del método AHP, que utiliza este tipo de estructura para buscar la solución más adecuada.

En los problemas relacionados con la adquisición de productos de defensa, se suelen analizar algunos criterios. Por ejemplo, el rendimiento operacional es fundamental para tener éxito en zonas de guerra, sea cual sea el entorno operativo. Para un sistema de armas, la precisión y la cadencia de tiro (la cantidad de proyectiles disparados por un arma por minuto) son condiciones esenciales. Otro conjunto de criterios importantes trata sobre la logística, que se manifiesta a través de las características de fiabilidad y mantenibilidad. La fiabilidad afecta a la preparación del sistema. Cuanto más fiables sean sus componentes, menos frecuentes serán los fallos por mal funcionamiento y la necesidad de realizar paradas para efectuar servicios de reparación, además de tener una reducción en los costes por causa de los repuestos. Este criterio es cuantitativo y suele medirse por el tiempo medio entre fallos (MTBF). La mantenibilidad es un atributo que representa la facilidad (o dificultad) en el mantenimiento del sistema. Un componente modular que permita el mantenimiento con ayuda de un sistema *plug-and-play* es más sustentable que otro que está interconectado por cables, o que exija desmontar todos aquellos componentes del sistema ubicados en la ruta del componente dañado. Al igual que la fiabilidad, la estructura de mantenimiento de un ítem se puede medir con la ayuda del tiempo de servicio de reparación y mantenimiento (KRESS; MORGAN, 2018).

Finalmente, también cabe destacar los criterios relacionados con los costes del ciclo de vida y los riesgos inherentes en los proyectos de I+D de un nuevo sistema. Los costos relacionados con futuros gastos en el funcionamiento y mantenimiento de los sistemas son más inciertos que los costos de I+D de un ítem en una etapa de desarrollo avanzado, o el precio de compra de un producto listo para ser usado. Hay estimaciones pesimistas de que los costos operativos y de soporte técnico pueden representar más del 80% de la cantidad necesaria para todo el ciclo de vida de un material de defensa (GAVIÃO *et al.*, 2018). El riesgo puede estar relacionado con retrasos en los cronogramas de desarrollo y producción, o incluso con el aumento de los costos planificados, superando el presupuesto previsto (KRESS; MORGAN, 2018).

En resumen, los ítems 2.1 y 2.2 muestran los elementos esenciales para modelar un problema de MCDA y, simultáneamente, construir la estructura jerárquica para emplear el AHP. La Figura 1 ilustra el árbol jerárquico utilizado por Ardil (2021) para seleccionar una aeronave de combate. A pesar de la preocupación del autor por evaluar aspectos esencialmente operacionales, esta estructura es suficiente para demostrar el empleo de la metodología AHP, incluso sin aplicar criterios de carácter logístico, de fiabilidad y mantenibilidad.

Figura 1 – Estructura jerárquica de un problema

Fuente: adaptado de Ardil (2021)

2.3 Selección de Especialistas

Las adquisiciones de defensa involucran una parte significativa de áreas gubernamentales, la industria de defensa y el entorno académico-científico (GAVIÃO *et al.*, 2020). Estos sectores reúnen las partes interesadas en el proceso de contratación y se denominan *stakeholders*. Dado que representan diferentes deseos, puntos de vista, agendas y objetivos, los *stakeholders* son especialistas en potencia a los que es posible consultar para la recolección de datos (SUN *et al.*, 2008). Por ejemplo, los combatientes (los futuros usuarios del ítem) pueden centrarse en la eficacia del sistema y su compatibilidad con las plataformas actualmente en uso en las Fuerzas Armadas. Los desarrolladores de sistemas pueden tener una visión más amplia y se preocuparán por cuestiones estructurales de fuerzas y otras consideraciones estratégicas. Los especialistas técnicos se dedicarán a los aspectos científicos de ingeniería y, en particular, en los posibles retos tecnológicos que puedan afectar el criterio de riesgo. Finalmente, los administradores encargados del presupuesto naturalmente prestarán mayor atención a los aspectos programáticos asociados con la capacidad financiera del desarrollo, producción, operatividad y mantenimiento del sistema. En este contexto, es interesante recolectar evaluaciones que abarquen los ámbitos de actividad de los *stakeholders*, de forma que el resultado del AHP refleje una solución equilibrada con relación a los diferentes puntos de vista e intereses.

2.4 Evaluación del desempeño

La evaluación de las alternativas en cada criterio de la Figura 1 permite configurar la matriz de decisión del problema. Cada línea de la matriz (Figura 2) expresa el desempeño (a) de las (m) alternativas “A” con relación a los (n) criterios considerados “C”. Cada columna muestra las evaluaciones de todas las alternativas adoptadas por el decisor, con respecto a un criterio específico.

Figura 2 – Matriz de decisión

$$\begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ A_1 & \left(\begin{matrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ A_m & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{matrix} \right) & & \end{matrix}$$

Fuente: adaptado de Pomerol y Barba-Romero (2012, p. 19)

En el caso particular del AHP, las matrices de decisión son diferentes a la Figura 2, ya que recogen las evaluaciones entre pares con relación a cada variable del nivel jerárquico inmediatamente superior. Por ejemplo, para el problema de seleccionar una aeronave de combate (Figura 1) con el método AHP, serían necesarias siete matrices de evaluación por especialista: una matriz 6x6 (seis filas y seis columnas) para la evaluación por pares entre los criterios y seis matrices 3x3 (tres filas y tres columnas) para las evaluaciones de las aeronaves con respecto a cada criterio, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3 – Matrices del AHP

Objetivo						
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	1	c ₁₂	c ₁₃	c ₁₄	c ₁₅	c ₁₆
C ₂	c ₂₁	1	c ₂₃	c ₂₄	c ₂₅	c ₂₆
C ₃	c ₃₁	c ₃₂	1	c ₃₄	c ₃₅	c ₃₆
C ₄	c ₄₁	c ₄₂	c ₄₃	1	c ₄₅	c ₄₆
C ₅	c ₅₁	c ₅₂	c ₅₃	c ₅₄	1	c ₅₆
C ₆	c ₆₁	c ₆₂	c ₆₃	c ₆₄	c ₆₅	1

Criterio 1			Criterio 2			Criterio 3					
	A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃
A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃
A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1	A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1	A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1

Criterio 4			Criterio 5			Criterio 6					
	A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	A ₁	1	a ₁₂	a ₁₃
A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	A ₂	a ₂₁	1	a ₂₃
A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1	A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1	A ₃	a ₃₁	a ₃₂	1

Fuente: elaborado por los autores, 2023

Para esta evaluación se utiliza una escala de nueve puntos propuesta por Saaty (1977), descrita en el Cuadro 1.

Cuadro 1 – Escala de evaluación de Saaty

Intensidad de la relación entre pares	Escala numérica	Descripción de las evaluaciones entre pares
Igual importancia	1	Dos criterios son equivalentes con respecto al objetivo Dos alternativas son equivalentes con respecto a un criterio
Importancia moderada	3	Un criterio es apenas un poco más importante que otro con relación al objetivo Una alternativa es ligeramente más importante que otra con relación a un criterio
Importancia fuerte	5	Un criterio es más importante que otro con respecto al objetivo Una alternativa es más importante que otra con respecto a un criterio
Importancia muy fuerte	7	Un criterio es mucho más importante que otro con relación al objetivo Una alternativa es mucho más importante que otra con relación a un criterio
Importancia extrema	9	Un criterio es extremadamente más importante que otro con respecto al objetivo Una alternativa es extremadamente más importante que otra con respecto a un criterio
Valores intermedios	2, 4, 6, 8	Gradaciones de relaciones de valores intermedios de la escala de nueve puntos

Fuente: adaptado de Saaty (1977, p. 246)

Los elementos internos de las matrices del AHP (Figura 3) indican los valores correspondientes a la intensidad de relación entre dos criterios o dos alternativas. Al igual que en la comparación entre la aeronave 2 y la aeronave 3, en cuanto al criterio 4 (Figura 4), podemos suponer que el especialista considera más importante la primera alternativa que la segunda. Por lo tanto, el elemento a_{23} de la matriz de evaluaciones, con relación al criterio 4, recibiría el valor 7, ya que este valor equivale a la expresión mucho más importante en la escala de Saaty. Por reciprocidad, el elemento a_{32} recibiría el valor $1/7$ en la misma matriz. De esta forma, las demás matrices se organizan de acuerdo con las evaluaciones del especialista. La diagonal principal de las matrices siempre se compone por valores 1, ya que cada variable es equivalente a sí misma, por ejemplo, la aeronave 3 es la misma e igual de importante en cualquier criterio.

Generalizando las evaluaciones para n variables, la matriz de decisión debe estar compuesta por n^2 elementos, debido a la estructura de n filas y n columnas. De estos elementos, n de la diagonal principal asumen necesariamente el valor 1, ya que cada variable es equivalente a sí misma. Entonces habría n^2-n elementos para rellenar. Sin embargo, la mitad del resto también es obligatoriamente el valor inverso de su elemento recíproco (por ejemplo, el elemento recíproco de a_{15} es el elemento a_{51}). En resumen, solo es pertinente cumplimentar los elementos incluidos en el triángulo punteado de la Figura 5 en cada matriz.

Figura 4 – Sinopsis de la estructura jerárquica



Fuente: elaborado por los autores, 2023

Figura 5 – Evaluaciones necesarias en una matriz AHP

Objetivo

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	1	c ₁₂	c ₁₃	c ₁₄	c ₁₅	c ₁₆
C ₂	c ₂₁	1	c ₂₃	c ₂₄	c ₂₅	c ₂₆
C ₃	c ₃₁	c ₃₂	1	c ₃₄	c ₃₅	c ₃₆
C ₄	c ₄₁	c ₄₂	c ₄₃	1	c ₄₅	c ₄₆
C ₅	c ₅₁	c ₅₂	c ₅₃	c ₅₄	1	c ₅₆
C ₆	c ₆₁	c ₆₂	c ₆₃	c ₆₄	c ₆₅	1

Fuente: elaborado por los autores, 2023

3 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL AHP

Los cálculos del AHP se originan del álgebra lineal, ya que explora una base de datos en forma de matriz y utiliza los conceptos de vector propio y valor propio de matrices. Para efectuar estos cálculos se usan las ecuaciones de (1) a (6) del apéndice de este artículo, conforme se detalla en Liu y Lin (2016). Los cálculos de esta investigación se llevaron a cabo con el software Excel, sin embargo, se suelen emplear otros, como R y Python, incluyendo bibliografías específicas del AHP (CHO, 2019; FANG; PARTOVI, 2021).

También se mide la consistencia lógica de las evaluaciones, admitiéndose hasta un 10% de inconsistencia por parte del evaluador (LANE; VERDINI, 1989). Por ejemplo, un especialista juzga que A es más importante que B y B es más importante que C. Por lógica, no es aceptable que A sea equivalente o menos importante que C. Para tres variables, esta inconsistencia lógica es notable, no obstante, para un mayor número de comparaciones de paridad es habitual que el evaluador cometa este tipo de error.

Dependiendo de la estructura jerárquica del problema, un evaluador puede dedicar un esfuerzo y tiempo considerables para realizar las evaluaciones, lo que puede aumentar la probabilidad de inconsistencia lógica de sus juicios. Este problema se presenta en situaciones que exigen estructuras jerárquicas horizontales, es decir, caracterizadas por un número significativo de variables en cada nivel. Para mitigar esta vulnerabilidad del AHP, la bibliografía científica registra algunas técnicas para simplificar la recolección de datos, reduciendo el esfuerzo/tiempo de los especialistas y garantizando la consistencia lógica del proceso. En la ilustración del problema de adquisición de aeronaves de combate, con la estructura de 6 criterios (Figura 1), el modelo simplificado propuesto por Gavião, Lima y García (2021) requeriría que el evaluador hiciera solamente cinco juicios para este nivel, en lugar de los 15 previstos en el modelo original del AHP. Este artículo no profundiza en estos procedimientos para simplificar la recolección de datos del AHP, pero es posible encontrar en la bibliografía diferentes soluciones al respecto (ÁGOSTON; CSATÓ, 2022; ALRASHEEDI, 2019; GAVIÃO; LIMA; GARCIA, 2021; LEAL, 2020; ZHOU *et al.*, 2018).

4 APLICACIÓN Y RESULTADOS

Para ilustrar la aplicación del AHP al problema de la Figura 1, se simuló una base de datos recolectada por un especialista, de acuerdo con las evaluaciones por pares de la Figura 6, que son equivalentes a las matrices con el formato de la Ecuación (1). Así, el especialista debería rellenar siete matrices de evaluación entre pares.

Figura 6 – Recolección de datos por los especialistas

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	1	3	2	1/4	1/3	6
C ₂	1/3	1	1/2	1/6	1/5	4
C ₃	1/2	2	1	1/5	1/4	5
C ₄	4	6	5	1	2	9
C ₅	3	5	4	1/2	1	8
C ₆	1/6	1/4	1/5	1/9	1/8	1

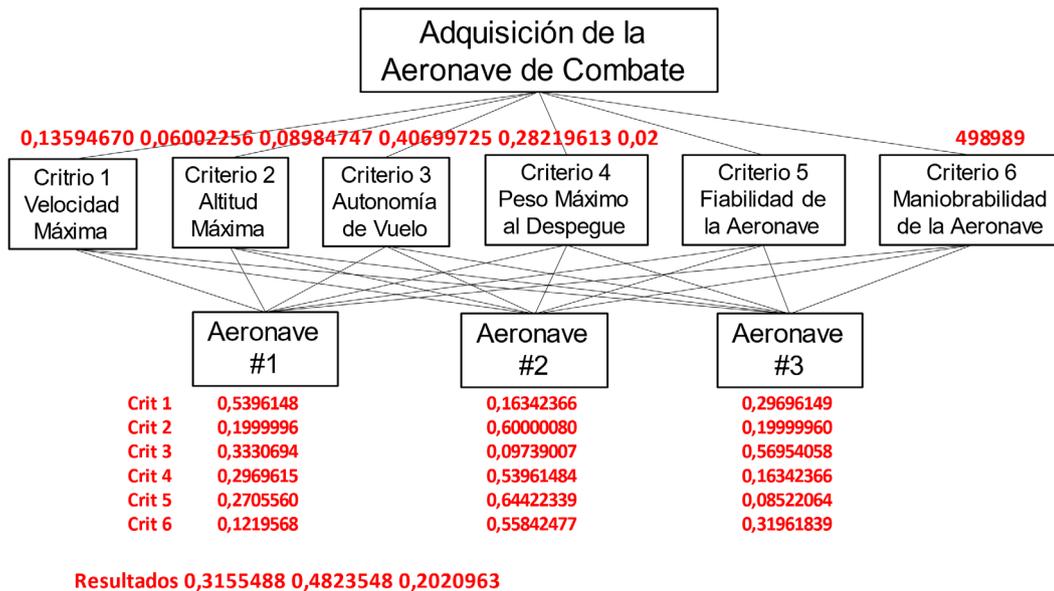
Criterio 1			Criterio 2			Criterio 3		
A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	1	3	2	1	1/3	1	1	4
A ₂	1/3	1	1/2	3	1	3	1/4	1
A ₃	1/2	2	1	1	1/3	1	2	5

Criterio 4			Criterio 5			Criterio 6		
A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	1	1/2	2	1	1/3	4	1	1/4
A ₂	2	1	3	3	1	6	4	1
A ₃	1/2	1/3	1	1/4	1/6	1	3	1/2

Fuente: elaborado por los autores, 2023

En la secuencia de cálculos, la Ecuación (2) permite obtener los pesos de las variables de cada matriz. Por lo tanto, la matriz de evaluaciones por pares de los seis criterios facilita sus pesos y cada matriz de evaluación de las aeronaves genera los pesos con relación a cada criterio, conforme se indica en la Figura 7. Por ejemplo, la matriz de evaluación indicó que el criterio de preferencia del especialista 4 obtuvo el mayor peso entre los demás (40,69%), mientras que el criterio 6 fue considerado el menos importante para la selección de la aeronave (2,49%). La Figura 7 muestra los pesos de acuerdo con cada criterio, situados debajo del nivel aeronaves.

Figura 7 – Pesos de cada matriz de evaluación



Fuente: elaborado por los autores, 2023

Después, se aplican las Ecuaciones de (3) a (6) del apéndice de este artículo, para establecer la RC de cada matriz, lo que permite validar las preferencias del especialista o indicar la necesidad de una nueva ronda de evaluaciones. La Tabla 1 expone los resultados de estas etapas de cálculo, siendo posible identificar que son inferiores al 10%, lo que ratifica la consistencia de las evaluaciones del especialista.

Tabla 1 – Secuencia de cálculos de la RC

Matriz	Criterios	Aeronaves Criterio 1	Aeronaves Criterio 2	Aeronaves Criterio 3	Aeronaves Criterio 4	Aeronaves Criterio 5	Aeronaves Criterio 6
λ máx.	6,2544	3,0092	3	3,0246	3,0092	3,0536	3,0183
IC	0,0509	0,0046	5,56. 10 ⁻¹²	0,0123	0,0046	0,0268	0,0091
IR	1,24	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
RC	0,0412	0,0079	9,58. 10 ⁻¹²	0,0212	0,0079	0,0462	0,0158

Fuente: elaborado por los autores, 2023

Los resultados de las preferencias finales de cada aeronave corresponden a una suma ponderada de los pesos obtenidos en los diferentes niveles. Por ejemplo, para la aeronave 1, su resultado es equivalente a la suma de las proporciones ($0,5396148 \times 0,13594670$) referentes a la ponderación del criterio 1 ($0,1999996 \times 0,06002256$) al criterio 2, ($0,3330694 \times 0,08984747$) al criterio 3, y así sucesivamente, hasta el Criterio 6. Por ello, en la Tabla 2 se muestra la preferencia final de las aeronaves, la cual refleja los juicios del especialista consultado. Para él, se debe seleccionar el avión 2, ya que recibió el resultado más elevado, 48,23%.

Tabla 2 – Pesos finales

Alternativas	Peso Final	Orden de Preferencia
Aeronave 1	0,3155488	2
Aeronave 2	0,4823548	1
Aeronave 3	0,2020963	3

Fuente: elaborado por los autores, 2023

5 CONCLUSIÓN

Este artículo tuvo como objetivo abordar la ayuda a la decisión en situaciones relacionadas con adquisiciones de defensa, mostrando cómo estructurarlas a través del método multicriterio, planteando específicamente el método AHP. El problema de las adquisiciones de defensa se ajusta a la teoría de la decisión multicriterio, ya que los atributos de los productos, sistemas y sus componentes pueden seleccionarse de acuerdo con criterios de decisión y, en general, el conjunto de posibles soluciones al problema es finito (ARDIL, 2021). La alta tecnología y los grandes recursos necesarios para la fabricación de estos sistemas hacen que el mercado de la industria de defensa esté restringido a unos pocos fabricantes y proveedores. Estas características permiten adaptar el problema a los métodos de ayuda a la decisión multicriterio disponibles en la investigación operativa.

El AHP ha sido utilizado con frecuencia en problemas relativos a las adquisiciones de defensa, principalmente por su simplicidad, lógica y la posibilidad de validar las evaluaciones de los especialistas (GAVIÃO; DUTRA; KOSTIN, 2021). El uso de una escala de percepciones que compara las variables por pares, facilita el juicio de los evaluadores, ya que evita la necesidad de emplear medidas de desempeño que muchas veces son inexistentes o inviables para los especialistas. Además, la consistencia lógica de los evaluadores se puede verificar fácilmente con la ayuda de cálculos derivados del álgebra lineal, indicando si los juicios están dentro de un rango aceptable o si es necesario reformularlos o incluso descartarlos. Las ecuaciones para el cálculo del AHP se pueden implementar en diferentes *softwares*, incluyendo Excel, R y Python, entre otros (FRANEK; KRESTA, 2014; LIU; LIN, 2016).

Este artículo trajo una aplicación simulada con el propósito de mostrar de qué manera debe ocurrir la recolección de datos y los cálculos del AHP. El problema mostró solamente las evaluaciones de un especialista, pero es importante, y deseable, que otros *stakeholders* participen en el proceso. Así, es posible obtener diferentes puntos de vista, fruto de experiencias personales o sectoriales de interés. Los resultados de diferentes especialistas pueden, por ejemplo, agregarse por medias aritméticas, indicando una idea general de las preferencias. En el modelo analizado aquí, se evaluaron tres aeronaves bajo seis criterios, señalando el orden de selección del especialista, el cual fue simulado.

APÉNDICE

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

A: Matriz de evaluaciones por pares de un especialista
a_{ij}: Valor de la evaluación por pares correspondiente a la escala Saaty
n: Número de criterios/alternativas

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}}$$

w_i: Vector propio de la matriz (pesos de la matriz de criterios o de las alternativas)
i: Indicador de las filas de la matriz
j: Indicador de las columnas de la matriz
 Σ : Suma
 Π : Producto

$$A^s = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w'_1 \\ w'_2 \\ \vdots \\ w'_n \end{bmatrix}$$

A^s: Producto matricial de las evaluaciones y del vector propio (*w*)

$$\lambda_{max} = (1/n) \times (w'_1/w_1 + w'_2/w_2 + \dots + w'_n/w_n) \quad \lambda_{max}: \text{Valor propio máximo de la matriz recíproca} \quad (4)$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad IC: \text{Índice de Consistencia (Tabla 1)} \quad (5)$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad RC: \text{Razón de Consistencia (lógica del evaluador)} \\ IR: \text{Índice Aleatorio, calculado con base en la Tabla 1} \quad (6)$$

Tabla A1 – Valores de Índices Aleatorios del AHP

Número de variables de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Índice Aleatorio (IR)	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fuente: adaptado de Liu y Lin (2016)

BIBLIOGRAFÍA

ABREU, H. F. Apoio Logístico Integrado: Peculiaridades da Indústria de Defesa e Tecnologia. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, Niterói, v. 2, n. 1, p. 53-72, 2015. Disponible: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/view/51459>. Acceso en: 2 maio 2023.

ÁGOSTON, K. C.; CSATÓ, L. Inconsistency thresholds for incomplete pairwise comparison matrices. **Omega**, Amsterdam, v. 108, p. 1-7, 2022. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048321001857>. Acceso en: 2 maio 2023.

ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; COSTA, A. P. C. S.; ALENCAR, L. H.; DAHER, S. F. D. **Decisão em grupo e negociação: métodos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.

ALRASHEEDI, M. Incomplete pairwise comparative judgments: Recent developments and a proposed method. **Decision Science Letters**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 261-274, 2019. Disponible: <http://growing-science.com/beta/dsl/3138-incomplete-pairwise-comparative-judgments-recent-developments-and-a-proposed-method.html>. Acceso en: 2 maio 2023.

ARDIL, C. Fighter Aircraft Selection Using Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution with Multiple Criteria Decision Making Analysis. **International Journal of Transport and Vehicle Engineering**, Istanbul, v. 13, n. 10, p. 649-657, 2021. Disponible: <https://publications.waset.org/10012207/fighter-aircraft-selection-using-technique-for-order-preference-by-similarity-to-ideal-solution-with-multiple-criteria-decision-making-analysis>. Acceso en: 2 maio 2023.

BELL, R. E.; HOLODNIY, M.; PAVLIN, J. A. Analysis of Alternatives for Combined and/or Collaborative Syndromic Surveillance Within DoD and VA. **Online Journal of Public Health Informatics**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1, 2016. Disponible: <https://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/6507>. Acceso en: 2 maio 2023.

BROWNE, K. D. **Self-Propelled Wheeled Howitzer for Marine Corps Use: Capability-Based Assessment**. 2018. 145 f. (Thesis Master of Science in Management) – Naval Postgraduate School, Monterey, California, United States, 2018. Disponible: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1069495.pdf>. Acceso en: 2 maio 2023.

CHO, F. **Analytic hierarchy process for survey data in R**. Genebra: R software, 2019.

CHO, N.; MOON, H.; CHO, J.; HAN, S.; PYUN, J. A Framework for Determining Required Operational Capabilities: A Combined Optimization and Simulation Approach. **Journal of**

Defense Management, Barcelona, v. 12, p. 1-8, 2022. Disponível: <https://www.longdom.org/open-access/a-framework-for-determining-required-operational-capabilities-a-combined-optimization-and-simulation-approach-92512.html>. Acesso em: 2 maio 2023.

CORRÊA, F. G. Planejamento Baseado em Capacidades e Transformação da Defesa: desafios e oportunidades do Exército Brasileiro. **Centro de Estudos Estratégicos do Exército**, Brasília, DF, v. 8, n. 1, p. 27-54, 2020. Disponível: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CEEEArE/article/view/4843>. Acesso em: 2 maio 2023.

FANG, J.; PARTOVI, F. Y. Criteria determination of analytic hierarchy process using a topic model. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 169, p. 1-13, 2021. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417420310046>. Acesso em: 2 maio 2023.

FRANEK, J.; KRESTA, A. Judgment scales and consistency measure in AHP. **Procedia Economics and Finance**, Amsterdam, v. 12, p. 164-173, 2014. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212567114003323>. Acesso em: 2 maio 2023.

GAVIÃO, L. O.; FRANCO E SILVA, M. M. F.; MACHADO, E.; PETINE, M. Custos de operação e apoio de novos meios navais: estimativas do PHM Atlântico com base em fontes abertas. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 733-757, 2018.

GAVIÃO, L. O.; SANT'ANNA, A. P.; LIMA, G. B. A.; GARCIA, P. A. A.; KOSTIN, S.; ASRILHANT, B. Selecting a cargo aircraft for humanitarian and disaster relief operations by multicriteria decision aid methods. *IEEE Transactions on Engineering Management*, [s. l.], v. 67, n. 3, p. 631-640, 2020.

GAVIÃO, L. O.; DUTRA, L. D.; KOSTIN, S. Prioritization of Multilateral Agreements on Export Control of Defense Products and Sensitive Technologies by Hierarchical Analysis Process. **Austral**, Porto Alegre, v. 10, n. 20, p. 138-174, 2021. Disponível: <https://seer.ufrgs.br/austral/article/view/119666>. Acesso em: 2 maio 2023.

GAVIÃO, L. O.; LIMA, G. B. A.; GARCIA, P. A. A. Procedimento de redução das avaliações do AHP por transitividade da escala verbal de Saaty. *In*: SENHORAS, E. M. (org.). **Engenharia de Produção**: além dos produtos e sistemas produtivos. Ponta Grossa: Atena, 2021. p. 88-102.

KRESS, M.; MORGAN, B. **A Robust Framework for Analyzing Acquisition Alternatives** 2018. (Acquisition Research Program) – Naval Postgraduate School, Monterrey, California, United States, 2018.

KRUGER, H.; VERHOEF, A.; PREISER, R. The epistemological implications of critical complexity thinking for operational research. **Systems**, Basel, v. 7, n. 5, p. 1-20, 2019. Disponível: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/5>. Acesso em: 2 maio 2023.

LANE, E. F.; VERDINI, W. A. A consistency test for AHP decision makers. **Decision Sciences**, Hoboken, v. 20, n. 3, p. 575-590, 1989.

LEAL, J. E. AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method. **MethodsX**, Amsterdam, v. 7, p. 1-11, 2020. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016119303243>. Acceso en: 2 maio 2023.

LIU, C. H.; LIN, C. W. R. The Comparative of the AHP Topsis Analysis Was Applied for the Commercialization Military Aircraft Logistic Maintenance Establishment. **International Business Management**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 6428-6432, 2016. Disponible: <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=ibm.2016.6428.6432>. Acceso en: 2 maio 2023.

NEGRETE, A. C. A.; SOUSA, E. R. Demandas dos Grupamentos Operativos de fuzileiros navais durante a MINUSTAH: Contribuições para a base industrial de defesa brasileira. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 700-732, 2018. Disponible: <https://revistadaegn.com.br/index.php/revistadaegn/article/view/767>. Acceso en: 2 maio 2023.

PACHECO, T.; PEDONE, L. Incentivos governamentais e indústria de defesa. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, Niterói, v. 3, n. 2, p. 177-196, 2016. Disponible: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/view/71618>. Acceso en: 2 maio 2023.

POMEROL, J. C.; BARBA-ROMERO, S. **Multicriterion decision in management: principles and practice**. New York: Springer, 2012.

ROY, B. **Méthodologie multicritère d'aide à la décision**. Paris: Economica, 1985.

SAATY, T. L. An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. **Energy Management and Policy Center**, Pennsylvania, v. 28, p. 1-31, 1972.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022249677900335>. Acceso en: 2 maio 2023.

SOUSA, A. A. G.; FERNANDES JUNIOR, J. G.; BEZERRA, E. A. M.; LINS JUNIOR, A. S.; MADEIRA, C. A. A. Boas práticas de gestão do ciclo de vida para meios navais com propulsão nuclear. **Revista Pesquisa Naval**, [s. l.], v. 1, n. 33, p. 47-57, 2021.

STERN, J. L.; GROGAN, P. T. Federated Space Systems' Trade-Space Exploration for Strategic Robustness. **Journal of Spacecraft and Rockets**, Reston, p. 1-15, 2022. Disponible: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.A35103>. Acceso en: 2 maio 2023.

SUN, Y. H.; MA, J.; FAN, Z. P.; WANG, J. A group decision support approach to evaluate experts for R&D project selection. **IEEE Transactions on engineering management**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 158–170, 2008. Disponível: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4439900>. Acesso em: 2 maio 2023.

VIANELLO, J. M.; MARTINS, E. F. Sistemas Eletrônicos de Comando e Controle: uma visão da Base Industrial de Defesa Brasileira. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 60-68, 2019. Disponível: <http://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/451>. Acesso em: 2 maio 2023.

YU, D.; KOU, G.; XU, Z.; SHI, S. Analysis of collaboration evolution in AHP research: 1982–2018. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, New Jersey, v. 20, n. 1, p. 7-36, 2021. Disponível: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219622020500406>. Acesso em: 2 maio 2023.

ZHOU, X.; HU, Y.; DENG, Y.; CHANT, F. T. S.; ISHIZAKA, A. A DEMATEL-based completion method for incomplete pairwise comparison matrix in AHP. **Annals of Operations Research**, New York, v. 271, n. 2, p. 1045-1066, 2018. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-018-2769-3>. Acesso em: 2 maio 2023.