

O apoio à decisão em aquisição de defesa: estruturando problemas multicritérios com o Processo de Análise Hierárquica (AHP)

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

Resumo: A aquisição de produtos, sistemas e seus componentes de defesa apresenta características que tornam a pesquisa operacional especialmente útil para problemas de escolha de material para as Forças Armadas, incluindo a teoria de apoio à decisão multicritério. O problema de aquisição de defesa se adequa a essa metodologia, pois envolve o uso de critérios de decisão para a escolha mais satisfatória entre um conjunto finito de produtos de defesa, uma vez que a alta tecnologia e os vultosos recursos exigidos para a produção desses sistemas tornam o mercado de defesa restrito aos poucos desenvolvedores e fabricantes. Um método multicritério com amplo uso na indústria de defesa é o Processo de Análise Hierárquica (AHP), sobretudo, por sua simplicidade, lógica e possibilidade de validação das avaliações de especialistas. As equações de cálculo do AHP são aqui descritas e podem ser implementadas em diferentes *softwares*, que incluem Excel, R, Python, entre outros. Uma aplicação simulada apresentou a forma de coleta de dados e a sequência de cálculos do AHP para um problema de escolha de três aeronaves, avaliadas sob seis critérios, indicando a ordem de preferência de um especialista.

Palavras-chave: Aquisição de Defesa; Apoio à Decisão Multicritério; 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

Recebido: 9 mar. 2023

Aprovado: 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 INTRODUÇÃO

A aquisição de produtos, sistemas e seus componentes de defesa envolve análise complexa e multidimensional, em que diversos fatores técnicos precisam ser avaliados, por exemplo, a adequação à defasagem de capacidades do arsenal de defesa (CORRÊA, 2020; VIANELLO; MARTINS, 2019); os custos do ciclo de vida das possíveis soluções (SOUSA *et al.*, 2021); a capacidade de manutenção e de modernização dos sistemas no país (NEGRETE; SOUSA, 2018; PACHECO; PEDONE, 2016); entre outros. A presença desses diferentes critérios de avaliação e um conjunto finito de soluções possíveis para atender às necessidades das Forças Armadas sugere o uso de metodologias específicas de apoio à decisão, capazes de oferecer um resultado técnico e satisfatório.

De maneira geral, o processo de escolha dos produtos, sistemas e seus componentes de defesa, que se adequam às necessidades das Forças Armadas, pode ser auxiliado por métodos de pesquisa operacional, que se destinam ao apoio à tomada de decisão. Os modelos matemáticos produzem resultados que conferem mais objetividade ao processo, proporcionando um certo isolamento em relação aos outros aspectos, que também pesam na tomada de decisão, como, os de natureza política (KRUGER; VERHOEF; PREISER, 2019).

De certa forma, é possível considerar que o portfólio da indústria de defesa é limitado, no que se refere às opções disponíveis no mercado para a aquisição em prateleira ou mesmo para a geração de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Esse setor industrial depende cada vez mais de alta tecnologia, logo, para se manter no estado da arte são necessários recursos humanos capacitados e montantes financeiros restritos a poucos países desenvolvedores e fabricantes no mundo (ABREU, 2015). Assim, para lidar com esse conjunto finito de possíveis soluções ao problema, a pesquisa operacional disponibiliza metodologias designadas genericamente de métodos de apoio à decisão multicritério (em inglês MCDA – *Multicriteria Decision Aid*) (ALMEIDA, 2013).

Os métodos MCDA buscam uma solução satisfatória ao problema, ao invés da solução ótima, pois um conjunto finito de possíveis soluções dificilmente inclui uma que apresenta o melhor desempenho em todos os critérios de decisão. Se uma solução com essas características estiver presente no conjunto de possíveis soluções, não haveria a necessidade da modelagem do problema, pois a melhor resposta já estaria evidente aos tomadores de decisão. De maneira geral, as possíveis alternativas ao problema apresentam desempenhos irregulares ao longo dos critérios, ora performando como as melhores, ora como as piores, ora como intermediárias, em relação às demais alternativas. Nessas condições, não temos uma solução ótima, mas alternativas mais satisfatórias ou mais aceitáveis que outras (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Este artigo trata da estruturação dos elementos essenciais dos métodos MCDA em problemas relacionados à aquisição de produtos de defesa, seus sistemas ou componentes de sistemas. Uma aplicação prática com o Processo de Análise Hierárquica (AHP) também é apresentada, sobretudo, por ser amplamente explorada em problemas de aquisição em defesa (BELL; HOLODNIY; PAVLIN, 2016; BROWNE, 2018; CHO *et al.*, 2022; GAVIÃO *et al.*, 2020; GAVIÃO; DUTRA; KOSTIN, 2021; STERN; GROGAN, 2022).

O AHP apresenta uma lógica simples e intuitiva, já que explora uma escala específica para as avaliações e apresenta um instrumento de validação dos resultados, o que confere credibilidade e confiança ao processo. Esse método foi proposto por Thomas Saaty, no início da década de 1970, e encontra amplo respaldo na literatura científica, com aplicações nas mais variadas áreas de conhecimento (SAATY, 1972; YU *et al.*, 2021).

2 ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM MCDA

A modelagem de problemas com métodos MCDA envolve três tarefas essenciais: selecionar alternativas ao problema, escolher os critérios de decisão e avaliar o desempenho de cada alternativa em relação aos critérios escolhidos. Esses três elementos configuram a chamada matriz de decisão do problema. Posteriormente, essa matriz de decisão precisa ser submetida a algum modelo matemático para produzir o resultado esperado, que pode ser a ordem de preferência do conjunto finito de soluções, a classificação das soluções em *clusters*, entre outras (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2012).

Em aquisição de defesa, esses elementos essenciais precisam ser levantados e avaliados em consonância com os cenários de emprego das Forças Armadas (KRESS; MORGAN, 2018). A prospecção de cenários não é analisada neste artigo, porém, é parte importante do processo de escolha de produtos, sistemas e componentes de defesa. O portfólio de produtos de defesa disponíveis às Forças Armadas deve capacitá-las ao emprego em cenários de curto, médio e longo prazos. Com efeito, é lícito assumir que os contextos impactam as avaliações dos especialistas sobre a matriz de decisão, sendo possível que o mesmo critério ou alternativa tenham resultados diferentes conforme a situação apresentada.

2.1 Seleção das alternativas do problema

Um conjunto finito de alternativas capazes de solucionar o problema deve ser levantado. Na prática, essas alternativas são os produtos de defesa, seus sistemas ou componentes que foram planejados para a aquisição, ou mesmo os projetos de P&D para a construção nos estaleiros, fábricas e instalações de consórcios constituídos para esse fim. No sistema clássico de modelagem, assume-se que as alternativas são diferentes e que compõem todo o conjunto de decisões, não sendo possível a escolha de uma solução mista, composta pela união de alternativas ou parcela delas. Se o tomador de decisão introduz uma nova alternativa, então, a princípio, o processo de análise deve ser repetido com o conjunto de escolhas recém-formado (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2012).

O conjunto de alternativas não deve ser trivial, por exemplo, um conjunto de apenas duas alternativas em que uma claramente apresenta melhor desempenho. Por outro lado, o conjunto de alternativas deve apresentar dimensão gerenciável, evitando a escolha preliminar de dezenas ou centenas de possíveis alternativas. Uma maneira de reduzir o tamanho do conjunto de alternativas é eliminar as semelhantes ou que são evidentemente dominadas por outras. Essa dominação é caracterizada pelo melhor desempenho de uma alternativa em relação à outra em todos

os critérios. Então, nesse caso, não faz sentido prosseguir com a modelagem e análise de alguma alternativa menos qualificada, devendo ser excluída do conjunto inicial.

As alternativas levantadas para a análise também devem ser exequíveis, no sentido de que são viáveis sob os pontos de vista financeiro e logístico. É necessário que o país, sua indústria de defesa e suas Forças Armadas tenham condições de adquirir, operar, manter e se desfazer do produto de defesa ao término do seu ciclo de vida. Isto requer capacidade gerencial para estruturar a logística integrada dos novos produtos de defesa e a aquiescência da sociedade em apoiar um orçamento de defesa compatível com os custos do ciclo de vida dos novos meios. Existem produtos de defesa que operam por décadas, a exemplo de alguns navios e submarinos, que exigem vultosos recursos para mantê-los ativos e modernizados durante longo período, acompanhando o estado da arte dos demais sistemas. Esses aspectos precisam ser considerados durante o levantamento do conjunto de alternativas do problema.

2.2 Escolha dos critérios de decisão

Os critérios são atributos ou características especiais do problema que o tomador de decisão torna preferenciais em sua escolha. Em problemas gerenciais é comum o uso de critérios relacionados ao preço de compra, à qualidade, à resistência do material, à aparência do produto, à economia de manutenção, entre outros. Alguns critérios são essencialmente quantitativos, sendo medidos por unidades e escalas numéricas (peso, dimensões, custos), enquanto outros são de natureza qualitativa, sendo medidos por escalas ordinais de preferência, que levam em conta a percepção do avaliador, ao invés de resultados ou desempenhos (qualidade, aparência, risco).

De acordo com Roy (1985), uma família de critérios é considerada coerente caso satisfaça três requisitos:

- **Integridade:** nenhum dos atributos relevantes para discriminar as alternativas foi esquecido. O uso integral dos critérios mais relevantes para a busca de uma solução ao problema não permitiria, em tese, a existência de pares de alternativas empatadas, de tal forma que o tomador de decisão possa afirmar, sem hesitação, a relação de preferência entre elas.
- **Consistência:** as preferências finais do tomador de decisão devem ser coerentes com as preferências em cada critério. Isso significa que se “a” e “b” são duas alternativas entre as quais o tomador de decisão é indiferente, atingindo, por exemplo, a mesma pontuação para cada critério, então a melhoria de “a” em um critério e/ou a degradação de “b” em outro critério implica, de fato, que “a” deva ser preferível à “b” para o tomador de decisão.
- **Não redundância:** dois critérios não devem ser semelhantes, no sentido de avaliarem as mesmas variáveis de desempenho. A existência de dois ou mais critérios com essa característica desequilibra a tomada de decisão, pois um atributo em comum terá sido considerado mais de uma vez para o resultado. Uma atenção especial deve ser dada ao uso de índices para critérios, pois são geralmente compostos por variáveis que podem ser comuns a outros critérios. Uma família coerente de critérios que satis-

faça os requisitos de integridade e consistência não é redundante se a remoção de um único critério compromete o conjunto restante justamente nesses requisitos.

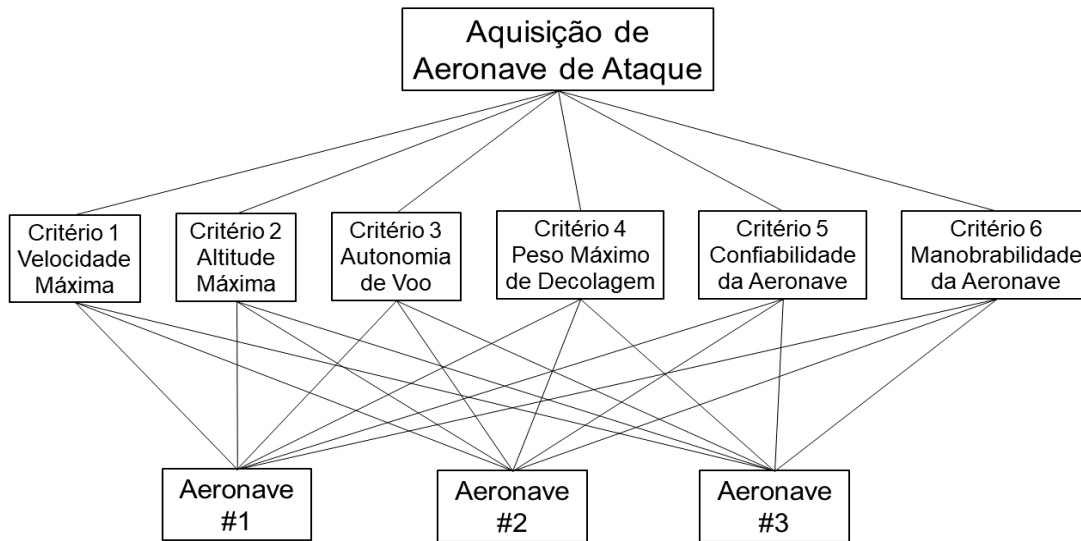
Por ocasião da modelagem do problema, Pomerol e Barba-Romero (2012, p. 313) alertam que a integridade deve ser o requisito prioritário na escolha dos critérios, pois um tomador de decisão racional, experiente e conhecedor do problema tende a selecionar os critérios que efetivamente devem ser considerados para a escolha da alternativa mais satisfatória. A integridade impacta positivamente nos requisitos de consistência e não redundância da família de critérios. Aqueles autores também recomendam que a modelagem MCDA evite uma quantidade elevada de critérios (superior a sete), porém se isso for absolutamente necessário, que seja construída uma estrutura hierárquica, em diferentes níveis de critérios e subcritérios. Esse comentário reforça a indicação do método AHP, que utiliza esse tipo de estrutura para a busca da solução mais satisfatória.

Em problemas de aquisição de produtos de defesa, alguns critérios são usualmente explorados. O desempenho operacional, por exemplo, é essencial para o sucesso nos campos de batalha, sejam quais forem os ambientes operacionais. Para um sistema de armas, a precisão e a cadência de tiro (quantidade de disparos por tempo) são requisitos relevantes. Outro conjunto de critérios importantes se refere à logística, sendo expressos por meio das características de confiabilidade e manutenibilidade. A confiabilidade afeta a prontidão do sistema. Quanto mais confiáveis forem seus componentes, menos frequentes são as paradas e necessidades de parada para serviços de reparo, além da redução dos custos com os sobressalentes. Esse critério é quantitativo e normalmente é medido pelo tempo médio entre falhas (MTBF). A manutenibilidade é um atributo que retrata a facilidade (ou dificuldade) em efetuar a manutenção do sistema. Um componente modular que permite a manutenção com ajuda do sistema tipo *plug-and-play* é mais sustentável do que outro interligado por fios, ou que requeira a desmontagem de componentes íntegros do sistema, localizados no caminho do componente danificado. Semelhante à confiabilidade, a estrutura de manutenção de um item pode ser medida com ajuda do tempo de serviço de reparo e manutenção (KRESS; MORGAN, 2018).

Por fim, cabe também ressaltar os critérios relacionados aos custos de ciclo de vida e aos riscos inerentes aos projetos de P&D de um novo sistema. Os custos relacionados a futuros gastos com a operação e manutenção dos sistemas são mais incertos do que os custos de P&D para um item em estágio de desenvolvimento avançado, ou do que o preço de compra de um item de prateleira. Existem estimativas pessimistas de que os custos de operação e apoio podem representar mais de 80% do montante necessário para todo o ciclo de vida de um produto de defesa (GAVIÃO *et al.*, 2018). O risco pode estar relacionado a atrasos nos cronogramas de desenvolvimento e produção, ou mesmo à elevação dos custos planejados, ultrapassando o orçamento desejado (KRESS; MORGAN, 2018).

Em resumo, os itens 2.1 e 2.2 mostram os elementos essenciais para a modelagem de um problema MCDA e, simultaneamente, para construção da estrutura hierárquica ao emprego do AHP. A Figura 1 ilustra a árvore hierárquica utilizada por Ardil (2021) para a escolha de uma aeronave de ataque. Em que pese a preocupação do autor em avaliar aspectos essencialmente operacionais, essa estrutura é suficiente para demonstrar o uso da metodologia do AHP, mesmo sem o uso de critérios de natureza logística, confiabilidade e manutenibilidade.

Figura 1 – Estrutura hierárquica de um problema



Fonte: adaptado de Ardil (2021)

2.3 Seleção dos Especialistas

A aquisição de defesa envolve significativa parcela de setores do governo, da indústria de defesa e do meio acadêmico-científico (GAVIÃO *et al.*, 2020). Esses setores reúnem as partes interessadas no processo de aquisição e são designados *stakeholders*. Por representarem diferentes interesses, pontos de vista, agendas e objetivos, os *stakeholders* são potenciais especialistas a serem consultados para a coleta de dados (SUN *et al.*, 2008). Por exemplo, os combatentes (os futuros usuários do item) podem se concentrar na eficácia do sistema e sua compatibilidade com as plataformas atualmente em uso nas Forças Armadas. Os desenvolvedores do sistema podem ter uma visão mais ampla e estarão preocupados com questões de estrutura de força e outras considerações estratégicas. Os especialistas técnicos se concentrarão nos aspectos científicos de engenharia e, em particular, nos possíveis desafios tecnológicos que podem afetar o critério de risco. Finalmente, os gestores orçamentários naturalmente darão maior atenção aos aspectos programáticos associados à capacidade financeira do desenvolvimento, produção, operação e manutenção do sistema. Nesse contexto, é interessante coletar as avaliações que cubram as áreas de conhecimento dos *stakeholders*, para que o resultado do AHP reflita uma solução equilibrada em relação aos diferentes pontos de vista e interesses.

2.4 Avaliação de desempenho

A avaliação das alternativas em cada critério da Figura 1 permite configurar a matriz de decisão do problema. Cada linha da matriz (Figura 2) expressa o desempenho (a) das (m) alternativas “A” em relação aos (n) critérios considerados “C”. Cada coluna apresenta as avaliações de todas as alternativas adotadas pelo decisor, relativas a um critério específico.

Figura 2 – Matriz de decisão

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

Fonte: adaptado de Pomerol e Barba-Romero (2012, p. 19)

No caso particular do AHP, as matrizes de decisão são diferentes da Figura 2, pois reúnem as avaliações par a par em relação a cada variável do nível hierárquico imediatamente superior. Para o problema de escolha de uma aeronave de ataque (Figura 1) com o método AHP, por exemplo, seriam necessárias sete matrizes de avaliação por especialista: uma 6x6 (seis linhas e seis colunas) para a avaliação par a par entre os critérios e seis matrizes 3x3 (três linhas e três colunas) para as avaliações das aeronaves em relação a cada critério, conforme a Figura 3.

Figura 3 – matrizes do 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

Critério 1			Critério 2			Critério 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

Critério 4			Critério 5			Critério 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

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Para essa avaliação, é utilizada uma escala de nove pontos proposta por Saaty (1977), descrita no Quadro 1.

Quadro 1 – escala de avaliação de Saaty

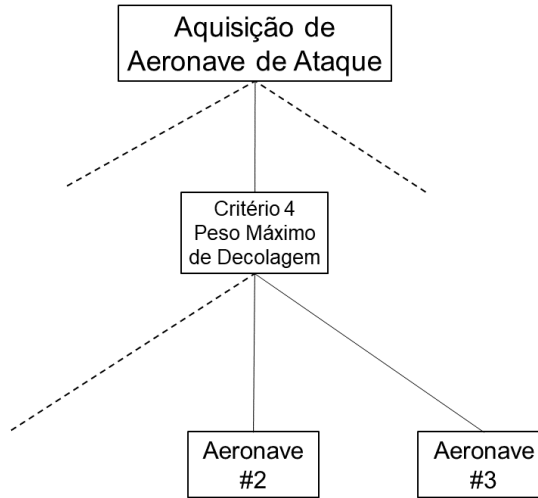
Intensidade da relação par a par	Pontuação da Escala	Descrição das avaliações par a par
Equivalente	1	Dois critérios são equivalentes em relação ao objetivo Duas alternativas são equivalentes em relação a um critério
Moderada	3	Um critério é pouco mais importante que outro em relação ao objetivo Uma alternativa é pouco mais importante que outra em relação a um critério
Forte	5	Um critério é mais importante que outro em relação ao objetivo Uma alternativa é mais importante que outra em relação a um critério
Muito Forte	7	Um critério é muito mais importante que outro em relação ao objetivo Uma alternativa é muito mais importante que outra em relação a um critério
Extrema	9	Um critério é extremamente mais importante que outro em relação ao objetivo Uma alternativa é extremamente mais importante que outra em relação a um critério
Intensidades intermediárias	2, 4, 6, 8	Gradações das relações por valores intermediários da escala de nove pontos

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

Os elementos internos das matrizes do AHP (Figura 3) indicam os valores correspondentes à intensidade da relação entre dois critérios ou duas alternativas. Como na comparação entre a aeronave 2 e a aeronave 3, em relação ao critério 4 (Figura 4), podemos supor que o especialista considera a primeira alternativa mais importante que a segunda. Logo, o elemento a_{23} da matriz de avaliações, em relação ao critério 4, receberia o valor 7, pois esse valor equivale à expressão muito mais importante na escala de Saaty. Por reciprocidade, o elemento a_{32} receberia o valor 1/7 na mesma matriz. Dessa maneira, as demais matrizes são montadas conforme as avaliações do especialista. A diagonal principal das matrizes é sempre composta por valores 1, pois cada variável é equivalente a ela mesma, por exemplo, a aeronave 3 equivale à aeronave 3 em relação a qualquer critério.

Generalizando as avaliações para n variáveis, a matriz de decisão deverá ser composta por n^2 elementos, devido à estrutura de n linhas e n colunas. Desses elementos, n da diagonal principal assumem obrigatoriamente o valor 1, pois cada variável é equivalente a ela mesma. Restariam então n^2-n elementos a preencher. Entretanto, metade desse restante é, também obrigatoriamente, o valor inverso do seu elemento recíproco (por exemplo, o elemento recíproco de a_{15} é o elemento a_{51}). Em resumo, apenas é necessário preencher os elementos incluídos no triângulo pontilhado da Figura 5 para cada matriz.

Figura 4 – extrato da estrutura hierárquica



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Figura 5 – avaliações necessárias em uma matriz do 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

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO DO AHP

Os cálculos do AHP são originários da álgebra linear, pois explora uma base de dados na forma matricial e utiliza os conceitos de autovetor e autovalor de matrizes. As Equações (1) a (6), no apêndice deste artigo, são utilizadas para esses cálculos, conforme detalhadas em Liu e Lin (2016). Os cálculos desta pesquisa foram realizados no software Excel, porém outros são usualmente utilizados, como R e Python, inclusive com bibliotecas específicas ao AHP (CHO, 2019; FANG; PARTOVI, 2021).

A consistência lógica das avaliações também é mensurada, sendo admitido até 10% de inconsistência do avaliador (LANE; VERDINI, 1989). Por exemplo, um especialista julga que A é mais importante que B e B é mais importante que C. Por lógica, não é aceitável que A seja equivalente ou menos importante que C. Para três variáveis, essa inconsistência lógica é perceptível, porém, para maior quantidade de comparações paritárias, é comum que o avaliador cometa esse tipo de equívoco.

Dependendo da estrutura hierárquica do problema, um avaliador pode despende considerável esforço e tempo para realizar as avaliações, o que pode ampliar a probabilidade de inconsistência lógica de seus julgamentos. Esse problema ocorre em situações que demandam estruturas hierárquicas achatadas, isto é, caracterizadas por significativa quantidade de variáveis em cada nível. Para mitigar essa vulnerabilidade do AHP, a literatura científica registra algumas técnicas para simplificar a coleta de dados, reduzindo o esforço/tempo dos especialistas e garantindo a consistência lógica do processo. Na ilustração do problema de aquisição de aeronaves de ataque, com a estrutura de 6 critérios (Figura 1), o modelo simplificado proposto por Gavião, Lima e Garcia (2021) exigiria do avaliador apenas cinco julgamentos para esse nível, ao invés de 15 previstos no modelo original do AHP. Este artigo não aprofunda esses procedimentos de simplificação da coleta de dados do AHP, porém é possível encontrar diferentes soluções na literatura (ÁGOSTON; CSATÓ, 2022; ALRASHEEDI, 2019; GAVIÃO; LIMA; GARCIA, 2021; LEAL, 2020; ZHOU *et al.*, 2018).

4 APLICAÇÃO E RESULTADOS

Para ilustrar a aplicação do AHP ao problema da Figura 1, simulou-se uma base de dados coletada de um especialista, conforme as avaliações paritárias da Figura 6, que equivalem às matrizes no formato da Equação (1). Dessa forma, o especialista deveria completar sete matrizes de avaliações par a par.

Figura 6 – Coleta de dados do Especialista

	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

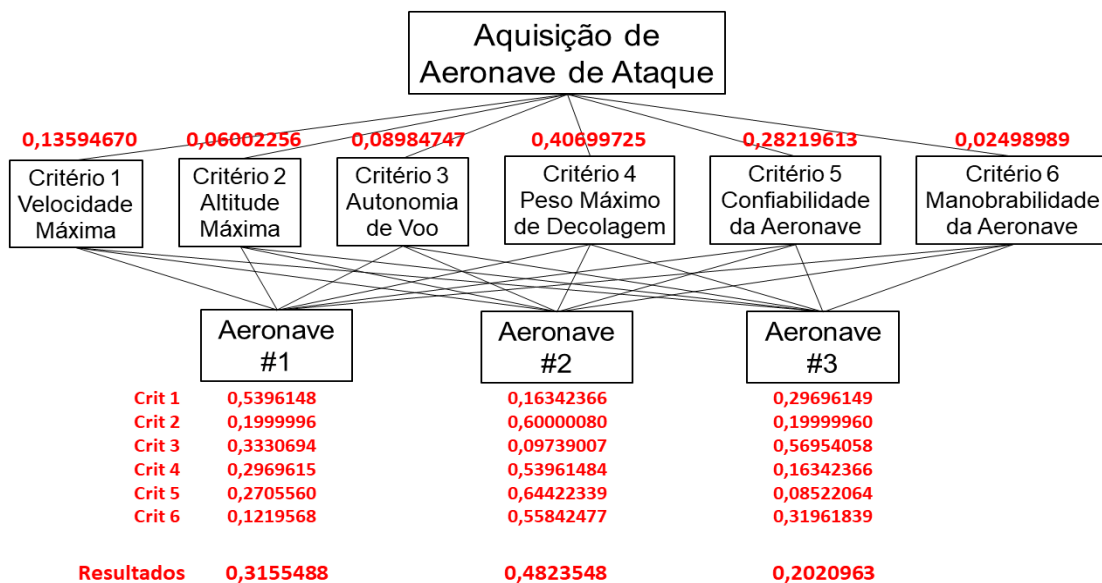
Critério 1			Critério 2			Critério 3		
A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	1	3	2	1	1/3	1	1	4
A ₂	1/3	1	1/2	3	1	3	1/4	1
A ₃	1/2	2	1	1	1/3	1	2	5

Critério 4			Critério 5			Critério 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

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Na sequência de cálculos, a Equação (2) permite obter os pesos das variáveis de cada matriz. Portanto, a matriz de avaliações paritárias dos seis critérios produz seus pesos e cada matriz de avaliação das aeronaves produz os pesos em relação a cada critério, conforme indicados na Figura 7. Por exemplo, a matriz de avaliação dos critérios indicou que a preferência do especialista pelo critério 4 obteve o maior peso entre os demais (40,69%), enquanto o critério 6 foi considerado o de menor importância para a escolha da aeronave (2,49%). Abaixo do nível das aeronaves, a Figura 7 mostra seus pesos em relação a cada critério.

Figura 7 – pesos de cada matriz de avaliações



Fonte: Elaborado pelos autores

Em seguida, as Equações de (3) a (6), no apêndice deste artigo, são aplicadas para gerar as RC de cada matriz, permitindo validar as preferências do especialista ou indicar a necessidade de uma nova rodada de avaliações. A Tabela 1 apresenta os resultados dessas etapas de cálculo, sendo possível identificar que são inferiores a 10%, o que valida a consistência das avaliações do especialista.

Tabela 1 – Sequência de cálculos da RC

Matriz	Critérios	Aeronaves Critério 1	Aeronaves Critério 2	Aeronaves Critério 3	Aeronaves Critério 4	Aeronaves Critério 5	Aeronaves Critério 6
λ máx	6,2544	3,0092	3	3,0246	3,0092	3,0536	3,0183
IC	0,0509	0,0046	$5,56 \cdot 10^{-12}$	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	$9,58 \cdot 10^{-12}$	0,0212	0,0079	0,0462	0,0158

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Os resultados das preferências finais de cada aeronave correspondem a uma soma ponderada dos pesos obtidos nos diferentes níveis. Para a aeronave 1, por exemplo, seu resultado equivale à soma das parcelas ($0,5396148 \times 0,13594670$) referente à ponderação do critério 1 ($0,1999996 \times 0,06002256$) ao critério 2, ($0,3330694 \times 0,08984747$) ao critério 3, assim por diante, até o Critério 6. Em razão disso, a Tabela 2 apresenta a preferência final das aeronaves, que reflete os julgamentos do especialista consultado. Para ele, a aeronave 2 deveria ser a escolhida, pois obteve o maior resultado, 48,23%.

Tabela 2 – Pesos finais

Alternativas	Peso Final	Ordem de Preferência
Aeronave 1	0,3155488	2
Aeronave 2	0,4823548	1
Aeronave 3	0,2020963	3

Fonte: elaborado pelos autores (2023)

5 CONCLUSÃO

Este artigo teve por finalidade abordar o apoio à decisão em problemas de aquisição de defesa, mostrando como estruturá-lo por meio do método multicritério, sendo, especificamente, apresentado o método AHP. O problema de aquisição de defesa se adequa à teoria da decisão multicritério, pois os atributos dos produtos, sistemas e seus componentes podem ser selecionados conforme critérios de decisão e, em geral, o conjunto de soluções possíveis ao problema é finito (ARDIL, 2021). A alta tecnologia e os vultosos recursos exigidos para a produção desses sistemas torna o mercado de defesa restrito a poucos fabricantes. Essas características permitem ajustar o problema aos métodos de apoio à decisão multicritério, disponíveis na pesquisa operacional.

O AHP tem sido utilizado com frequência em problemas de aquisição de defesa, sobretudo, por sua simplicidade, lógica e possibilidade de validação das avaliações dos especialistas (GAVIÃO; DUTRA; KOSTIN, 2021). O uso de uma escala de percepções que compara as variáveis de modo par a par, facilita o julgamento dos avaliadores, pois evita a necessidade do uso de medidas de desempenho muitas vezes inexistentes ou inexequíveis aos especialistas. Além disso, a consistência lógica dos avaliadores pode ser facilmente verificada com ajuda de cálculos oriundos da álgebra linear, indicando se os julgamentos se encontram em uma faixa aceitável ou se precisam ser refeitos ou até mesmo descartados. As equações de cálculo do AHP podem ser implementadas em diferentes *softwares*, que incluem Excel, R, Python, entre outros (FRANEK; KRESTA, 2014; LIU; LIN, 2016).

Este artigo trouxe uma aplicação simulada, a fim de mostrar como deve ocorrer a coleta de dados e os cálculos do AHP. O problema mostrou apenas as avaliações de um especialista, porém é importante – e desejável – que outros *stakeholders* participem do processo. Assim, é possível obter diferentes pontos de vista, decorrentes de experiências pessoais ou setoriais interessantes. Os resultados de diferentes especialistas podem, por exemplo, ser agregados por médias aritméticas, indicando uma ideia geral de preferências. No modelo aqui explorado, três aeronaves foram avaliadas sob seis critérios, indicando a ordem de escolha do especialista simulado.

APÊNDICE

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

A: matriz de avaliações paritárias de um especialista
a_{ij}: valor da avaliação paritária correspondente à escala de Saaty
n: quantidade de critérios/alternativas

(1)

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

w_i: autovetor da matriz (pesos da matriz de critérios ou das alternativas)
i: indicador das linhas da matriz
j: indicador das colunas da matriz
 Σ : soma
 Π : produto

(2)

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

A^s: matriz produto das avaliações e do autovetor (*w*)

(3)

$$\lambda_{\max} = (1/n) \times (w'_1/w_1 + w'_2/w_2 + \dots + w'_n/w_n)$$

λ_{\max} : autovalor máximo da matriz recíproca

(4)

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

IC: Índice de Consistência (Tabela 1)

(5)

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

RC: Razão de Consistência (lógica do avaliador)
 IR: Índice Aleatório, calculado com base na Tabela 1

(6)

Tabela A1 – Valores de Índices Aleatórios do AHP

Quantidade de variáveis da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Índice Aleatório (IR)	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: adaptado de Liu e Lin (2016)

REFERÊNCIAS

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. Disponível em: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/view/51459>. Acesso em: 2 maio 2023.

ÁGOSTON, K. C.; CSATÓ, L. Inconsistency thresholds for incomplete pairwise comparison matrices. **Omega**, Amsterdam, v. 108, p. 1–7, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048321001857>. Acesso em: 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. Disponível em: <http://growingscience.com/beta/dsl/3138-incomplete-pairwise-comparative-judgments-recent-developments-and-a-proposed-method.html>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://publications.waset.org/10012207/fighter-aircraft-selection-using-technique-for-order-preference-by-similarity-to-ideal-solution-with-multiple-criteria-decision-making-analysis>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/6507>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1069495.pdf>. Acesso em: 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 em: <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 em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CEEEExArE/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 em: <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 em: <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 em: <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, Monterey, 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 em: <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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016119303243>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=ibm.2016.6428.6432>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://revistadaegn.com.br/index.php/revistadaegn/article/view/767>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/view/71618>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022249677900335>. Acesso em: 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. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.A35103>. Acesso em: 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 em: <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 em: <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 em: <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 em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-018-2769-3>. Acesso em: 2 maio 2023.