PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA BASEADO EM DESEMPENHO PARA APOIO À DECISÃO SEM ESPECIALISTAS

Luiz Octávio Gavião
Escola Superior de Guerra (ESG)
Fortaleza de São João - Av. João Luiz Alves, s/nº - Urca – Rio de Janeiro-RJ - CEP: 22291-090
E-mail: luiz.gaviao67@gmail.com

Pauli Adriano de Almada Garcia
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Des. Ellis Hermydio Figueira, 783 - Aterrado, Volta Redonda - RJ, CEP: 27213-145
E-mail: pauliadriano@gmail.com

Leandro da Silva Teixeira
Fundação Ezute
Rua do Rocio, 313, São Paulo, SP, CEP: 04552-000
E-mail: lsteixeira@ezute.org.br

Gilson Brito Alves Lima
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, São Domingos, Niterói-RJ, CEP: 24.220-240
E-mail: glima@id.uff.br

RESUMO

A opinião ou julgamento humano está sujeita a resultados que envolvem vieses, inconsistências, erros sistêmicos e distorções cognitivas. Esses aspectos podem conduzir a uma decisão tendenciosa, que se torna mais grave se o problema envolver processos da administração pública, trazendo consequências indesejáveis à sociedade ou prejuízos a terceiros. Aspectos político-estratégicos, econômicos, entre outros, já são levados em consideração em problemas relacionados à segurança e defesa do país; então, o resultado de um processo essencialmente técnico, baseado exclusivamente no desempenho dos sistemas de defesa considerados, adiciona um fator relevante para apoiar a decisão final. Este artigo propõe um modelo, fundamentado no AHP, que permite realizar essa avaliação, e é designado PB-AHP. O algoritmo proposto difere do AHP original por não recorrer a especialistas para as avaliações paritárias e oferece resultados determinísticos ou probabilísticos, dependendo do grau de incerteza e precisão que envolvam os dados de desempenho dos sistemas. O modelo foi aplicado em um problema de aquisição de defesa, para a escolha de uma viatura leve 4x4 para operações anfíbias. Os resultados permitiram ordenar os 17 modelos, com base em dados de catálogo.
PALAVRAS-CHAVE. AHP; Desempenho Técnico; Decisão Sem Especialistas; Aquisição em Defesa.
Tópicos: Sessão Especial 2: Poder Marítimo, Defesa e Pesquisa Operacional; D&SP – PO em Defesa

ABSTRACT

Human opinion or judgment is subject to outcomes that involve bias, inconsistencies, systemic errors, and cognitive distortions. These aspects can lead to a biased decision, which becomes more serious if the problem involves public administration processes, bringing undesirable consequences to society or damage to third parties. Political-strategic and economic aspects, among others, are already taken into account in problems related to the country's security and defense, so the result of an essentially technical process, based exclusively on the performance of defense systems, adds a relevant factor to support the final decision. This article proposes a model, based on the AHP and designated PB-AHP, that allows carrying out this evaluation. The proposed algorithm differs from the original AHP by not resorting to specialists for pairwise evaluations and offers deterministic or probabilistic results, depending on the degree of uncertainty and precision involving the systems performance data. The model was applied in a defense acquisition problem, for the choice of a light 4x4 vehicle for amphibious operations. The results allowed ordering the 17 models, based on catalog data.
KEYWORDS. AHP; Technical Performance; Decision Without Experts; Defense Acquisition.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

1. Introdução

O processo de tomada de decisão que envolve a opinião ou julgamento humano está sujeito a resultados que envolvem vieses, inconsistências, erros sistêmicos e distorções cognitivas [Abatecola et al. 2018; Hilbert 2012; Lovallo e Sibony 2006]. Se a decisão é de âmbito pessoal ou privado, um eventual erro nesse processo permanece restrito ao ambiente do tomador de decisão. Entretanto, se a escolha é pública, em benefício da sociedade, o ônus do erro pode trazer consequências indesejáveis ou prejuízos a terceiros.

Na indústria de defesa, eventuais erros na escolha de um sistema ou produto podem comprometer a segurança da população e o orçamento da União por período de tempo significativo, em decorrência dos largos prazos de desenvolvimento e construção [Clowney et al. 2016; Franck e Udis 2017]. De maneira geral, três atores exercem influência direta no processo de aquisição de defesa: os fabricantes que desenvolvem os sistemas, as Forças Armadas que os empregam e o Governo que alimenta o setor de defesa, através do fluxo financeiro de retorno às empresas e da organização do aparato militar para a segurança do país [Gholz e Sapolsky 2021]. Os interesses dessas partes no processo de aquisição podem enviesar as escolhas [Maser e Thompson 2011].

Nesse setor é comum a assessoria de especialistas na avaliação e emissão de pareceres que sustentem a escolha de um sistema de defesa em detrimento de outro [Kadish et al. 2006]. Entretanto, seria interessante ao Ministério da Defesa realizar uma avaliação dos produtos de defesa sem a intervenção humana no processo de escolha. O resultado essencialmente técnico dessa avaliação, fundamentado exclusivamente no desempenho "de fábrica" dos sistemas sob análise, pode trazer maior transparência, coerência e convergência à decisão final. Isto não impede outros julgamentos de cunho político-estratégico, econômico entre outros, naturais durante um processo de decisão dessa magnitude. Entretanto, conhecer e comparar o desempenho técnico dos sistemas pode auxiliar a decisão final, conferindo um contrapeso às interferências mencionadas.

Este artigo propõe um modelo de apoio à decisão sem a participação de especialistas, para identificar sistemas ou produtos de defesa com base em seus desempenhos técnicos. As características nominais (de fábrica) desses itens são geralmente apresentadas em eventos da indústria de defesa ou através de consultas diretas dos países interessados em sua aquisição. Esses dados também podem ser encontrados em catálogos, usados como referências técnicas pelo mercado de armamento. A tabulação dos sistemas de interesse e os desempenhos em suas respectivas características reúne a base de dados para a aplicação de um modelo de apoio à decisão multicritério [Almeida 2013; Gavião et al. 2017].

O modelo proposto não tem por finalidade ensejar a ideia de eliminação de especialistas no processo de apoio à decisão, mas contribuir para a decisão final, a partir de uma avaliação exclusiva ao desempenho técnico dos sistemas sob avaliação. Por exemplo, o modelo proposto poderia ser aplicado para qualificar as alternativas de sistemas e, em seguida, combiná-las com a opinião de especialistas e tomadores de decisão.

Entre os variados métodos de apoio à decisão, o Processo de Análise Hierárquica (AHP) tem sido o mais frequentemente usado na área de aquisição de defesa [Costa *et al.*, 2022]. O AHP se destaca entre os diversos métodos que apoiam à decisão multicritério por sua lógica simples e por incluir o cálculo de validação dos resultados, sendo indicado por [Abastante et al. 2019], [Agápito et al. 2015], [Balusa e Gorai 2019], [Costa *et al.*, 2022], como um dos métodos mais usuais em problemas dessa natureza. [Assis et al. 2022], [Camilo et al. 2020] e [Silva et al. 2010] exploraram o AHP para priorizar projetos aeroespaciais da Força Aérea Brasileira (FAB). [Salgado 2021] avaliou uma amostra de navios para pesquisa polar, em apoio ao Programa Antártico Brasileiro. [Hamurcu e Eren 2020] avaliaram modelos de aeronaves não tripuladas (UAV) para um processo de aquisição. Na Marinha Portuguesa, o AHP foi explorado para a priorização de projetos navais [Simplício et al. 2017]. Na Força Aérea do Paquistão, [Ali et al. 2017] aplicaram o AHP para a escolha de aeronaves de ataque. Na Coréia, [Kim e Lee 2019], na China [Wei e Shi 2022] e na Indonésia [Bimo et al. 2022], o AHP também foi aplicado no contexto da defesa. Em comum, esses trabalhos receberam o apoio de especialistas para as avaliações do AHP.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

No presente trabalho propõe-se um algoritmo de cálculo denominado "AHP baseado em desempenho (PB-AHP)". Com o intuito de demonstrar sua aplicabilidade, o PB-AHP foi aplicado num problema de escolha de uma viatura tática leve, entre 17 disponíveis em catálogo.

2. Revisão da Literatura

O AHP, criado por [Saaty 1980], é um método de apoio à decisão multicritério que depende de comparações par-a-par entre critérios, subcritérios e alternativas que compõem a estrutura do problema. O método propõe uma escala de nove pontos para essas avaliações, com base em percepções psicométricas para a comparação. Na ampla maioria das aplicações, o AHP recebe o apoio de especialistas para realizar as comparações par-a-par e formar a base inicial de dados para a modelagem do algoritmo. Uma variante do AHP com a lógica *fuzzy*, gerando modelos denominados "Fuzzy AHP", buscou lidar com a incerteza da decisão e o viés decorrente do julgamento humano, porém ainda era necessário recorrer à opinião de especialistas para a produção dos resultados [Chang 1996].

As buscas nas bases ISI Web of Science e SCOPUS, incluindo também o Google Scholar, utilizaram combinações de termos "*analytic hierarchy process*", "AHP", "*without expert*", associados a "*evaluation*", "*opinion*" ou "*judgement*", nos idiomas inglês e português, após a filtragem inicial de títulos e resumos, identificaram somente três publicações que abordavam o AHP com algum procedimento efetivo sem especialistas. Uma avaliação mais detalhada desses três trabalhos permitiu constatar que a ausência de especialistas ocorria apenas em parte do processo. Isto permitiu constatar que o modelo aqui proposto é integral nesse requisito, pois não utiliza qualquer julgamento de especialistas; inovador, pois a literatura é escassa em aplicações do AHP nessas condições; e relevante, porque o conhecimento de resultados essencialmente técnicos pode auxiliar a decisão final, permitindo empenhar recursos públicos com material de qualidade.

[Bulut et al. 2012] propuseram o Generic Fuzzy AHP (GF-AHP) com entradas numéricas diretas (ranqueamento das alternativas), sem consulta inicial a especialistas, embora ainda recorram a eles durante o processo. Além de julgamentos par-a-par, os especialistas indicaram o tempo de carreira e suas experiências profissionais, sendo considerados para priorizar suas opiniões, criando um parâmetro *lambda*. Os autores também argumentaram que existem problemas de preferência com variáveis capazes de designar a importância relativa entre as alternativas, sem a necessidade de comparação adicional (i.e. par-a-par nos moldes do AHP). Por exemplo, o resultado da análise financeira já permite avaliar um investimento, pois os resultados embutem a percepção de custo ou benefício. A maior taxa de retorno sobre o investimento indica diretamente a superioridade de uma estratégia em relação a outra. A pesquisa não abrange apenas escolhas de pares, mas também envolve detalhes de experiência no campo do negócio de transporte marítimo.

[Vats e Vaish 2014] aplicaram os métodos AHP e VIKOR para selecionar a temperatura ideal do processo de sinterização de cerâmica, com base em parâmetros piezoelétricos. Os autores abordaram o AHP sem especialistas, justificando que, no caso dos materiais, é possível avaliar o desempenho dos materiais com base exclusivamente em suas propriedades físicas, evidenciadas na literatura científica. Nove propriedades físicas foram associadas a critérios e seus valores ao desempenho de 4 alternativas, relacionadas às temperaturas de processamento (1060ºC, 1080ºC, 1100ºC e 1120ºC). A abordagem para transformar essa matriz de decisão (alternativas, critérios e valores de desempenho) em matrizes de avaliação par-a-par do AHP foi simples e lógica, sendo aqui adaptada, conforme a Seção 3. Entretanto, [Vats e Vaish 2014] ainda recorreram a especialistas, para avaliarem o peso dos critérios com a técnica MDL, desenvolvida por [Dehghan-Manshadi et al. 2007] e posterior modelagem do VIKOR.

[Szűts e Krómer 2015] propuseram uma abordagem do Fuzzy AHP sem especialistas, denominada Hybrid Fuzzy AHP, justificando essa ausência em decorrência da elevada quantidade de critérios e subcritérios para resolver um problema da indústria de construção civil, que exigiria 90 julgamentos por avaliador. Assim, esse esforço foi transferido para sistemas de inferência *fuzzy*, elaborados no software MatLab, utilizando como base a estrutura hierárquica estabelecida ao problema. Entretanto, ainda foi necessária a participação de um conjunto de especialistas para realizar as avaliações par-a-par no nível dos critérios, para definir seus pesos.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Outro trabalho encontrado também explorou o AHP sem recorrer a especialistas "humanos", porém simulou suas avaliações através de algoritmo, sendo então descartado para análise em função do propósito desta pesquisa [Kozłowska et al. 2022].

Recentemente, [Dos Santos *et al.*, 2021] desenvolveram o AHP-Gaussiano, que admite o apoio à decisão sem a ponderação de especialistas através das avaliações paritárias do AHP. Esse modelo tem recebido aplicações em diferentes áreas desde então, que incluem a própria área de defesa [Dos Santos *et al.*, 2021; Soares *et al.*, 2022], avaliação de sensores [Pereira *et al.*, 2023], entre outras aplicações [Barroso, 2022]. Em comum com a proposta do PB-AHP aqui apresentada, destacam-se três aspectos: (1) a estruturação hierárquica do problema; (2) o uso de técnica objetiva para a atribuição de pesos aos critérios, fundamentada exclusivamente nos dados da matriz de decisão, sendo usada no PB-AHP a Entropia, conforme descrito em [Pomerol and Barba-Romero, 2012], e no AHP-Gaussiano o "fator gaussiano", que de fato é o Coeficiente de Variação (CV) proposto por Karl Pearson [Kvålseth, 2017], que mensura a variabilidade através da razão entre o desvio-padrão e a média dos dados; (3) ambos não necessitam da escala de nove pontos de Saaty para gerar seus resultados. Entretanto o PB-AHP mantém a fidelidade a alguns pilares da teoria do AHP, que incluem o uso da comparação paritária entre as alternativas do problema (conforme a Equação (6) da Seção 3.1), explorando a abordagem de [Vats e Vaish 2014], os cálculos dos pesos finais das alternativas por autovetores (conforme a Equação (7) da Seção 3.1), e a indicação da razão de consistência do processo sem especialistas (conforme a Equação (11) da Seção 3.1). Além disso, o PB-AHP permite a geração de resultados determinísticos ou probabilísticos, dependendo da precisão e confiabilidade dos dados de catálogo, relatórios ou de mercado dos sistemas avaliados.

3. Procedimentos de Cálculo do PB-AHP

A metodologia do PB-AHP envolve três etapas. A 1ª Etapa consiste na coleta de dados, que são organizados em uma matriz de decisão (M). As linhas e colunas desta matriz são compostas, respectivamente, pelas alternativas do problema e pelos critérios de avaliação, conforme a Equação (1). Os valores internos da matriz correspondem às medidas de desempenho de cada alternativa em cada critério, obtidos a partir de catálogos, em registros de outros documentos técnicos ou mesmo na literatura científica, sem considerar julgamentos de especialistas sobre os valores de desempenho. Para o caso de critérios inversamente proporcionais, em que o maior valor absoluto deprecia a tomada de decisão, é necessário inverter os valores desse critério na matriz de decisão. Por exemplo, ao invés de considerar o desempenho "25", para uma alternativa nesse tipo de critério, considera-se "1/25".

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{, em que } i \in \{1, 2, \dots, m\} \text{ e } j \in \{1, 2, \dots, n\} \qquad (1)$$

A 2ª Etapa envolve a aplicação do algoritmo, para a ordenação das alternativas. O aplicativo "*Performance-based AHP*" está disponível em acesso aberto na base "*zenodo.org*" [Gavião, 2023]. O aplicativo permite o cálculo dos resultados por duas funções em código R, dependendo do grau de incerteza ou imprecisão dos dados. Para menor grau de incerteza, deve-se usar a função "*AHP.Perf.Exac*", que considera os dados de desempenho como valores exatos. Para maior grau de incerteza, deve-se usar a função "*AHP.Perf.Prob*", que considera os dados coletados como valores mais prováveis (modas) de distribuições triangulares. Na 3ª Etapa, os resultados são analisados.

3.1 Descrição da função "*AHP.Perf.Exac*"

A função realiza os cálculos em quatro passos: (1) geração dos pesos dos critérios, (2) geração das matrizes par-a-par; (3) cálculos do AHP; (4) pesos finais das alternativas.

No 1º Passo, os pesos (w) dos critérios da matriz de decisão são obtidos através do conceito de entropia (E), proposto por [Zeleny 1982], a partir da teoria da informação de [Shannon 1949].

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Sua ideia era utilizar exclusivamente os dados, sem julgamentos de especialistas, para determinar os pesos de forma objetiva. Ele recorreu ao princípio da entropia, associando o maior peso ao critério que apresenta a maior dispersão nas avaliações das alternativas. Assim, os critérios mais importantes são aqueles que têm o maior poder de discriminação entre as alternativas. A sequência de cálculos desse passo envolve a normalização da matriz de decisão (Equação 2), o cálculo da entropia (Equação 3), cálculo da medida de dispersão (D) (Equação 4) e definição dos pesos (p) com a normalização das dispersões (Equação 5). Essas equações foram apresentadas por [Pomerol e Barba-Romero 2012].

$$a_{ij} = a_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{m} a_{ij} \tag{2}$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} a_{ij} . \log(a_{ij}) \quad \text{, em que } k \text{ é a constante } k = 1/\log(m) \tag{3}$$

$$D_j = 1 - E_j \tag{4}$$

$$p_j = D_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} D_j \tag{5}$$

No 2º Passo, os dados de cada critério da matriz de decisão (M) são transformados em uma matriz par-a-par (M'), através da divisão de cada elemento-linha pelo elemento-coluna correspondente, conforme o procedimento proposto por [Vats e Vaish 2014]. A Equação (6) ilustra esse procedimento para o j-ésimo critério.

$$M_j^{'} = \begin{bmatrix} 1 & a_1/a_2 & \dots & a_1/a_m \\ a_2/a_1 & 1 & \dots & a_2/a_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_m/a_1 & a_m/a_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

No 3º Passo, o AHP é calculado para cada matriz M' gerada no passo anterior, com base na técnica de autovetores e autovalores como em [Liu e Lin 2016]. Nessa etapa são gerados os pesos (w) das alternativas em cada critério, conforme a Equação (7). As razões de consistência do AHP, que originalmente avaliam a consistência lógica das avaliações de especialistas, conforme as Equações (8) a (11), foram aqui mantidas para efeito de comparação com eventuais usos do AHP em processos subsequentes, que recorram a especialistas.

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij} \right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n} \left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij} \right)^{1/n}} \quad , m = n \tag{7}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

$$A^s = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1' \\ w_2' \\ \vdots \\ w_n' \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\lambda_{\max} = (1/n) \times (w_1'/w_1 + w_2'/w_2 \cdots + w_n'/w_n) \quad (9)$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (10)$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (11)$$

As notações matemáticas nessas equações indicam:

A: matriz de valores paritários da base de dados
A^s: matriz produto dos valores paritários e pesos
a_{ij}: valor paritário gerado a partir da base de dados (2º Passo do modelo proposto)
w_i: autovetor das alternativas
$\sum$: *soma*
$\prod$: produto
λ_{max}: autovalor máximo da matriz recíproca
IC: Índice de Consistência
RC: Razão de Consistência
IR: Índice Aleatório, calculado com base na tabela de referência com a razão da matriz

Tabela 1 – Valores de Índices Aleatórios do AHP

Razão da matriz (quantidade de variáveis)	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: [Saaty 1980].

No 4º Passo, a multiplicação matricial dos resultados do 1º Passo (pesos dos critérios - *p*) e do 3º Passo (pesos do AHP por critério - *w*) gera os pesos finais (*r*) das alternativas, conforme a Equação (12).

$$R_i = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{m1} & \dots & w_{mn} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \dots \\ r_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 Descrição da função "*AHP.Perf.Prob*"

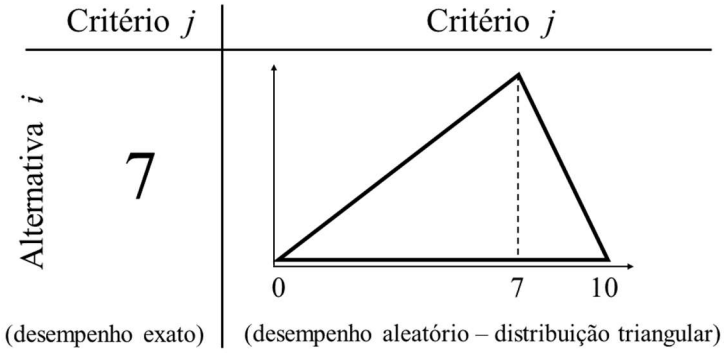
Essa função aplica os mesmos passos da Seção 3.1, adicionando um procedimento entre o 1º e o 2º passo. Antes de gerar a matriz *M´*, já descrita na Equação (6), as avaliações da matriz inicial de decisão (*M*) são convertidas em probabilidades, com base na Composição Probabilística de Preferências (CPP) (Sant'Anna, 2015). Esse método de apoio à decisão multicritério tem sido amplamente explorado na Pesquisa Operacional para a solução de problemas que envolvem a incerteza em relação à base de dados, seja pela imprecisão das fontes ou do processo de coleta, da variância dos desempenhos das alternativas diante de diferentes cenários, entre outros aspectos que

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

permitam assumir que as avaliações das alternativas não são valores exatos e constantes [Gavião et al. 2019, 2021].

Nesse procedimento intermediário são realizados os dois passos iniciais do CPP. Primeiramente, os dados da matriz de decisão (*M*) são assumidos como as modas de uma distribuição de probabilidade, representando os valores mais frequentes, porém variáveis. Uma distribuição usual no CPP é a triangular, exigindo apenas dois parâmetros adicionais para defini-la, no caso o valor mínimo e o máximo da amostra de dados, que estão presentes na matriz M. A Fig. 1 ilustra a transformação de um dado de desempenho na distribuição triangular correspondente, que recebe a denominação de randomização dos dados. Os parâmetros mínimo e máximo da distribuição triangular são extraídos da amostra de dados de desempenho das alternativas em cada critério, aqui ilustrados pelos valores "0" e "10", respectivamente.

Fig. 1 – Randomização dos dados



Em seguida, são calculadas as probabilidades de cada alternativa ser superior em relação às demais, em cada critério (*PMax*). A Equação (13) define o valor das probabilidades, em que a notação *F* indica a função cumulativa (*cdf*) e *f* a função densidade (*pdf*) da distribuição triangular. O índice (*i*) representa a alternativa que se deseja calcular a *PMax* e o índice (*-i*) as demais alternativas no mesmo critério *j*. As funções *cdf* e *pdf* da distribuição triangular podem ser importadas do R-package "*triangle*" [Carnell 2022] ou "*EnvStats*" [Millard 2013]. A requisição das bibliotecas necessárias ao cálculo já se encontra no código do algoritmo.

$$PMax_{ij} = \int \left[\prod F_{-i}(x) \right] f_i(x) dx \tag{13}$$

4. Aplicação e Resultados

As funções apresentadas foram aplicadas para a ordenação de preferências de uma amostra de 17 viaturas táticas leves 4x4, para um cenário de emprego em operações anfíbias, do Corpo de Fuzileiros Navais. O catálogo *Jane´s Land Warfare Platform* apresenta diversas características técnicas dos fabricantes, compondo os critérios da Tabela 2 e os respectivos dados de desempenho da Tabela 3. As designações das viaturas são numéricas, para manter a confidencialidade dos fabricantes e seus modelos. Embora o catálogo consultado apresente maior quantidade de viaturas, somente as 17 viaturas listadas apresentaram os dados completos nos critérios e subcritérios indicados.

Os três subcritérios relacionados ao embarque e carregamento em navios ou aeronaves possuem impacto negativo, ou seja, quanto menor o valor absoluto da viatura no critério, melhor para as operações anfíbias, pois melhoram as condições de embarque e carregamento. Assim, por ocasião da modelagem no software R, as três colunas iniciais de dados na Tabela 3 precisam ser invertidas, para que os menores valores numéricos sejam os mais representativos ao algoritmo. A negativação desses critérios, ao invés da inversão dos valores, não pode ser aplicada somente na função *AHP.Perf.Exac*, porque o algoritmo realiza a divisão desses valores durante o processo de cálculo, o que anula o efeito da negativação dos valores. A função *AHP.Perf.Prob* é indiferente aos dois procedimentos de ajuste da escala, tanto por inversão quanto por negativação.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Tabela 2: critérios e subcritérios

CRITÉRIOS	SUBCRITÉRIOS	DESCRIÇÃO
Embarque e Carregamento	Área da Viatura	Área, em metros quadrados (m2), ocupada pela viatura na área de embarque em navios ou aeronaves, correspondendo ao produto do comprimento pela largura. Aqui não se considera o Fator de Quebra de Estiva, apenas a área efetivamente ocupada pela viatura. Quanto menor essa medida, melhor ao embarque e carregamento.
	Peso sem carga	Peso, em quilogramas (kg), da viatura sem carga. Quanto menor essa medida, melhor ao embarque e carregamento em navios ou aeronaves.
	Diâmetro de Giro	Medida, em metros (m), do menor espaço necessário para a viatura fazer uma mudança de sentido (180 graus). Quanto menor essa medida, melhor ao embarque e carregamento em navios ou aeronaves.
Mobilidade e Apoio Tático	Capacidade de Carga	Capacidade de carga transportada pela viatura, medida em quilogramas (kg). Quanto maior essa medida, melhor à mobilidade e apoio tático nas operações militares.
	Velocidade Máxima	Velocidade máxima atingida pela viatura em testes, medida em km/h. Quanto maior essa medida, melhor à mobilidade e apoio tático nas operações militares.
	Capacidade do Tanque	Capacidade do tanque de combustível da viatura, em litros (l). Quanto maior essa medida, melhor à mobilidade e apoio tático nas operações militares.
Transposição de Obstáculos	Vau da Viatura	Medida em metros (m) que representa o limite de transposição da viatura em um curso d´água. Quanto maior essa medida, melhor à transposição de obstáculos nas operações militares.
	Ângulo de Aproximação	Medida em graus que indica o limite do ângulo de ataque de uma viatura em uma rampa. Quanto maior essa medida, melhor à transposição de obstáculos nas operações militares.
	Ângulo de Saída	Medida em graus que indica o limite do ângulo de fuga de uma viatura em uma rampa. Quanto maior essa medida, melhor à transposição de obstáculos nas operações militares.
	Inclinação máxima	Medida em percentual (%) que indica o limite de inclinação lateral de uma rampa para o deslocamento ou estacionamento seguro da viatura. Quanto maior essa medida, melhor à transposição de obstáculos nas operações militares.
	Gradiente máximo	Medida em percentual (%) que indica o limite de inclinação frontal de uma rampa para o deslocamento ou estacionamento seguro da viatura. Quanto maior essa medida, melhor à transposição de obstáculos nas operações militares.

Fontes: Brasil [2009, 2015].

Tabela 3: dados originais de desempenho técnico

Critérios	Embarque e Carregamento			Mobilidade e Apoio Tático			Transposição de Obstáculos				
Subcritérios	Área	Peso s/ carga	Diâmetro giro	Carga	Veloc Max	Tanque	Vau	Ângulo Aprox	Ângulo Saída	Inclinação	Gradiente
Medida	m2	kg	m	kg	km/h	l	m	grau	grau	%	%
Vtr 1	7,08	2580	5,7	700	138	96	0,6	39	34	56	80
Vtr 2	7,25	1960	6	500	124	100	0,6	64	52	30	60
Vtr 3	6,98	1610	5,14	540	115	53	0,51	41	32	40	60
Vtr 4	11,49	5800	8	1000	130	80	0,76	60	45	40	60
Vtr 5	10,61	3500	7,56	2000	130	110	0,75	74	47	60	70
Vtr 6	8,65	2223	6,2	1141	140	83,3	0,762	42	29	45	60
Vtr 7	9,87	2416	7,62	1077	105	94,63	0,762	72	45	40	60
Vtr 8	9,96	2440	7,62	1134	113	94,63	0,762	72	45	40	60
Vtr 9	10,55	2676	7,62	1996	113	94,63	0,762	54	38	40	60
Vtr 10	10,90	2903	7,62	2313	113	94,63	0,762	46	41	40	60
Vtr 11	10,90	4447	7,62	1043	113	94,63	0,762	45	35	40	60
Vtr 12	7,92	1900	5,9	810	115	65	0,3	40	23	33	65
Vtr 13	13,47	3300	6,6	2500	180	197	0,61	25	33	80	80
Vtr 14	9,80	2900	6	1500	100	90	0,75	40	40	30	60

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Vtr 15	10,55	6200	7,15	900	110	90	0,85	54	44	30	60
Vtr 16	10,25	3000	6,2	4000	110	90	0,75	40	38	30	60
Vtr 17	8,15	2450	5,75	1400	120	145	0,7	40	45	100	100

Fonte: Connors et al. [2019].

A multiplicação matricial dos pesos pelos resultados de cada viatura produziu o ordenamento final, conforme a Tabela 4. A soma dos rankings dos resultados das funções permite identificar o resultado conjunto das duas abordagens. Esse procedimento equivale ao método de Borda e pode auxiliar na avaliação global [Gavião et al. 2016]. Cabe aqui destacar que a avaliação do grau de incerteza dos dados coletados deve ser o principal orientador para a escolha do modelo determinístico ou probabilístico, sendo o método de Borda apenas um auxílio ao resultado em conjunto.

As viaturas 16, 13, 17 e 5 se destacaram das demais, conforme indicam os resultados nos dois modelos e na soma final. Esse resultado foi obtido sem qualquer interferência de julgamento nas avaliações. Independentemente da interferência de fatores político-estratégicos, econômicos, entre outros, na escolha final para a aquisição, essa referência técnica pode orientar a tomada de decisão para manter coerência com o melhor desempenho e buscar uma convergência na aplicação de recursos da União.

Tabela 4 – ordenamento final

Viaturas Leves 4x4	Resultado Determinístico	Ordem	Resultado Probabilístico	Ordem	Soma dos Rankings	Resultado Conjunto
Vtr 1	0,05032	11	0,04500	10	21	9º lugar
Vtr 2	0,04751	14	0,05709	6	20	8º lugar
Vtr 3	0,04591	15	0,07134	4	19	7º lugar
Vtr 4	0,04753	13	0,03803	16	29	13º lugar
Vtr 5	0,07163	4	0,06495	5	9	3º lugar
Vtr 6	0,05427	10	0,04084	13	23	10º lugar
Vtr 7	0,05533	8	0,05251	8	16	5º lugar
Vtr 8	0,05613	7	0,05273	7	14	4º lugar
Vtr 9	0,06536	6	0,04430	11	17	6º lugar
Vtr 10	0,06863	5	0,04703	9	14	4º lugar
Vtr 11	0,04787	12	0,03475	17	29	13º lugar
Vtr 12	0,04535	16	0,04172	12	28	12º lugar
Vtr 13	0,08247	2	0,09328	3	5	2º lugar
Vtr 14	0,05444	9	0,03808	15	24	11º lugar
Vtr 15	0,04419	17	0,04056	14	31	14º lugar
Vtr 16	0,08957	1	0,13630	1	2	1º lugar
Vtr 17	0,07349	3	0,10150	2	5	2º lugar

4. Conclusão

O artigo teve por finalidade propor um modelo, fundamentado no AHP, que permita realizar uma avaliação essencialmente técnica de alternativas, sem a intervenção de especialistas. O algoritmo proposto realiza avaliações determinísticas ou probabilísticas, dependendo do grau de incerteza e precisão que envolvem os dados de desempenho dos sistemas. O modelo foi aplicado em um problema de aquisição de defesa, para a escolha de uma viatura leve 4x4 para operações anfíbias. Os resultados permitiram ordenar os 17 modelos, com base em dados de catálogo.

A proposta foi considerada inédita na literatura sobre o AHP e relevante para o apoio à decisão. A opinião ou julgamento humano está sujeita a resultados que envolvem vieses, inconsistências, erros sistêmicos e distorções cognitivas. Esses aspectos podem conduzir a uma decisão tendenciosa, que se torna mais grave se o problema envolver processos da administração pública, trazendo consequências indesejáveis à sociedade ou prejuízos a terceiros. Aspectos político-estratégicos, econômicos, entre outros já são levados em consideração em problemas relacionados à segurança e defesa do país; então, o resultado de um processo essencialmente técnico,

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

baseado exclusivamente no desempenho dos sistemas de defesa considerados, adiciona um fator relevante para apoiar a decisão final.

Entre as limitações visualizadas nessa proposta, destaca-se um aspecto comum a outros processos de apoio à decisão baseados em modelos matemáticos, no que se refere à possibilidade de embutir erros associados à definição dos limites do sistema e a parâmetros de entrada. Nesses casos, a maior dificuldade se concentra na reunião da base de dados dos sistemas de defesa, pois é possível que certos atributos de desempenho não sejam disponíveis para a coleta ou mesmo estejam restritos somente a resultados de testes de campo ou laboratório do fabricante, sem a devida publicação nos catálogos de defesa. Em paralelo, é também possível questionar a veracidade dos dados oferecidos por fabricantes que desejam comercializar seus produtos de defesa, porém, para mitigar esse aspecto, a proposta oferece um modelo probabilístico que lida com a incerteza da base inicial de dados.

Entre os aspectos que podem gerar aperfeiçoamentos à pesquisa, destaca-se a técnica de cálculo dos pesos dos critérios. O PB-AHP explorou o conceito de entropia e o AHP-Gaussiano o coeficiente de variação, porém diversas medidas de desigualdade podem ser utilizadas e comparadas, a exemplo do Coeficiente de Gini. É também possível avaliar o grau de precisão dos dados de catálogo e aplicar um fator para compor um resultado final ponderado, considerando parcelas dos resultados determinísticos e probabilísticos. Por fim, outros tipos de densidades de probabilidade podem ser adaptados às funções em código R, ao invés das distribuições triangulares aqui utilizadas, para fins de simplificação.

Referências

Abastante, F., Corrente, S., Greco, S., Ishizaka, A. and Lami, I.M. (2019), "A new parsimonious AHP methodology: assigning priorities to many objects by comparing pairwise few reference objects", *Expert Systems with Applications*, Elsevier, Vol. 127, pp. 109–120.

Abatecola, G., Caputo, A. and Cristofaro, M. (2018), "Reviewing cognitive distortions in managerial decision making: toward an integrative co-evolutionary framework", *Journal of Management Development*, Emerald Publishing Limited, Vol. 37 No. 5, pp. 409–424, doi: https://doi.org/10.1108/JMD-08-2017-0263.

Agápito, A. de O., Vianna, D.S., Candido, L.A., Meza, E.B.M. and Vianna, M. de F.D. (2015), "Utilização do método de análise hierárquica (ahp) como ferramenta de auxílio multicritério no processo de decisão de priorização de projetos de ciência, tecnologia e inovação na Amazônia azul", *XVIII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística Da Marinha*, Marinha do Brasil, Rio de Janeiro-RJ, pp. 1–10.

Ali, Y., Asghar, A., Muhammad, N. and Salman, A. (2017), "Selection of a fighter aircraft to improve the effectiveness of air combat in the war on terror: Pakistan Air Force-a case in point", *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 9 No. 2, pp. 244–273.

Almeida, A.T. de. (2013), *Processo de Decisão Nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*, 1st ed., Editora Atlas S.A., São Paulo.

Assis, S.R. de, Gavião, L.O., Kostin, S. and Lima, G.B.A. (2022), "Prioritizing flight simulators of the brazilian air force by the analytic hierarchy process and hypothesis tests", *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, Brasilian Journal of Operations & Production Management, Vol. 19 No. 4, pp. 1–19.

Balusa, B.C. and Gorai, A.K. (2019), "Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision-making model in selection of underground metal mining method", *Journal of Sustainable Mining*, Elsevier, Vol. 18 No. 1, pp. 8–17.

Barroso, D. (2022), "Método AHP (Analytic Hierarchy Process-Gaussiano) na determinação de aquisição de um aparelho celular", *Revista Eletrônica Ciência & Tecnologia Futura*, Vol. 1 No. 1.

Bimo, E.A., Prabawa, E., Sembiring, E.K., Ramsi, O., Sjamsoeddin, S., Yusgiantoro, P. and Midhio, I.W. (2022), "The Application of AHP and PESTEL-SWOT analysis on the study of military amphibious aircraft acquisition decision making in Indonesia", *Technium Social*

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Sciences Journal, Vol. 27, pp. 837–853.
Brasil. (2009), *C 20-1 - Glossário de Termos e Expressões Para Uso No Exército*, 4th ed., Exército Brasileiro, Brasília, DF.
Brasil. (2015), *MD35-G-01 - Glossário Das Forças Armadas*, 5th ed., Ministério da Defesa - Estado-Conjunto das Forças Armadas, Brasilia-DF.
Bulut, E., Duru, O., Keçeci, T. and Yoshida, S. (2012), "Use of consistency index, expert prioritization and direct numerical inputs for generic fuzzy-AHP modeling: A process model for shipping asset management", *Expert Systems with Applications*, Elsevier, Vol. 39 No. 2, pp. 1911–1923.
Camilo, J.A.P., Gavião, L.O. and Kostin, S. (2020), "Priorização de projetos do segmento espacial por processo de análise hierárquica", *Revista Brasileira de Estudos de Defesa*, Vol. 7 No. 1.
Carnell, R. (2022), "Package 'triangle': Distribution Functions and Parameter Estimates for the Triangle Distribution", R Core Team, Columbus.
Chang, D.-Y. (1996), "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", *European Journal of Operational Research*, Elsevier, Vol. 95 No. 3, pp. 649–655.
Clowney, P., Dever, J. and Stuban, S. (2016), "Department of Defense Acquisition Program TERMINATIONS: Analysis of 11 Program Management Factors.", *Defense Acquisition Research Journal: A Publication of the Defense Acquisition University*, Vol. 23 No. 3.
Connors, S.C., Rovery, M. and Hawkes, J. (2019), *IHS Jane's Land Warfare Platforms: Artillery & Air Defence*, IHS Jane's, IHS Global Limited.
Costa, I.P. de A., Costa, A.P. de A., Sanseverino, A.M., Gomes, C.F.S. and Santos, M. dos. (2022), "Bibliometric studies on multi-criteria decision analysis (MCDA) methods applied in military problems", *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, Vol. 42, pp. 1–26.
Dehghan-Manshadi, B., Mahmudi, H., Abedian, A. and Mahmudi, R. (2007), "A novel method for materials selection in mechanical design: combination of non-linear normalization and a modified digital logic method", *Materials & Design*, Elsevier, Vol. 28 No. 1, pp. 8–15.
Franck, R. and Udis, B. (2017), "Quarrelsome committees in US defense acquisition: the KC-X case", *Defence and Peace Economics*, Taylor & Francis, Vol. 28 No. 3, pp. 344–366.
Gavião, L.O. (2023), "Performance-based AHP. Version 3.0", Zenodo.org, Niteroi.
Gavião, L.O., Ferraz, F.T., Lima, G.B.A. and Sant'Anna, A.P. (2016), "Assessment of the 'Disrupt-O-Meter' model by ordinal multicriteria methods", *RAI Revista de Administração e Inovação*, Vol. 13 No. 4, pp. 305–314, doi: 10.1016/j.rai.2016.05.002.
Gavião, L.O., Meza, L.A., Lima, G.B.A., Sant'Anna, A.P. and Soares de Mello, J.C.C.B. (2017), "Improving discrimination in efficiency analysis of bioethanol processes", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 168, pp. 1525–1532, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.020.
Gavião, L.O., Sant'Anna, A.P., Garcia, P.A. de A., Silva, L.C., Kostin, S. and Lima, G.B.A. (2021), "Multi-criteria decision support to criminology by Graph Theory and Composition of Probabilistic Preferences", *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, Vol. 41, pp. 1–44.
Gavião, L.O., Sant'Anna, A.P., Lima, G.B.A., de Almada Garcia, P.A., Kostin, S. and Asrilhant, B. (2020), "Selecting a cargo aircraft for humanitarian and disaster relief operations by multicriteria decision aid methods", *IEEE Transactions on Engineering Management*, IEEE, Vol. 67 No. 3, pp. 631–640.
Gholz, E. and Sapolsky, H.M. (2021), "The many lines of defense: The political economy of US defense acquisition", *Journal of Global Security Studies*, Oxford University Press, Vol. 6 No. 1, pp. 1–10.
Hamurcu, M. and Eren, T. (2020), "Selection of Unmanned Aerial Vehicles by Using Multicriteria Decision-Making for Defence", *Journal of Mathematics*, Hindawi, Vol. 2020.
Hilbert, M. (2012), "Toward a synthesis of cognitive biases: how noisy information processing can bias human decision making.", *Psychological Bulletin*, American Psychological Association, Vol. 138 No. 2, p. 211.
Kadish, R.T., Abbott, G., Cappuccio, F., Hawley, R., Kern, P. and Kozlowski, D. (2006), *Defense Acquisition Performance Assessment Report*, Office of the Deputy Secretary of Defense, Washington, DC.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774

Kim, J.-H. and Lee, H.-J. (2019), "A study on selection of R&D supervision institution of weapon systems using Delphi and AHP", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 20 No. 10, pp. 179–186.

Kozłowska, J., Benvenga, M.A. and Nääs, I. de A. (2022), "Investment Risk and Energy Security Assessment of European Union Countries Using Multicriteria Analysis", *Energies*, MDPI, Vol. 16 No. 1, p. 330.

Kvålseth, T.O. (2017), "Coefficient of variation: the second-order alternative", *Journal of Applied Statistics*, Taylor & Francis, Vol. 44 No. 3, pp. 402–415.

Liu, C.H. and Lin, C.-W.R. (2016), "The Comparative of the AHP Topsis Analysis Was Applied for the Commercialization Military Aircraft Logistic Maintenance Establishment", *International Business Management*, Vol. 10 No. 4, pp. 6428–6432.

Lovallo, D.P. and Sibony, O. (2006), "Distortions and deceptions in strategic decisions", *McKinsey Quarterly*, MCKINSEY & CO INC, Vol. 1, p. 18.

Maser, S.M. and Thompson, F. (2011), *Mitigating Spirals of Conflict in DOD Source Selections*, Defense Acquisition University, Fort Belvoir.

Millard, S.P. (2013), *EnvStats: An R Package for Environmental Statistics*, 2nd ed., Springer, Seattle.

Pereira, R.C.A., da Silva Jr, O.S., de Mello Bandeira, R.A., Dos Santos, M., de Souza Rocha Jr, C., Castillo, C.D.S., Gomes, C.F.S., *et al.* (2023), "Evaluation of smart sensors for subway electric motor escalators through AHP-Gaussian method", *Sensors*, MDPI, Vol. 23 No. 8, pp. 1–24.

Pomerol, J.-C. and Barba-Romero, S. (2012), *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*, Springer, New York.

Saaty, T.L. (1980), "The Analytic Hierarchy Process-Planning, Priority Setting, Resource Allocation", McGraw-Hill, Basel.

Salgado, F.A.S. (2021), *Proposta de Modelo Para Seleção de Navios de Pesquisa Antártica Por Método AHP-TOPSIS e Planejamento Baseado Por Capacidades*, Brazilian War College.

Sant'Anna, A.P. (2015), *Probabilistic Composition of Preferences, Theory and Applications*, 1st ed., Springer, New York.

Dos Santos, M., de Araújo Costa, I.P. and Gomes, C.F.S. (2021), "Multicriteria decision-making in the selection of warships: a new approach to the AHP method", *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 13 No. 1, pp. 147–169.

Shannon, C.E. (1949), "Communication theory of secrecy systems", *Bell System Technical Journal*, Wiley Online Library, Vol. 28 No. 4, pp. 656–715.

Silva, A.C., Belderrain, M.C.N. and Pantoja, F.C.M. (2010), "Prioritization of R&D projects in the aerospace sector: AHP method with ratings", *Journal of Aerospace Technology and Management*, SciELO Brasil, Vol. 2, pp. 339–348.

Simplício, R., Gomes, J. and Romão, M. (2017), "Projects selection and prioritization: a Portuguese Navy pilot model", *Procedia Computer Science*, Elsevier, Vol. 121, pp. 72–79.

Soares, L. de M.B., dos Santos, R.N. and dos Santos, M. (2022), "AHP-Gaussian aligned with Value Focused Thinking for strategical decision making in Brazilian Airforce load plane purchasing", *XXIII International Symposium of Mathematical Methods Applied to Sciences*.

Szűts, A. and Krómer, I. (2015), "Developing a fuzzy analytic hierarchy process for choosing the energetically optimal solution at the early design phase of a building", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 12 No. 3, pp. 25–39.

Vats, G. and Vaish, R. (2014), "Selection of optimal sintering temperature of K0. 5Na0. 5NbO3 ceramics for electromechanical applications", *Journal of Asian Ceramic Societies*, Elsevier, Vol. 2 No. 1, pp. 5–10.

Wei, H. and Shi, J. (2022), "Contractor Selection for Defense Acquisition with Advanced Many-to-One Stable Matching Model", *2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, pp. 1872–1878.

Zeleny, M. (1982), *Multi Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174774
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174774