

Decisão Estruturada para Aquisição de SARP de Ataque: Um Estudo com Apoio Multicritério

Douglas Estevam Casale¹, Rafaela Campos da Silva¹, Renato Carvalho Santos Gomes da Silva¹, Diego Serra Azul Albuquerque², Marcelo Henrique Doerflinger Carvalho³, Dante Ricardo Ambrosio¹, Luís Eduardo Vergueiro Loures da Costa¹, Moacyr Machado Cardoso Júnior¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Secretaria da Fazenda do Rio Grande do Sul (SEFAZ-RS), Porto Alegre/RS – Brasil

³Comando de Aviação do Exército (CAvEx), Taubaté/SP – Brasil

Resumo – Este artigo propõe a aplicação do método AHP para definir a opção de SARP de ataque (reutilizável ou “munição vagante”) que melhor atenda à Aviação do Exército. Os resultados mostraram que a utilização do método estruturado de Apoio Multicritério à Decisão ampliou a possibilidade de acerto na escolha do SARP reutilizável como solução de melhor compromisso para o problema determinado, em virtude, essencialmente, de sua pontuação referente ao critério *operacionalidade*, embora auferido pontuação inferior nos critérios *logística* e *confiabilidade e vulnerabilidade* em relação à alternativa do tipo “munição vagante”.

Palavras-Chave – AHP, Apoio Multicritério à Decisão, Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) têm recebido grande atenção recentemente devido a seu emprego bem-sucedido em combate, como foi observado nos conflitos de Nagorno-Karabakh e entre a Rússia e a Ucrânia. De maneira geral, o SARP é composto por uma ou mais Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP); da Estação de Controle de Solo (ECS, que permite que os pilotos controlem as aeronaves); do Terminal de Transmissão de Dados (TTD, com os equipamentos para o enlace entre as ARP e a ECS); do Terminal de Enlace de Dados (TED, com os equipamentos para fazer o enlace com o sistema de Comando e Controle, podendo estar separado ou incluído na ECS ou TTD); da Infraestrutura de Apoio, com os recursos para lançar, recuperar, gerar energia, prover o suporte logístico e treinar os recursos humanos) [1].

Dentre as possíveis aplicações para os SARP, se destacam as missões de inteligência, vigilância, reconhecimento, identificação de alvos e ataque. Uma rede de SARP pode ainda ser usada como conjunto de antenas repetidoras para auxiliar no enlace de dados entre tropas muito avançadas no terreno ou em locais inóspitos, embora apresente certas vulnerabilidades e desvantagens (maior vulnerabilidade e suscetibilidade à interferência inimiga, entre outras) em relação a uma constelação de pequenos satélites nessa aplicação [2].

Em um processo de aquisição de SARP com capacidade de ataque, uma das decisões importantes que devem ser tomadas é se as ARP serão reutilizáveis ou se serão do tipo “munição vagante” (*loitering munition*), que detonam contra os alvos, sendo destruídos no processo. Essa única decisão muda de maneira substancial a forma de emprego dos SARP (uma única ARP reutilizável pode engajar múltiplos alvos e permanecer em missões de reconhecimento mesmo após haver disparado todos os seus mísseis), e tem impacto em vários pontos do projeto, tais como custo máximo viável por SARP (em uma ARP “descartável” em geral buscar-se-á reduzir ainda mais os custos e optar pela quantidade), projeto mecânico com ou sem necessidade de transportar mísseis para serem lançados (uma vez que a munição vagante dispensa essa necessidade), tempo máximo de operação, entre outros.

Para selecionar a melhor alternativa entre SARP reutilizável ou SARP do tipo “munição vagante” para a Aviação do Exército (AvEx), múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes, devem ser levados em consideração pelos *stakeholders* (partes interessadas), como, por exemplo, custos de aquisição e de operação, manutenibilidade, capacidade de carga, transportabilidade, tolerância a falhas, dentre outros [3]. Certamente, os SARP reutilizáveis atenderão melhor a alguns critérios quando comparados aos SARP vagantes e vice-versa. Portanto, como lembrado na literatura, os decisores terão que balancear as suas expectativas em busca de uma solução que possua o melhor equilíbrio frente aos objetivos almejados, a suportabilidade e viabilidade financeira [4]. Esse processo pode ser denominado de análise de *trade-off* ou solução de compromisso, que pode ser amparado por métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD).

Dada a relevância e complexidade da decisão em questão, o objetivo deste trabalho é apresentar um método sistematizado de apoio à análise de *trade-off*, a ser aplicado para definir a opção de SARP de ataque (reutilizáveis ou “munição vagante”) que melhor atenda aos critérios estabelecidos pelos *stakeholders*.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Objetivamente, os sistemas são desenvolvidos para criar valor para os *stakeholders*, visando a atender aos seus objetivos. Para sistemas complexos, muitas vezes esses objetivos são conflitantes. Dessa forma, como os recursos são

Douglas. E. Casale, casale.douglas@gmail.com; L. E. V. Loures da Costa, loures@ita.br; Moacyr. M. C. Júnior, moacyr@ita.br.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

limitados, para atingir um objetivo em determinado nível desejado, geralmente é necessário fazer concessões entre os níveis de outros objetivos. O processo que auxilia na determinação do melhor equilíbrio entre esses objetivos é conhecido como análise de *trade-off* ou solução de compromisso [5], [6]. Sinteticamente, essas análises refletem os esforços para se resolver o dilema dos objetivos conflituosos, que impedem a existência da solução ótima e conduzem à busca da solução de melhor compromisso [7].

As análises de *trade-off* podem desempenhar um papel central no gerenciamento de decisões ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas, apoiando, por exemplo, decisões relativas ao conceito; requisitos; arquiteturas; subsistemas; componentes; métodos de teste e avaliação; processos de produção; abordagens de operação, manutenção e descarte; dentre outras [8].

Nas situações em que sejam identificados, pelo menos, dois critérios conflitantes e duas alternativas de decisão, as análises de *trade-off* podem ser amparadas pelos métodos de Apoio Multicritério à Decisão. Esses métodos combinam suposições qualitativas e dados quantitativos com técnicas de modelagem matemática, possibilitando a sistematização de problemas complexos, com múltiplos critérios ou objetivos, e auxiliando os decisores na avaliação e escolha das alternativas que melhor possam solucionar o problema em questão.

As teorias de decisão multicritério abarcam numerosos métodos e modelos, como: PROMETHEE, OWA, ELECTRE, TOPSIS, MACBETH, ANP e o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que é considerado uma das ferramentas de apoio ao processo decisório mais conhecidas e difundidas na literatura para a solução de diversos problemas (planejamento, priorização, alocação de recursos, etc.) em variadas áreas (engenharia, indústria, educação, saúde, etc.) [9], [10]. No contexto militar, em especial, podem ser encontradas muitas publicações relatando a aplicação do AHP e suas variações, como, por exemplo:

- Ref. [11] aplicaram o método híbrido AHP-TOPSIS-2N para ranquear drones de Guerra Eletrônica para a Marinha do Brasil;
- Ref. [12] utilizaram o método AHP com *ratings* para a priorização de projetos de P&D no Setor Aeroespacial;
- Ref. [13] empregaram os métodos VFT, AHP e CODAS para apoiar a escolha de um sistema espacial para um programa estratégico nacional.

O AHP é fundamentado no conceito de hierarquia, em que um problema multicritério é decomposto em uma estrutura hierárquica, iniciando pelo objetivo global, critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos. Os critérios são os fatores relevantes para a tomada de decisão, enquanto as alternativas são as opções a serem analisadas. Em cada nível da hierarquia, os componentes são comparados par a par entre si, com base na escala fundamental de Saaty, valendo-se do julgamento de especialistas. Por meio do método, é realizado o tratamento matemático das avaliações para que seja possível derivar os pesos relativos de cada componente da hierarquia, obtendo-se, por fim, um valor numérico ponderado total para cada alternativa analisada, o

que permite, então, selecionar a melhor alternativa para o problema em questão [14].

Apesar de muitas vantagens, o AHP também apresenta limitações que devem ser consideradas. Uma das mais polêmicas é a crítica ao modelo matemático proposto pelo método para o cálculo do vetor de prioridades, que pode implicar em distorções na quantificação das prioridades [15]. Outra questão relevante é que, quando o número de critérios e alternativas é muito grande, são necessárias muitas comparações par a par e, assim, o trabalho dos decisores pode ser complexo e exaustivo, além de a manutenção das consistências dos julgamentos tornar-se mais difícil [14]. Vale destacar que, apesar de métodos de AMD, como o AHP, favorecerem e orientarem a tomada de decisão, eles não devem ser utilizados como critérios universais, já que a tomada de decisão pressupõe um entendimento mais amplo e complexo do contexto do problema.

III. MÉTODO

Tendo em vista a simplicidade de aplicação, a flexibilidade do uso e o apelo intuitivo, selecionou-se o método AHP para apoiar a análise de *trade-off* que será realizada para o problema de decisão deste trabalho. A seguir serão apresentadas as etapas envolvidas para aplicação do método, adaptadas dos trabalhos de [10] [14] [16].

A. Etapa 1 – Estruturação do problema de decisão

Inicialmente, é necessário definir e mobilizar os especialistas ou decisores que participarão do processo de aplicação do método AHP para o problema de decisão.

A primeira atividade do grupo consiste em construir a estrutura hierárquica do problema de decisão, ilustrada no modelo genérico da Fig. 1. Para tal, os especialistas devem identificar o objetivo global de decisão a ser tratado e as alternativas (possibilidades de decisão) a serem analisadas. O objetivo deve ser decomposto em critérios, que são os quesitos adotados para a avaliação das alternativas. Esses critérios podem ser desdobrados em múltiplas camadas de subcritérios, a depender da complexidade do problema.

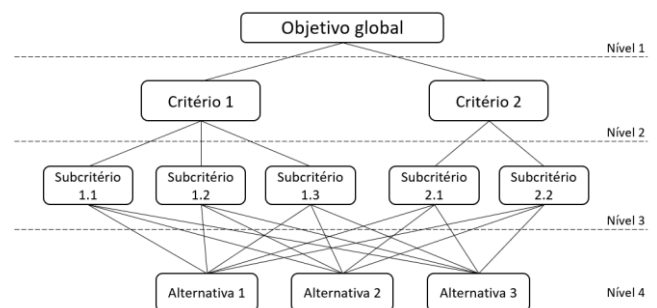


Fig. 1 – Estrutura hierárquica do método AHP (adaptado de [19]).

B. Etapa 2 – Realização das comparações par a par

Para a consecução desta etapa, os elementos de um mesmo nível hierárquico devem ser comparados par a par, à luz do elemento imediatamente superior relacionado a ele. Tomando como base a estrutura hierárquica da Fig. 1, por

exemplo, os especialistas devem comparar, inicialmente, os critérios 1 e 2, baseando-se na escala da Tabela I, quanto à sua importância para a consecução do objetivo global. Em seguida, os subcritérios 1.1, 1.2 e 1.3 devem ser comparados par a par, à luz do critério 1, e assim por diante.

TABELA I – ESCALA DE SAATY (adaptada de [17]).

Valor	Avaliação verbal
1	Os elementos comparados são igualmente importantes/preferidos
3	Importância/preferência moderada de um elemento sobre o outro
5	Importância/preferência forte de um elemento sobre o outro
7	Importância/preferência muito forte de um sobre o outro
9	Importância/preferência extrema de um elemento sobre o outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os julgamentos adjacentes

Preferencialmente, os números ímpares da escala devem ser utilizados nas avaliações, de modo a assegurar razoável distinção entre os pontos da medição. Porém, quando houver necessidade de negociação entre os avaliadores e não for possível obter um consenso, pode-se utilizar os valores pares (intermediários), que representam uma solução de compromisso negociada [17].

Após os julgamentos dos critérios e subcritérios, as alternativas (nível 4) também devem ser confrontadas, duas a duas, indicando o grau de preferência de uma em relação a outra para cada um dos subcritérios do nível 3.

C. Etapa 3 – Determinação dos pesos locais dos atributos

Esta etapa compreende o processo matemático que deve ser realizado para determinar os pesos dos atributos analisados (critérios, subcritérios e alternativas).

Inicialmente, é necessário construir as matrizes de julgamentos, a partir dos resultados das comparações par a par realizadas na Etapa 2. A Equação (1) representa uma matriz de julgamento A (quadrada, positiva e recíproca), relativa à comparação par a par de n atributos, em que os pesos são $w_1, w_2, \dots, w_n$ e $a_{ij} = 1/a_{ji}$ [14]:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Para encontrar os pesos de cada atributo, é preciso solucionar (2). O cálculo exato desses pesos pode ser obtido por meio de alguns métodos matemáticos, como o método dos mínimos quadrados, o método dos mínimos quadrados logarítmico e o método do autovetor. Porém, alguns autores afirmam que o método do autovetor parece ser o único a tratar corretamente matrizes que não sejam consistentes [18].

$$(A - nI)w = 0 \quad (2)$$

ou

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw$$

Considerando que as matrizes sejam *quase* consistentes, de acordo com o método do autovetor, os pesos podem ser determinados por meio do cálculo do autovetor principal de A ($w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$) associado ao autovalor máximo (λ_{max}) correspondente, que satisfaça a (3) [14]:

$$Aw = \lambda_{max}w \quad (3)$$

Visando a mensurar o quão consistente são os julgamentos efetuados pelos decisores, [17] propõe o cálculo do índice de consistência (IC) (4) e da razão de consistência (RC) (5), sendo RI o índice de consistência aleatório tabelado em função da ordem da matriz:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (5)$$

Caso a razão de consistência (RC) seja menor ou igual a 10%, a matriz é considerada suficientemente consistente e os pesos relativos estimados são aceitos. Caso contrário, as comparações devem ser revistas pelos decisores para melhorar a consistência e recalcular os pesos.

Assim, a partir do cálculo dos autovetores principais normalizados de todas as matrizes, obtém-se o peso médio local de cada critério i (PML_i^C), de cada subcritério j ($PML_{i,j}^{SC}$) relacionado a cada critério i e de cada alternativa k relacionada a cada subcritério j ($PML_{k,j}^A$) [19].

D. Etapa 4 – Agregação dos pesos e decisão final

Por fim, os pesos dos vários níveis hierárquicos devem ser agregados para definir a classificação das alternativas.

Os pesos globais dos subcritérios ($PG_{i,j}^{SC}$) são obtidos por meio da solução de (6) [19]:

$$PG_{i,j}^{SC} = PML_{i,j}^{SC} * PML_i^C \quad (6)$$

Para calcular os pesos globais das alternativas ($PG_{k,j}^A$), deve-se, para cada alternativa k , conforme (7), multiplicar o seu peso médio local ($PML_{k,j}^A$) pelo peso global do subcritério j correspondente ($PG_{i,j}^{SC}$):

$$PG_{k,j}^A = PML_{k,j}^A * PG_{i,j}^{SC} \quad (7)$$

Os pesos globais de cada alternativa devem ser somados, a fim de se obter o peso total de cada alternativa (PT_k^A) (8). A alternativa com o maior valor de peso total deve ser indicada como a melhor decisão para o problema, de acordo com os critérios e julgamentos dos especialistas.

$$PT_k^A = \sum_{j=1}^m PG_{k,j}^A \quad (8)$$

IV. ESTUDO DE CASO

Nos tópicos seguintes serão apresentados os resultados alcançados a partir da aplicação do método para o problema de decisão relacionado à configuração do SARP de ataque.

A. Etapa 1 – Estruturação do problema de decisão

Inicialmente, constituiu-se um grupo formado por militares especialistas em aviação do Exército Brasileiro (EB) e da Força Aérea Brasileira (FAB), com ampla experiência e qualificação na área, para participar de todo o processo e viabilizar o emprego do método.

Com o intuito de construir a estrutura hierárquica do problema de decisão, o grupo definiu que o objetivo global do estudo é determinar a melhor configuração para um SARP de ataque para a Aviação do Exército (AvEx), considerando duas alternativas a serem avaliadas: **ARP reutilizáveis**; e **ARP do tipo “munição vagante”** (*loitering munition*), que detonam contra os alvos, sendo destruídos no processo.

Os SARP são uma prioridade para as Forças Armadas atualmente e a análise e decisão entre diferentes alternativas de configuração dependem do nível de atendimento a certos critérios identificados. Dessa forma, os resultados desta aplicação podem apoiar a decisão de priorizar a alternativa que deve receber recursos iniciais para alcançar sua plena capacidade operacional, possibilitando posteriormente a destinação de recursos às demais opções que complementem as capacidades requeridas pelo Exército Brasileiro.

Os critérios e subcritérios foram definidos com base em características desejáveis ou próprias de sistemas similares, identificadas em uma análise comparativa de mercado (*benchmarking*) [3] realizada pelo grupo de trabalho previamente. Os critérios elencados foram: logística, operacionalidade e confiabilidade e vulnerabilidade.

O critério **logística** foi decomposto em cinco subcritérios:

- **Manutenibilidade:** facilidade e viabilidade de se fazer manutenção e inspecionar a ARP;
- **Nacionalização de componentes:** nível de independência em relação a fornecedores estrangeiros, para reduzir riscos de desabastecimento ou embargo a componentes críticos que implique em indisponibilidade do sistema ou necessidade de alteração do projeto;
- **Escalabilidade:** nível de replicabilidade e facilidade de fabricação em série das aeronaves;
- **Economia de aquisição:** aumenta quanto menor for o preço por unidade de ARP;
- **Economia de operação:** favorece soluções com menor valor por hora de voo e logística, além de menor custo de reposição (no caso de aeronaves que tem de ser substituídas a cada missão).

Para o critério **operacionalidade** foram identificados subcritérios:

- **Capacidade de carga:** quantidade de carga útil que pode ser transportada pela ARP;
- **Transportabilidade:** facilidade e a viabilidade com que se pode deslocar o material no terreno e acompanhar as operações, levando a ARP para pontos mais próximos do teatro de operações;
- **Capacidade multimissão:** realizar um amplo espectro de diferentes missões, desempenhando funções como reconhecimento, vigilância e ataque, com versatilidade de emprego;

- **Capacidade de atingir múltiplos alvos:** permite a uma única ARP realizar ataques contra diferentes alvos em uma mesma missão;
- **Capacidade de navegação sem GNSS:** alternativas à navegação satelital para realizar a navegação, de modo a reduzir o risco de perda de missão em virtude do clima e ações de Guerra Eletrônica.

Por fim, o critério **confiabilidade e vulnerabilidade** foi decomposto em 3 subcritérios:

- **Tolerância a falhas:** ligada à capacidade de o sistema continuar operando e a aeronave continuar voando e cumprindo suas missões (ainda que de modo degradado), mesmo que um de seus sistemas ou componentes venha a falhar;
- **Facilidade de implementação de modo de segurança:** representa a facilidade e a viabilidade com que se pode implementar um modo de segurança no SARP, para evitar danos indesejados e captura da ARP por forças oponentes;
- **Menor Seção Reta Radar (SRR):** quanto menor a SRR, menores a assinatura espectral de um objeto quando iluminado por um radar e sua detectabilidade.

O subcritério **tolerância a falhas** está relacionado à robustez do sistema, englobando não apenas falhas ocasionais de componentes, mas também aquelas resultantes de interferência deliberada do inimigo, como ataques cinéticos ou guerra eletrônica. Do ponto de vista da implementação, a utilização de redundância é uma forma de ampliar a tolerância do sistema. Contudo, essa capacidade é limitada, pois dependendo da intensidade dos danos sofridos por interferência inimiga, o sistema pode ser perdido.

O objetivo, os critérios, os subcritérios e as alternativas de decisão definidos neste trabalho encontram-se sintetizados na Tabela II.

TABELA II – ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PROBLEMA DE DECISÃO.

Objetivo	Critério	Subcritério	Alternativas
Determinação da melhor configuração para um SARP de ataque	Logística	Manutenibilidade	A) SARP reutilizáveis
		Nacionalização de componentes	
		Escalabilidade	
		Economia de aquisição	
		Economia de operação	
	Operacionalidade	Capacidade de carga	B) SARP do tipo “munição vagante”
		Transportabilidade	
		Capacidade multimissão	
		Capacidade para atingir múltiplos alvos	
		Capacidade de navegação sem GNSS	
	Confiabilidade e vulnerabilidade	Tolerância a falhas	
		Facilidade de implantação de modo de segurança	
		Menor Seção Reta Radar (SRR)	

B. Etapa 2 – Realização das comparações par a par

As comparações par a par foram realizadas em grupo, tendo ocorrido também discussões e negociações entre os envolvidos, até se chegar ao consenso de um valor único para cada comparação que refletisse o julgamento do grupo de decisores, como uma unidade, a partir da escala da Tabela I.

Ao longo desse processo, pôde-se perceber que, para o contexto desta aplicação, a adoção da estratégia de avaliação por consenso, por meio de discussões abertas, trouxe benefícios significativos.

Como um grupo agrega mais conhecimento em comparação a qualquer um de seus membros isoladamente, aumentam-se as chances de se chegar a avaliações mais precisas, claras e transparentes. Além disso, é possível, em tempo real, uniformizar os entendimentos dos conceitos, premissas e justificativas relacionados a cada decisão, sanar dúvidas e nivelar o conhecimento do grupo, a partir das informações, experiências e perspectivas partilhadas por cada participante.

C. Etapa 3 – Determinação dos pesos locais dos atributos

Visando a simplificar o processo de cálculo do autovetor de pesos w , foi realizada uma aproximação, normalizando os elementos de cada coluna da matriz de julgamentos A e calculando a média aritmética de cada linha [20]. De acordo com [21], a diferença entre o valor real e o valor aproximado calculado por esse método é inferior a 10%, o que justifica tal simplificação.

Os resultados dos pesos calculados para cada atributo, bem como as razões de consistência obtidas, encontram-se disponíveis na Tabela III. Observa-se que a RC foi menor do que 10% para todos os casos, o que indica que todas as matrizes de julgamento foram suficientemente consistentes.

D. Etapa 4 – Agregação dos pesos e decisão final

Nesta etapa, todos os resultados foram agregados, conforme apresentado na Tabela III, obtendo-se os pesos globais dos subcritérios e das alternativas. A partir desses parâmetros, foi calculado o peso total de cada alternativa, sendo a alternativa **SARP reutilizável** a que obteve a maior pontuação, considerando os critérios e julgamentos dos especialistas envolvidos no processo.

Com relação aos critérios, houve priorização da **operacionalidade** sobre os demais, seguido pela logística. Na visão do grupo de trabalho, subcritérios como **capacidade multimissão** e **capacidade de atingir múltiplos alvos** deveriam receber maior peso. Outros subcritérios que também tiveram importância elevada foram a **economia de operação** (uma vez que o custo de operação ao longo do ciclo de vida de um sistema pode superar em 4 vezes seu custo de aquisição) e a **nacionalização de componentes** (para se evitar restrições e embargos que possam afetar a disponibilidade do sistema).

Na comparação entre cada alternativa, verificou-se que, embora as ARP da munição vagante sejam, em geral, de fabricação e **aquisição** mais simples e baratas (pois podem ser usados componentes de menor custo e mais fáceis de se fabricar nacionalmente, visto que são aeronaves que precisam voar apenas uma vez e não necessitam de um projeto pensado tanto em sua manutenção, modularidade e pouso ou recuperação após a missão, facilitando, inclusive, sua **escalabilidade** em certos aspectos), as mesmas são perdidas após cada ataque realizado, devendo ser repostas para manter a capacidade operacional do *stakeholder*. Dessa forma, sua

economia de operação é reduzida, pois é prejudicada pelo custo de aquisição de uma nova aeronave a cada missão.

Sob certos aspectos, a **manutenibilidade** da munição vagante pode ser considerada melhor que a do SARP reutilizável, pois, apesar de demandar maior cuidado na armazenagem e em eventuais inspeções periódicas quando estocado por certo tempo (em virtude da presença de explosivo em seu interior), sua característica de ser praticamente descartável simplifica diversas atividades e sua suportabilidade.

Quanto ao subcritério **capacidade para atingir múltiplos alvos**, o SARP reutilizável tem vantagem absoluta, pois podem ser armadas com múltiplos mísseis para cada missão e uma única ARP é capaz de atingir, por exemplo dois pelotões inteiros de carros de combate (oito carros), enquanto cada munição vagante atinge apenas um alvo. O projeto mais robusto do SARP reutilizável ainda permite maiores capacidade de carga e variação de cargas úteis transportadas para diferentes configurações de missão, favorecendo a **capacidade multimissão**, embora isso possa prejudicar a **transportabilidade** do SARP reutilizável armado, que (com sua munição) acaba em geral sendo mais pesado e de maiores dimensões que a munição vagante.

Por fim, para os subcritérios ligados à confiabilidade e vulnerabilidade, tem-se que a **Seção Reta Radar** da munição vagante tende a ser menor que a do SARP reutilizável, pois não há necessidade de a munição vagante transportar mísseis sob as asas ou externamente, de modo que sua assinatura radar é reduzida. A **implementação do modo de segurança** pode ser mais fácil em SARP reutilizável pois sua maior flexibilidade para carregar cargas úteis variadas pode ser usada para se transportar equipamentos de auxílio ao voo e navegação, reduzindo a dependência ao sistema de posicionamento baseado em satélites.

Em relação à **tolerância a falhas**, verificou-se que as diferentes alternativas apresentam vantagens a depender do tipo de cenário considerado. Embora a munição vagante, por ser de voo único, tenha menos horas de voo e degradação do material, por outro lado pode utilizar componentes de mais baixo custo cujas taxas de falhas costumam ser maiores. Entretanto, na hipótese de efetiva ocorrência de uma falha em voo, o SARP reutilizável tem mais possibilidades de dispor de redundância ou outras formas de mitigação dos efeitos de falhas, de modo que apresenta uma vantagem nesse subcritério.

III. CONCLUSÃO

O método AHP possibilitou uma análise estruturada e sistemática do problema, a partir da construção e análise de uma hierarquia de critérios, subcritérios e alternativas. As comparações par a par permitiram que os decisores pudessem, conjuntamente, debater e analisar minuciosamente cada julgamento e suas consequências, aumentando a clareza, transparência e credibilidade da avaliação e reduzindo os riscos e o grau de subjetividade do processo. Por meio da escala de Saaty, foi possível expressar numericamente esses julgamentos qualitativos dos decisores, que foram processados matematicamente para derivar os graus de

importância de cada atributo e indicar a solução mais equilibrada para o problema em questão.

Assim, pode-se afirmar que a aplicação de um método estruturado de Apoio Multicritério à Decisão ampliou a possibilidade de acerto na escolha do SARP reutilizável como solução de melhor compromisso para o problema

determinado, em virtude, essencialmente, de sua pontuação referente ao critério **operacionalidade**, embora auferido pontuação inferior nos critérios **logística** e **confiabilidade e vulnerabilidade** em relação à alternativa do tipo “munição vagante”.

TABELA III – RESULTADO DA PONDERAÇÃO DOS ATRIBUTOS AVALIADOS.

							Alternativa 1: SARP munição vagante		Alternativa 2: SARP reutilizável	
Crítérios	PML_i^C	RC	Subcritérios	$PML_{i,j}^{SC}$	RC	$PG_{i,j}^{SC}$	$PML_{1,j}^A$	$PG_{1,j}^A$	$PML_{2,j}^A$	$PG_{2,j}^A$
Logística	33,4%	5,6%	Manutenibilidade	7,9%	6,0%	2,7%	75,0%	2,0%	25,0%	0,7%
			Nacionalização de componentes	31,5%		10,5%	83,3%	8,8%	16,7%	1,8%
			Escalabilidade	15,6%		5,2%	83,3%	4,3%	16,7%	0,9%
			Economia de aquisição	10,0%		3,3%	87,5%	2,9%	12,5%	0,4%
			Economia de operação	35,0%		11,7%	12,5%	1,5%	87,5%	10,2%
Operacionalidade	52,5%		Capacidade de carga	18,4%	7,3%	9,6%	16,7%	1,6%	83,3%	8,0%
			Transportabilidade	5,0%		2,6%	80,0%	2,1%	20,0%	0,5%
			Capacidade multimissão	33,0%		17,3%	16,7%	2,9%	83,3%	14,4%
			Capacidade para atingir múltiplos alvos	33,0%		17,3%	10,0%	1,7%	90,0%	15,6%
			Capacidade de navegação sem GNSS	10,6%		5,6%	33,3%	1,9%	66,7%	3,7%
Confiabil. e vulnerab.	14,2%		Tolerância a falhas	14,3%	0,0%	2,0%	25,0%	0,5%	75,0%	1,5%
			Facilidade de implantação de modo de segurança	42,9%		6,1%	25,0%	1,5%	75,0%	4,6%
			Menor Seção Reta Radar	42,9%		6,1%	87,5%	5,3%	12,5%	0,8%
SOMA: 100,0%						SOMA: 100,0%	PT_1^A : 37,0%	PT_2^A : 63,0%		

REFERÊNCIAS

- [1] Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Estado-Maior do Exército. Portaria nº 149-EME, de 19 de agosto de 2019. Aprova a Nota Doutrinária 6/2019 – Alterações no Manual de Campanha Vetores Aéreos da Força Terrestre.
- [2] D. E. Casale, Estudo conceitual de uma constelação de pequenos satélites de comunicações de banda estreita para o Exército Brasileiro. 170f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2019.
- [3] D. E. Casale, R. C. da Silva, e L. E. V. Loures da Costa, “Pesquisa comparativa de sistemas militares aplicada a Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas”, em XXVI Simpósio de Aplicações em Áreas de Defesa, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, out. 2024.
- [4] D. Garcia Figueiredo Pinto e F. Teixeira Mendes Abrahão, “Custo do Ciclo de Vida”, Spectrum - Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, vol. 24, no 1, p. 17–23, set. 2023, doi: 10.55972/spectrum.v24i1.392.
- [5] G. S. Parnell, C. R. Kenley, C. A. Whitcomb, e K. Palanikumar, “System design and engineering trade-off analytics: State of the published practice”, Systems Engineering, vol. 24, no 3, p. 125–143, maio 2021, doi: 10.1002/sys.21571.
- [6] M. V. Cilli e G. S. Parnell, “Systems Engineering Tradeoff Study Process Framework”, INCOSE International Symposium, vol. 24, no 1, p. 313–331, jul. 2014, doi: 10.1002/j.2334-5837.2014.tb03151.x.
- [7] M. Zeleny, “Multiple Criteria Decision Making (MCDM)”, em Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, Wiley, 2014. doi: 10.1002/9781118445112.stat01701.
- [8] G. S. Parnell, M. V. Cilli, e D. Buede, “Tradeoff Study Cascading Mistakes of Omission and Commission”, INCOSE International Symposium, vol. 24, no 1, p. 332–346, jul. 2014, doi: 10.1002/j.2334-5837.2014.tb03152.x.
- [9] G. L. Tortorella e F. S. Fogliatto, “Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério”, Production, vol. 18, no 3, p. 609–624, dez. 2008, doi: 10.1590/S0103-65132008000300015.
- [10] T. L. Saaty, “Analytic Hierarchy Process”, em Encyclopedia of Biostatistics, Wiley, 2005. doi: 10.1002/0470011815.b2a4a002.
- [11] A. P. de A. Costa et al., “Ranqueamento de drones de Guerra Eletrônica para a Marinha do Brasil por meio do método híbrido”, em Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE), São José dos Campos, 2021.
- [12] A. C. S. Silva, M. C. N. Belderrain, e F. Pantoja, “Priorização de Projetos de P&D no Setor Aeroespacial: método AHP com Ratings”, em Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São José dos Campos, 2010.
- [13] Y. Souza, C. Cerqueira, M. C. N. Belderrain, e P. A. Albuquerque, “A Utilização de métodos de Apoio Multicritério à Decisão na Escolha de Sistemas Espaciais”, em Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São José dos Campos, 2022.
- [14] T. L. Saaty, “How to make a decision: The analytic hierarchy process”, Eur J Oper Res, vol. 48, no 1, p. 9–26, set. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-1.
- [15] C. A. B. Costa, “The use of multi-criteria decision analysis to support the search for less conflicting policy options in a multi-actor context: case study”, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 10, no 2, p. 111–125, mar. 2001, doi: 10.1002/mcda.292.abs.
- [16] A. R. S. Ávila, “Um Estudo Sobre os Conceitos Matemáticos que Sustentam o Método de Análise Hierárquica (AHP)”, TCC (Graduação) - Curso de Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2023.
- [17] R. W. Saaty, “The analytic hierarchy process—what it is and how it is used”, Mathematical Modelling, vol. 9, no 3–5, p. 161–176, jan. 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [18] K. G. A. GOMES, “Um método multicritério para localização de unidades celulares de Intendência da FAB”, Mestrado em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [19] T. M. Meier e R. B. Z. Mori, “Uma Abordagem Multicritério para o Problema de Localização da Comissão de Aeroportos da Região Amazônica”, em Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São José dos Campos, 2021.
- [20] T. L. Saaty e L. G. Vargas, “How to Make a Decision”, 2o ed, New York: Springer, 2012, p. 1–21. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6_1.
- [21] E. Kostlan, “Statistical complexity of dominant eigenvector calculation”, J Complex, vol. 7, no 4, p. 371–379, dez. 1991, doi: 10.1016/0885-064X(91)90025-S.