

Posicionamento de aeronaves de Superioridade Aérea em Missões Aéreas Compostas: aplicação AHP com *ratings*

Diego Geraldo, Pedro Henrique Nascimento dos Santos e Mischel Carmen Neyra Belderrain
DCTA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50. 12180-900 – S. José dos Campos – SP – Brasil

Resumo — Esse trabalho aborda a problemática do posicionamento das aeronaves de superioridade aérea de uma Missão Aérea Composta (ou “Pacote”), especificamente na fase conhecida como TARCAP (*Target Combat Air Patrol*), como uma Análise Multicritério de Decisão. Para tanto, propõe a divisão exaustiva do cenário tático em setores circulares e a avaliação desses setores segundo seus potenciais de ameaça, com base no método AHP-*ratings*. Adicionalmente, propõe uma interface que permite a análise pictorial do vetor prioridade resultante do método multicritério, por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Palavras-Chave — AHP *Ratings*, Apoio Multicritério à Decisão, Missões Aéreas Compostas.

I. INTRODUÇÃO

A doutrina de emprego de meios aéreos adotada pela OTAN utiliza o conceito de *Composite Air Operations*, em português traduzido para Missões Aéreas Compostas, porém mais comumente conhecido como “Pacote”.

O termo Pacote, no contexto das operações aéreas, pode ser definido como “o emprego de sistemas de armas diferentes num plano de ataque para atingir um objetivo específico” [1].

O emprego dos meios aéreos em “pacote” permite que vários alvos sejam atacados simultaneamente, saturando as defesas oponentes e, ao mesmo tempo, otimizando o uso dos meios de apoio à missão, como Escolta, Reabastecimento em Voo e AWACS (*Airborne Warning and Control System*).

Counterair, outro termo comumente encontrado na doutrina de emprego de meios aéreos, refere-se às operações aéreas realizadas com o propósito de obter e manter um nível desejado de superioridade aérea por meio da destruição, degradação ou perturbação das forças inimigas [10]. Nesse contexto, ambas as ações, ofensivas e defensivas, estão envolvidas. O conceito de *Offensive Counterair* (OCA) diz respeito às operações que incluem a supressão de meios de defesa aérea inimigos [10].

Offensive Counterair, quando relacionada ao emprego dos meios aéreos em Pacote, representa as aeronaves de defesa aérea cumprindo missões de proteção às demais aeronaves amigas durante a incursão em território inimigo. O papel da proteção é criar uma ameaça prioritária para a defesa inimiga, ou ainda melhor, conquistar a superioridade aérea.

A obtenção e a manutenção da superioridade aérea permitem que as forças amigas operem em um dado local, por um determinado período de tempo, sem sofrer interferências proibitivas das forças de oposição [10].

As missões mais comumente relacionadas à OCA são conhecidas como *Sweep* e *Escort*. Em ambos os casos, o objetivo prioritário é a proteção do Pacote. O dispositivo de proteção inclui um plano tático de deslocamento em direção aos alvos (*Ingress*), durante o ataque, realizando uma TARCAP (*Target Combat Air Patrol*), e no regresso para as linhas amigas (*Egress*).

TARCAP pode ser definida como uma patrulha aérea posicionada sobre ou próxima à região de objetivos, com o propósito de neutralizar aeronaves hostis, antes que as mesmas impeçam as aeronaves amigas de cumprirem suas missões [11].

Problema em estudo

Doutrinariamente, as aeronaves de proteção ao Pacote, quando na fase de TARCAP, buscam se posicionar entre os vetores que estão defendendo e as ameaças inimigas, formando uma espécie de barreira. O que se pretende, de fato, é entreter a defesa aérea inimiga, ou seja, ser a ameaça prioritária para a mesma, enquanto as demais aeronaves do Pacote atacam os alvos de interesse.

As patrulhas aéreas, no entanto, podem permitir “vazamentos” nessas barreiras (ou deixar de ser a ameaça prioritária) por diversas razões, dentre elas, posicionamento incorreto em relação à ameaça, diferencial de velocidade insuficiente durante a interceptação, alcance dos mísseis menor que os do inimigo e mau funcionamento do radar de bordo.

Como, por vezes, existe a necessidade de o Pacote adentrar profundamente ao território inimigo a fim de alcançar os alvos de interesse, é razoável supor que os meios de defesa aérea inimigos possam surgir de diversas direções, e em diversas intensidades distintas.

Por consequência, faz-se necessário mensurar as ameaças previstas a fim de priorizá-las. Em outras palavras, é imperativo saber como essas ameaças estão “distribuídas” pelos 360° do cenário tático a fim de adequar o posicionamento das aeronaves de defesa do Pacote, visando à manutenção da superioridade aérea na região dos alvos durante a fase dos ataques.

Proposta do trabalho

Este artigo abordará a problemática do posicionamento das aeronaves de superioridade aérea do Pacote, especificamente na fase de TARCAP, como uma análise de decisão multicritério, em que fatores quantitativos e qualitativos serão avaliados simultaneamente. Para tanto, será necessário dividir o cenário tático em setores circulares e avaliar cada um dos setores segundo seus potenciais de ameaça. A divisão do cenário tático em setores será feita com

o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A avaliação desses setores será feita por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) com uso de *ratings*, de maneira a estabelecer um ranking entre os mesmos. Por fim, o vetor prioridade resultante do AHP será interpretado no mesmo SIG utilizado para gerar os setores circulares, integrando a análise numérica do método hierárquico à representação pictorial do cenário tático.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: a seção II apresenta brevemente o método AHP com uso de *ratings*, assim como a justificativa do uso do método nesse trabalho, a seção III trata da aplicação do método ao problema de decisão apresentado, a seção IV aborda a análise do vetor prioridade do AHP de maneira integrada a um SIG, a seção V discute algumas limitações identificadas na proposta e na seção VI, por fim, é apresentada uma breve conclusão do trabalho.

II. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS COM O USO DE RATINGS

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é um dos métodos de Apoio Multicritério à Decisão mais utilizados e foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em 1980, com o intuito de prover uma metodologia para a modelagem de problemas não-estruturados. O método baseia-se na capacidade humana de usar informação e experiência para estimar magnitudes relativas através de comparações par a par. [4]

No AHP, o problema é estruturado como uma hierarquia. A divisão do problema em níveis hierárquicos facilita sua compreensão e avaliação, sendo possível determinar por meio da síntese dos valores do decisor, uma medida global para cada uma das alternativas existentes, priorizando-as ou classificando-as ao finalizar o método. [2]

Em termos de modelagem, para gerar prioridades, o problema de decisão precisa ser decomposto nos seguintes passos: 1) definição do problema; 2) estruturação da hierarquia de decisão; 3) construção das matrizes de comparação par a par, e; 4) utilização das prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades do nível imediatamente inferior. [9]

De acordo com Saaty e Vargas em [7], quatro axiomas regem o método AHP e garantem a sua robustez:

1) Axioma 1 - Reciprocidade: os elementos comparados par a par pelo decisor devem satisfazer a condição de reciprocidade. Assim, se A é cinco vezes mais importante que B em determinado critério, então B será 1/5 mais importante que A;

2) Axioma 2 – Homogeneidade: os elementos a serem comparados em um mesmo nível hierárquico devem ser homogêneos entre si, pois a mente humana tende a incorrer em erros quando são comparados elementos díspares;

3) Axioma 3 – Hierarquia e Dependência: os elementos de um nível da hierarquia devem ser mutuamente excludentes entre si, e quando comparados par a par pelos decisores, os pesos dos critérios devem ser independentes das alternativas;

4) Axioma 4 - Expectativas de Completude e *Rank*: espera-se que a hierarquia do problema de decisão esteja completa, ou seja, com todos os critérios relativos ao problema representados, e que o *ranking* de alternativas dependa das expectativas do decisor e da natureza do problema de decisão.

Ratings

Segundo Saaty, no AHP são dois os modos de agregar prioridades: comparando uma alternativa com as demais (medida relativa), ou comparando cada alternativa com outra ideal conhecida (medida absoluta), em um processo denominado *Ratings*. [8]

Os *ratings* podem ser definidos, então, como um conjunto de categorias que servem como base para avaliar o desempenho das alternativas em relação a cada critério e/ou subcritério.

Para estabelecer a importância relativa entre estas categorias (obtenção dos vetores de prioridades) os valores/opiniões do decisor devem ser incorporados ao sistema *ratings*.

As categorias são priorizadas através de comparação par a par e as alternativas são avaliadas selecionando-se a categoria apropriada de cada critério. [9]

A principal vantagem dessa forma adicional do AHP é a diminuição da quantidade de comparações necessárias quando o número de alternativas é grande. [2]

Justificativa de uso do método

Uma das características das operações aéreas é o dinamismo na atualização das informações. A parte envolvida no combate que conseguir processar melhor e mais rapidamente as atualizações do cenário, certamente obterá vantagem sobre o oponente.

A proposta apresentada neste artigo tem por objetivo proporcionar aos decisores uma metodologia que seja ao mesmo tempo simples, visando à economia de tempo em sua implementação, e flexível, permitindo que as atualizações de cenário possam ser facilmente inseridas no modelo.

Nesse sentido, o uso do método AHP com *ratings* justifica-se nesse trabalho por requerer menor quantidade de julgamentos necessários na “reclassificação” dos setores (alternativas) em suas categorias de intensidade, em função de atualizações no cenário tático e/ou de novas informações de inteligência, se comparado ao método AHP tradicional. Isto porque, no AHP *ratings*, as comparações entre as alternativas não ocorrem de maneira paritária, e sim de forma absoluta.

No entanto, a aplicação do método multicritério à problemática em estudo só se faz viável se for assumida a independência entre as alternativas. Assim, uma vez estabelecida a divisão do cenário tático em setores, esta estrutura passa a ser fixa, não mais admitindo a inclusão ou retirada de setores. Tal fato será abordado em detalhes na seção V.

III. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP RATINGS

A aplicação do método AHP-*Ratings* ao problema exposto neste artigo será desenvolvida com base no fluxograma proposto por Nascimento em [4]. Tal fluxograma, exibido na Fig. 1, pressupõe a execução de três etapas: Formulação do Problema de Decisão, Julgamentos e Desenvolvimento Algébrico.

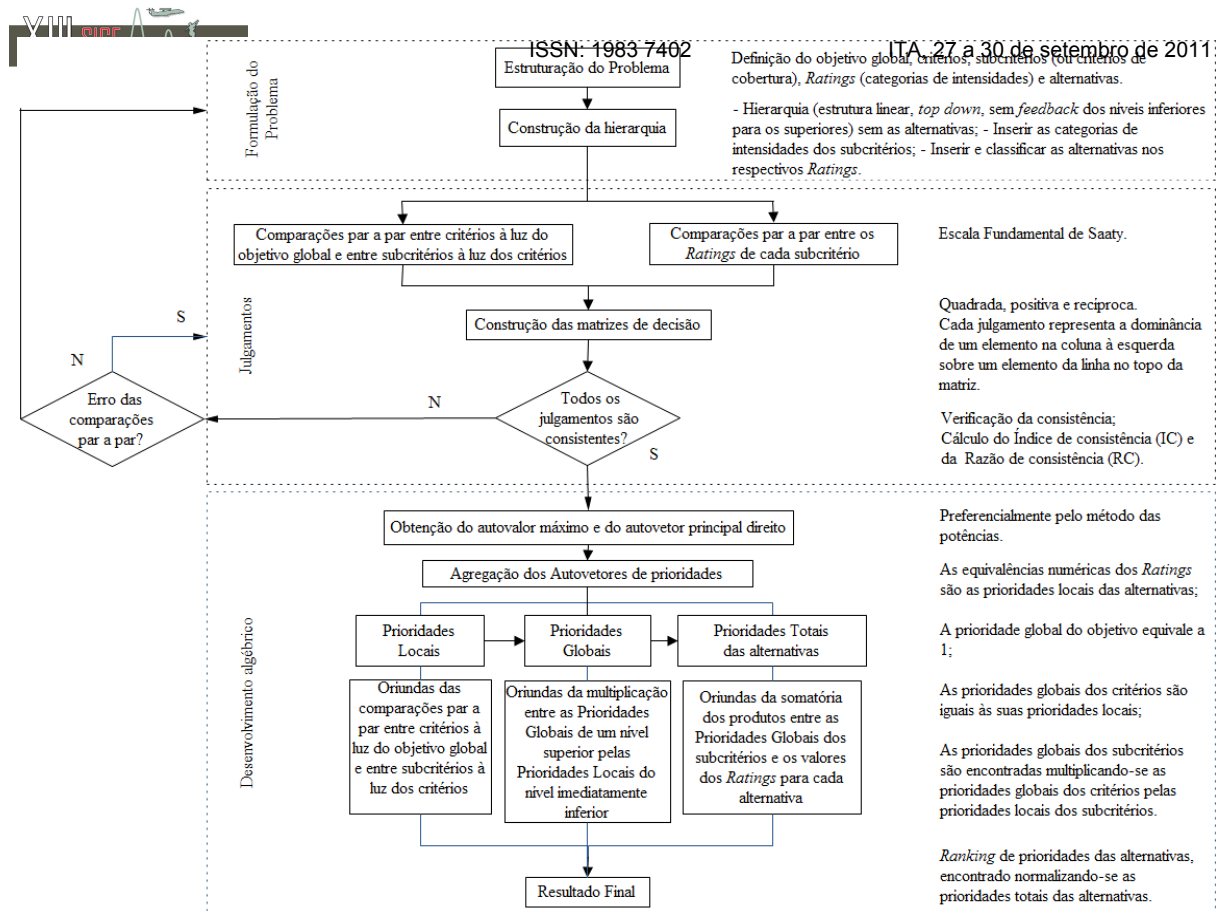


Fig. 1. Fluxograma para aplicação do Método AHP com ratings. [4]

Primeira Etapa: Formulação do Problema de Decisão

Passo 1 - Estruturação do Problema: nesta fase devem ser definidos o Objetivo Global, os critérios e subcritérios com seus respectivos ratings (categorias), assim como as alternativas.

Passo 2 - Construção da Hierarquia: no AHP-Ratings a hierarquia deve ser construída sem as alternativas. Neste passo, os ratings devem ser inseridos nos subcritérios e as alternativas classificadas nas suas respectivas categorias de intensidades. [4]

No presente trabalho, o problema foi estruturado por meio da técnica de brainstorming realizado com três pilotos da Aviação de Caça da Força Aérea Brasileira, cujos nomes optou-se por não mencionar. Iniciou-se pela caracterização do problema já descrito na seção I. O objetivo global definido foi "Priorizar setores segundo seus potenciais de ameaça".

Os critérios, subcritérios e ratings foram definidos com base nas demandas reais dos tomadores de decisão, ou seja, dos pilotos consultados. Os decisores buscaram definir os critérios de maneira que as avaliações dependessem exclusivamente de dados comumente disponíveis nos contextos das operações aéreas.

A estrutura hierárquica proposta para o problema é a exibida na Fig. 2.

As descrições dos critérios e subcritérios presentes na estrutura hierárquica são as seguintes:

Critério "Cobertura Radar": compreende a avaliação qualitativa e quantitativa da área coberta por radares das forças amigas. O princípio desse critério é que quanto mais distantes ocorrerem as detecções em relação à região de objetivos, e quanto menos suscetível à falhas for a cobertura radar de um determinado setor, maior o tempo disponível

para o posicionamento adequado das aeronaves de Superioridade Aérea e menor o seu potencial de ameaça. Este critério, por sua vez, subdivide-se em dois subcritérios, descritos a seguir;

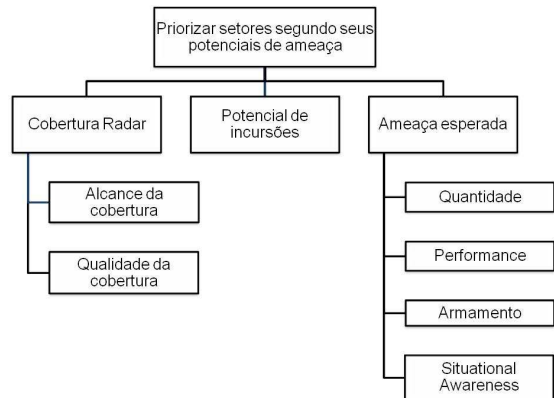


Fig. 2. Estrutura hierárquica para avaliação do potencial de ameaça dos setores.

Subcritério "Alcance da cobertura": avaliação quantitativa que mensura o potencial de ameaça do setor por meio do alcance da cobertura, tendo como referência o centro da região de alvos do Pacote. Quanto menor o alcance radar, maior o potencial de ameaça do setor;

Subcritério "Qualidade da cobertura": avaliação qualitativa da cobertura radar no setor em função dos possíveis "buracos" existentes, considerando fatores como as características do relevo no setor (as falhas de cobertura são mais comuns de ocorrerem em regiões de relevo acidentado) e tipos de radares que cobrem a área (ex: radar de solo, radar

embarcado). Os radares de solo são mais suscetíveis aos “buracos”. Os radares embarcados nos AWACS, por sua vez, tendem a cobrir melhor um determinado setor por rastrear a área de cima para baixo;

Critério “Potencial de incursões”: este critério busca avaliar qualitativamente o potencial de determinado setor em fornecer ameaças para o Pacote. A existência de bases aéreas no setor avaliado, bem como a existência de áreas sensíveis (do ponto de vista inimigo) nele contidas, são informações a serem considerados na avaliação desse critério. O conhecimento de possíveis posições das patrulhas aéreas inimigas também é um fator a ser considerado no julgamento. Quanto mais áreas sensíveis e bases aéreas inimigas estiverem contidas no interior de um setor, por exemplo, maior o indício de que aí existam aeronaves inimigas, e que, portanto, dessas direções possam surgir;

Critério “Ameaça esperada”: compreende a avaliação qualitativa e quantitativa das aeronaves inimigas supostamente presentes no setor em avaliação;

Subcritério “Quantidade”: representa o número de aeronaves inimigas esperadas no setor. A disponibilidade média da frota de determinada unidade aérea inimiga pode ser uma das informações de inteligência a ser considerada no julgamento desse subcritério;

Subcritério “Performance”: avaliação das características de desempenho aerodinâmico das aeronaves inimigas esperadas no setor, em termos de velocidade, e carga G disponível para realização de curvas. Quanto mais rápidas e mais manobráveis forem as aeronaves inimigas, maior o potencial de ameaça do setor. Esse tipo de dado pode ser obtido nas Ordens de Batalha;

Subcritério “Armamento”: avaliação da ameaça esperada em função do tipo e do alcance dos mísseis levados a bordo. Esse tipo de dado pode ser obtido nas Ordens de Batalha;

Subcritério “Situational Awareness”: Consciência situacional, por si só, é um conceito bastante abrangente e sujeito, portanto, a diversas interpretações. Uma definição para o termo pode ser dada como a percepção dos elementos críticos de um ambiente no espaço e no tempo (Nível 1), a compreensão de seus significados, particularmente quando ligados aos objetivos da tripulação (Nível 2), e a projeção do que acontecerá com o sistema no futuro próximo (Nível 3) [3]. Acredita-se que um bom desempenho esteja relacionado a uma boa consciência situacional [3]. Para o subcritério em questão, o termo reflete a capacidade das aeronaves inimigas em termos de sistemas de bordo capazes de obter e interpretar informações do cenário tático como, por exemplo, posicionamento das demais aeronaves e a classificação entre amigas e inimigas. Quanto maior a capacidade de consciência situacional das aeronaves inimigas, mais eficientemente elas podem manobrar e empregar seus armamentos, aumentando, por consequência, o potencial de ameaça do setor.

As categorias de intensidade (*ratings*) propostas pelos pilotos, em função de cada critério e subcritério correspondente, são exibidas na Tabela I.

Conforme já comentado na seção I, as alternativas a serem avaliadas pelo método AHP com *ratings* serão os próprios setores provenientes da divisão do cenário tático. Portanto, faz-se necessário propor um método para tal divisão.

Definição das Alternativas

Se considerarmos a área de objetivos do Pacote como um sistema composto por elementos (alvos) com diferentes pesos, então podemos calcular o seu centro de massa.

Em termos práticos, com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas, é possível definir o posicionamento e os pesos relativos dos alvos em um *grid* e obter como resultado a coordenada geográfica do centro de massa da área de objetivos.

TABELA I: CATEGORIAS DOS RATINGS

Critério ou Subcritério	Ratings
Alcance da cobertura radar	< 25NM
	entre 25NM e 50NM
	ente 50NM e 75NM
	entre 75NM e 100NM
Qualidade da cobertura radar	> 100NM
	Baixa
	Média
Potencial de Incursões	Alta
	Muito Alto
	Alto
Quantidade de aeronaves inimigas esperadas	Médio
	Baixo
	Muito Baixo
	≥8
	6
Performance	4
	2
	1
	≥Mach 1.2 + classe 9 G
Armamento	≥Mach 1.2 + classe 7 G
	<Mach 1.2 + classe 9 G
	<Mach 1.2 + classe 7 G
	Míssil Ativo de longo alcance
Situational Awareness	Míssil Semi-Ativo de longo alcance
	Míssil Ativo de médio alcance
	Míssil Semi-Ativo de médio alcance
	Míssil de curto alcance
	Radar+Data Link+RWR+HMD
	Radar+RWR+HMD
	Radar+RWR
	Radar
	RWR

Podemos considerar esse centro de massa como sendo o ponto para o qual as aeronaves da defesa aérea inimiga irão convergir em linha reta (menor distância), a fim de impedir que as aeronaves de ataque do Pacote lancem suas bombas sobre os alvos. Portanto, considerando que a aproximação das ameaças em relação à região de objetivos dar-se-á de maneira radial, as formas geométricas adequadas para dividir o cenário tático são os setores circulares.

O centro de massa calculado será a origem dos setores que dividirão o cenário tático. Dessa maneira, será possível analisar isoladamente o grau de ameaça e a decorrente necessidade de atenção para cada um dos setores.

Segundo Saaty e Vargas em [7], um dos axiomas que rege o AHP e garante sua robustez é o da Homogeneidade. Este

axioma diz que os elementos a serem comparados em um mesmo nível hierárquico, devem ser homogêneos entre si. Portanto, os elementos de um mesmo nível devem possuir a mesma ordem de magnitude.

Inferese, então, que a divisão do cenário em setores circulares de mesma variação angular garante a robustez do modelo sob o ponto de vista do AHP.

Com o intuito de ilustrar a divisão do cenário tático em setores, foi criada uma interface na Plataforma AEROGRAF [5]. Esse Sistema de Informações Geográficas baseia-se no conceito de componentes do tipo *plug-ins*, que são adicionados a uma estrutura de desenvolvimento denominada *framework*. Este *framework* fornece as principais funcionalidades requeridas nas tarefas de visualização de um cenário georreferenciado em duas e três dimensões [5].

A Fig. 3 exibe um exemplo fictício da disposição de alvos de interesse no terreno (triângulos azuis), o centro de massa (ponto verde) calculado pelo software em função dos pesos atribuídos a cada um dos alvos, bem como as linhas que dividem o cenário tático em seis setores circulares de 60°.

Segunda Etapa: Julgamentos

Uma vez que o problema está formulado e a hierarquia construída e validada, inicia-se o processo de julgamento, no qual o piloto exprimirá suas percepções através da construção das matrizes de comparação par a par dos critérios/subcritérios e dos *ratings*.

O método AHP pode ser implementado com a ajuda de um *software* de apoio à decisão, como o *SuperDecisions*, um programa livre, encontrado na internet para *download* em <http://www.superdecisions.com>.

Com o intuito de gerar um vetor prioridade pelo método AHP, cuja análise pictorial possa ser posteriormente realizada no SIG, a estrutura hierárquica exibida na Fig. 2 foi implementada no referido *software* e um dos autores do trabalho simulou os julgamentos par a par das matrizes de comparação, bem como a classificação das alternativas segundo os *ratings*, para uma divisão do cenário tático em seis setores.

Nascimento em [4] propõe a execução da Etapa Julgamentos em três passos:

Passo 1 – Comparação par a par: “um julgamento ou comparação é uma representação numérica de uma relação entre dois elementos que dividem uma mesma prioridade”[6]. As comparações ocorrem entre os critérios à luz do objetivo global, entre os subcritérios à luz dos critérios e entre os *ratings* de cada critério/subcritério. A quantificação dos julgamentos é feita utilizando-se uma escala de valores que varia de 1 a 9 (igual, moderado, forte, muito forte, extremo e, valores intermediários), denominada Escala Fundamental de Saaty (ver Tabela II).

A Fig. 4 ilustra um exemplo de comparações par a par realizadas entre os *ratings* à luz do critério “Potencial de Incurção”.

Passo 2 - Construção das Matrizes de Decisão: neste passo, as matrizes de comparação são construídas a partir dos julgamentos entre os elementos, considerando a Escala Fundamental de Saaty.

Os resultados numéricos obtidos com os julgamentos por meio da comparação paritária são colocados numa matriz *A* quadrada *n* x *n*. Este procedimento se repete para todos os

elementos de um determinado nível na hierarquia, com respeito a todos os elementos de um nível acima.

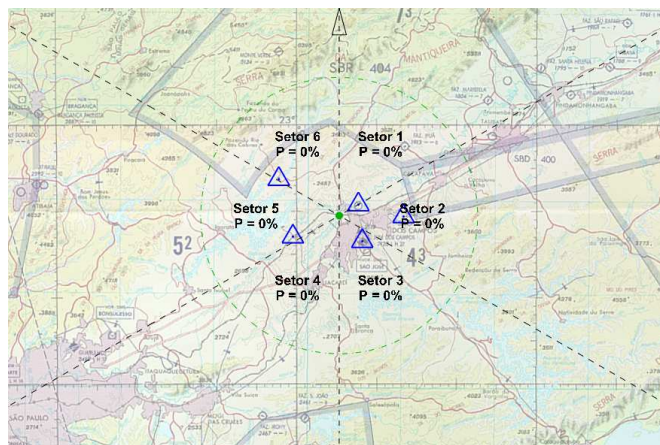


Fig. 3. Divisão do cenário tático em setores a partir da Plataforma AEROGRAF.

TABELA II: ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem de forma idêntica para o objetivo
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida, um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma solução de compromisso entre duas definições

A Tabela III exibe um exemplo de matriz de decisão feita a partir das comparações par a par realizadas entre os critérios à luz do objetivo global.

Repare que o axioma da Reciprocidade foi cumprido, uma vez que, na matriz exemplo, todo $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Assim, pode-se inferir que, de acordo com o julgamento do decisor em um dado contexto decisório, à luz do objetivo global, o critério “Ameaça Esperada” exerce uma dominância fraca sobre o critério “Cobertura Radar”, estando este entre igual importância e um pouco mais importante, de acordo com a escala Fundamental de Saaty.

Cada entrada a_{ij} da matriz de comparação deve ser considerada como uma estimativa da razão entre os elementos da linha de ordem *i* e os elementos da coluna de ordem *j*, isto é, $a_{ij} = w_i/w_j$.

Passo 3 - Verificação da Consistência: neste passo é realizada a verificação da consistência dos julgamentos das comparações par a par realizadas.

Sendo a referida matriz *A* (a_{ij} , $a_{ij}=w_i/w_j$) positiva e recíproca, ou seja, com $a_{ij} = 1/a_{ji}$, admitindo-se todos os julgamentos perfeitos, e se *A* satisfizer a condição $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ (*i, j, k* = 1,2,...,n) em todas as comparações, a matriz *A* é dita consistente.

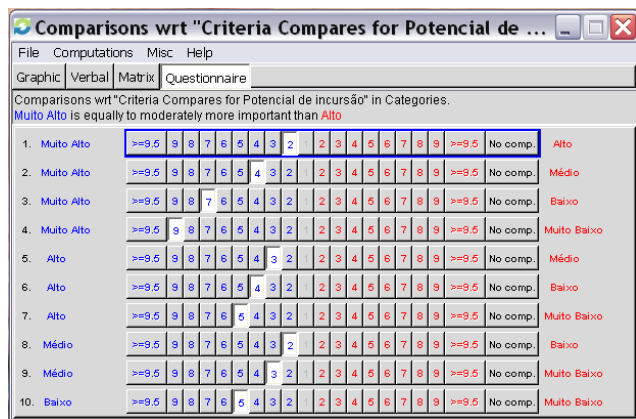


Fig. 4. Exemplo de comparações par a par entre os ratings à luz do critério “Ameaça Esperada”.

TABELA III: EXEMPLO DE MATRIZ DE DECISÃO DAS COMPARAÇÕES PAR A PAR ENTRE OS CRITÉRIOS À LUZ DO OBJETIVO GLOBAL

OBJETIVO	Cob. Radar	Pot. Incursão	Ameaça Esp.
Cob. Radar	1	3	1/2
Pot. Incursão	1/3	1	1/5
Ameaça Esp.	2	5	1

No entanto, como os julgamentos do decisor são passíveis de erros, espera-se que a matriz A também seja inconsistente. No caso de a matriz A ser inconsistente (porém recíproca e positiva), o autovalor n será maior ou igual a λ_{max} . Quanto mais próximo de n estiver o autovalor λ_{max} , mais consistentes serão os julgamentos do decisor e, por consequência, mais consistente será a matriz.

Saaty, em [6], propõe um método para o cálculo do índice de inconsistência de uma matriz, o qual reflete o grau de coerência dos julgamentos do decisor.

Um ponto importante a ser comentado é que as boas decisões são, na maioria das vezes, baseadas em julgamentos consistentes. Assim, a operação de verificação de consistência do AHP contribui muito porque age como um mecanismo de *feedback* para os decisores.

Terceira Etapa: Desenvolvimento Algébrico

Uma vez realizada a verificação de consistência dos julgamentos, executa-se o desenvolvimento algébrico do método AHP em três passos, propostos em [4] e descritos a seguir.

Passo 1 - Obtenção do autovalor máximo e do autovetor principal direito: a matriz formada pela comparação par a par entre critérios e subcritérios relacionados ao nível hierárquico imediatamente superior terá um vetor de pesos $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ obtendo-se a seguinte equação de matrizes: $AW = nW$, conforme (1).

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

Onde n é o maior autovalor (λ_{max}) de A , e W seu autovetor principal direito, que representa o vetor prioridade após normalização.

A Fig. 5, retirada do *software Super Decisions*, ilustra um exemplo de autovetor principal direito derivado da matriz de comparações par a par entre os subcritérios à luz do critério “Ameaça Esperada”.

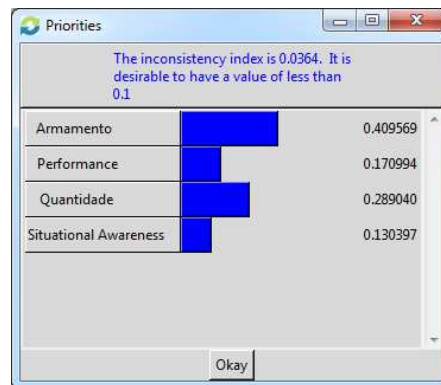


Fig. 5. Exemplo de autovetor principal direito das comparações par a par entre os subcritérios à luz do critério “Ameaça Esperada”.

Passo 2 - Agregação dos autovetores de prioridade: Saaty, em [6], define as prioridades como classificações numéricas medidas sobre uma escala de razão, dividindo-as em globais, totais e das alternativas. As prioridades locais são obtidas a partir das comparações par a par entre os critérios à luz do objetivo global, e entre os subcritérios à luz dos critérios. No *AHP-Ratings*, as prioridades locais das alternativas nada mais são do que as equivalências numéricas das categorias atribuídas. A agregação dos autovetores consiste, então, da somatória dos produtos entre as prioridades globais dos subcritérios (produto das prioridades locais dos subcritérios pelas prioridades globais dos critérios) e os valores dos ratings para cada alternativa.

Passo 3 - Resultado Final: realizados os passos anteriores, obtém-se o ranking de prioridades das alternativas.

A Tabela IV exhibe o vetor prioridade calculado pelo *software Super Decisions* com base nos julgamentos hipotéticos realizados por um dos autores desse trabalho.

TABELA IV: CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Graphic	Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking
	Setor 1	0.1657	0.1657	0.5955	3
	Setor 2	0.2523	0.2523	0.9066	2
	Setor 3	0.2783	0.2783	1.0000	1
	Setor 4	0.1327	0.1327	0.4769	4
	Setor 5	0.0987	0.0987	0.3548	5
	Setor 6	0.0722	0.0722	0.2592	6

IV. ANÁLISE DO VETOR PRIORIDADE NO SIG

Tendo em vista que o propósito maior desta seção é o de demonstrar os benefícios da análise pictorial de um vetor prioridade tipicamente numérico gerado pelo método AHP, os detalhes da implementação no *Super Decisions*, como tabelas e vetores prioridade dos critérios à luz do objetivo principal e subcritérios à luz dos critérios, foram omitidos. Serão utilizadas apenas as prioridades exibidas na Tabela IV.

Para o problema em discussão, qual seja, o de mensurar ameaças a fim de adequar o posicionamento das aeronaves de

defesa do Pacote na fase dos ataques, somente o estabelecimento de um ranking numérico entre os setores não seria o suficiente.

Uma das principais razões em representar graficamente a ameaça que foi expressa por meio de números é a necessidade constante que os pilotos têm de se manterem orientados espacialmente, quer seja na fase de planejamento, quer seja na execução do voo em si.

Valendo-se da divisão do cenário em setores circulares e da característica geométrica dos vetores, criou-se, então, uma interface na Plataforma AEROGRAF que posiciona nas bissetrizes dos setores circulares, vetores de tamanho proporcional ao vetor prioridade calculado pelo método AHP.

A Fig. 6 ilustra a aplicação da interface para o vetor prioridade idealizado exibido na Tabela IV.

Adicionalmente, como pode ser verificado na Fig. 6, o *software* gera também um vetor resultante (seta em amarelo) da soma de todos os demais vetores.

É possível inferir algumas conclusões com base na análise desse vetor resultante.

As aeronaves de superioridade aérea do Pacote necessitam estabelecer órbitas durante a “espera” pelas ameaças inimigas. A orientação das órbitas é importante, pois representa a direção para onde os radares de bordo estarão apontados a maior parte do tempo durante a procura pelas ameaças que porventura surjam. Uma vez que o vetor resultante sintetiza todas as ameaças, as órbitas podem ser orientadas com base na direção apontada por este vetor.

Outra interpretação possível para esse vetor é o quão afastado da região dos alvos as aeronaves de defesa do pacote podem ser posicionadas a fim de criar a barreira entre a ameaça e as aeronaves amigas. A idéia é tornar-se uma ameaça prioritária para a defesa aérea inimiga o quanto antes, proporcionando tempo suficiente para os ataques. Um vetor resultante de tamanho proporcionalmente grande pode indicar que as ameaças potenciais estão concentradas em poucos setores. Do contrário, um vetor resultante pequeno indica que as ameaças estão igualmente distribuídas no cenário, não valendo a pena “arriscar” se antecipar a elas em nenhuma direção específica. Nesse último caso, o posicionamento nas proximidades do centro de massa da região faz sentido.

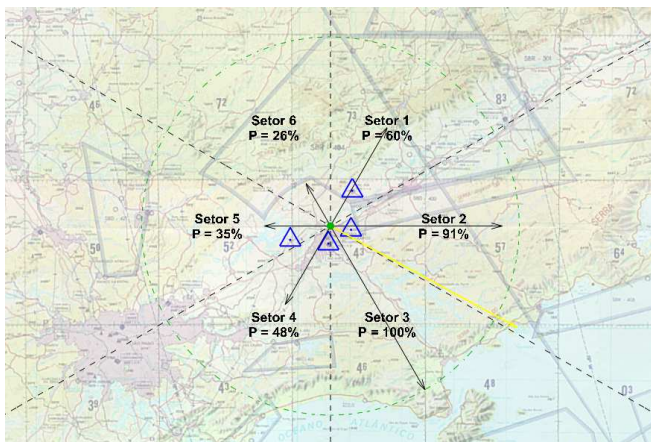


Fig. 6. Análise visual do vetor prioridade na Plataforma AEROGRAF.

V. LIMITAÇÕES DA PROPOSTA

As descrições dos critérios e subcritérios da estrutura hierárquica apresentadas na seção III evidenciam uma grande

dependência entre os julgamentos requeridos e os dados provenientes das análises de inteligência operacional.

Tal fato não constitui uma limitação da metodologia em si, mas sim uma consequência da doutrina que sustenta as ações de combate e que se baseia em três grandes conceitos: Logística, Comando e Controle e Inteligência. Isso indica que, quanto mais confiáveis forem as informações de inteligência à disposição dos pilotos, mais robusta será a análise das ameaças.

Uma das vantagens do método AHP com *ratings* é que o mesmo possibilita a inserção e a retirada de novas alternativas ao modelo sem ocasionar inversão de *ranking* [8].

Para a proposta de divisão do cenário em setores, tal assertiva não é verdadeira, uma vez que, se forem criados ou excluídos setores da divisão originalmente avaliada, todos os julgamentos em relação aos mesmos, ainda que absolutos, deverão ser refeitos. Isto porque as avaliações dependem de informações georreferenciadas, como por exemplo, a existência de bases aéreas no interior do setor. Ao ser criado um novo setor, pode ser que uma base aérea deixe de pertencer a um dado setor e passe a pertencer a outro, o que evidenciaria a dependência entre as alternativas e a inviabilidade da aplicação do AHP com *ratings*.

No entanto, assumindo que a divisão do cenário é fixa, ou seja, que não serão inseridos ou retirados setores da estrutura originalmente definida, as alternativas passam a ser independentes, e o desempenho/características de um setor passa a não sofrer influência dos demais.

Isso significa que os pilotos podem dividir o cenário da maneira como acharem mais conveniente, fazendo uso de quantos setores forem necessários. Mas, a partir de então, somente os julgamentos relativos a cada um dos setores é que poderão ser modificados. Se for necessário inserir ou retirar setores, todos os julgamentos deverão ser refeitos.

Do ponto de vista prático, é pouco provável que o piloto necessite modificar a estrutura original de divisão do cenário. Por outro lado, as atualizações de inteligência são corriqueiras no contexto das operações aéreas e devem ser absorvidas pelo modelo. Em se tratando de *trade-offs*, pode-se dizer que a proposta desenvolvida nesse artigo deixou de “aproveitar” um ponto positivo do AHP *ratings* (inclusão e retirada de alternativas sem inversão de *rank*), em detrimento da rapidez e da flexibilidade em atualizar julgamentos em um contexto notavelmente dinâmico.

VI. CONCLUSÃO

Os métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) destinam-se, acima de tudo, a esclarecer o processo decisório, de modo a auxiliar os decisores na avaliação das alternativas do problema em questão. Portanto, o objetivo dos métodos de AMD não é apresentar ao decisor uma solução ótima para o problema, mas, auxiliar o processo de decisão de acordo com as preferências do decisor junto às alternativas [4].

As incursões de grande profundidade ao território inimigo forçam os pilotos de defesa do Pacote a assumir que as ameaças inimigas possam surgir de qualquer direção. Portanto, uma divisão exaustiva do cenário tático em setores circulares, a avaliação de cada setor segundo seu potencial de ameaça com base no método AHP-*ratings*, e a representação gráfica do vetor prioridade resultante em um Sistema de Informações Geográficas, clarifica o entendimento dos

pilotos de *Sweep* e *Escort* sobre como as ameaças estão distribuídas espacialmente, auxiliando-os na decisão de onde posicionar suas aeronaves a fim de melhor proteger as aeronaves do Pacote durante a fase dos ataques.

Para trabalhos futuros, sugere-se o uso do vetor prioridade resultante do método AHP a fim de gerar uma escala de cores que indique visualmente o nível de ameaça dos setores avaliados, incluindo uma faixa de transição entre os mesmos. Tal representação facilitará ainda mais a interpretação por parte dos pilotos sobre como as ameaças estão distribuídas no cenário.

Outra sugestão ainda é o estudo sobre a viabilidade em aplicar a mesma proposta desse trabalho, porém considerando um contexto defensivo, como por exemplo, aeronaves de uma força naval provendo a segurança de um porta-aviões.

AGRADECIMENTOS

À equipe de desenvolvimento da Plataforma AEROGRAF, do Instituto de Estudos Avançados (IEAV), por viabilizar a interface utilizada neste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Comando Geral de Operações Aéreas. Manual do Curso de Planejamento de Missões Aéreas Compostas. Brasília, DF, 2009.
- [2] BELDERRAIN, M. C. N. Notas de aula de MB-217: Análise de Decisão, em 2011.
- [3] ENSDLEY, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness. *Human Factors*, 37, 32-64.
- [4] NASCIMENTO, L. P. A. S. Aplicação do método AHP com as abordagens *ratings* e BOCR: o projeto FX-2. 2010. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [5] PETERSEN JÚNIOR, F., AQUINO, M. R. C. E SALLES, R. N. (2008), Plataforma AEROGRAF: um SIG voltado para a Força Aérea, *Spectrum (Revista do Comando-Geral de Operações Aéreas)*, 11, 26-28.
- [6] SAATY, T. L. (1990), How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process, *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.
- [7] SAATY, T.L. and VARGAS, L.G. (2000), *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Boston. Kluwer Academic Publishers.
- [8] SAATY, T.L. (2006), Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network process. *European Journal of Operational Research*. v. 168, n. 1, 557-570.
- [9] SAATY, T. L. (2008), Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1 (1), 83-98.
- [10] UNITED STATES. Air Force Basic Doctrine: Air Force Doctrine Document 1. Washington, DC: United States Air Force, 2003. 118 p.
- [11] UNITED STATES. Department of Defense. Dictionary of Military and Associated Terms. Washington, DC: United States Air Force, 2001. 747 p.