

PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS PARA A ALOCAÇÃO DE MEIOS DE DEFESA CONTRA PACOTE DE ATAQUE AÉREO

**Danielle Aguiar de Araujo
Mônica Maria De Marchi
Nilton de Oliveira Lessa**

Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Divisão de Geo-Inteligência (EGI)
Subdivisão de Sistemas de Apoio a Decisão (EGI-A)
Caixa Postal 6044 - CEP 12228-970 - São José dos Campos, SP
e-mails: [danielleaa, monica, nilton.lessa]@ieav.cta.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem inicial para o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão no contexto de defesa aeroespacial contra pacote de ataque aéreo, contribuindo para o planejamento da defesa contra várias ameaças em potencial em um cenário dinâmico. Nesse sentido, uma metodologia de otimização é aplicada para designar os sistemas de armas de defesa com o objetivo de minimizar a efetividade do pacote de ataque aéreo inimigo. A formulação considera: (1) o nível de ameaça representado por cada incursor, (2) a capacidade dos sistemas de armas de defesa disponíveis e (3) a tática de posicionamento da artilharia antiaérea. A efetividade da solução é analisada a fim de avaliar a influência da disponibilidade, do posicionamento e da capacidade dos sistemas de armas de defesa sobre as estratégias de defesa propostas.

PALAVRAS-CHAVE. Modelo de Apoio à Decisão. Otimização. Efetividade. Outras Aplicações em PO.

ABSTRACT

This work provides an initial approach to developing a decision support model in the context of aerospace defense against air strike package, contributing to the defense planning against multiple potential threats in a dynamic environment. Accordingly, an optimization methodology is applied to assign the defense weapon systems in order to minimize the effectiveness of the enemy air strike package. The formulation takes into account: (1) the threat level posed by an intruder, (2) the capability of the available defense weapon systems and (3) the positioning tactic of the anti-aircraft artillery. The solution effectiveness is analyzed in order to evaluate the influence of availability, positioning and capability of the defense weapon systems on the proposed defense strategies.

KEYWORDS. Decision support model. Optimization. Effectiveness. Other applications in OR.

1. Introdução

Ações de defesa aeroespacial visam garantir os interesses vitais e a segurança da nação, bem como a integridade dos patrimônios nacionais, impedindo a consecução de atos hostis (Cambeses Júnior, 2004). Nestas ações, o desenvolvimento de tarefas — como a detecção de vetores aeroespaciais, a classificação de tais vetores como hostis ou não, a avaliação da ameaça apresentada pelos incursores hostis e a alocação eficiente dos meios de defesa em missões de interceptação — resulta no processamento, em curto espaço de tempo, de grande quantidade de informações relativas às forças inimigas, aos meios de defesa disponíveis e à análise do terreno e das condições meteorológicas, tornando os processos decisórios envolvidos particularmente complexos.

Em incursões segundo a tática de pacote de ataque aéreo, um grupo de aeronaves atua de forma combinada, proporcionando apoio mútuo contra os pontos sensíveis de um território inimigo, a fim de sobrecarregar as defesas de seu oponente e maximizar o efeito de destruição sobre o conjunto de alvos (Castro, 2002). Nesta situação, a ação altamente coordenada dos incursores intensifica o nível de complexidade da atividade de defesa, acentuando a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão capazes de prover um diagnóstico do cenário da forma mais precisa e objetiva possível e, principalmente, auxiliar a adoção de estratégias de defesa aeroespacial efetivas.

Este trabalho apresenta uma abordagem inicial para o desenvolvimento de um modelo de análise de decisão capaz de apoiar o planejamento de uma ação de defesa aeroespacial contra um pacote de ataque aéreo, visando garantir a integridade dos pontos sensíveis sob ameaça e minimizar o impacto das ações hostis. Sob este enfoque, feita a identificação de incursores no espaço aéreo, a defesa deve ser capaz de avaliar a ameaça que cada vetor do pacote representa contra cada um dos pontos sensíveis, dada sua provável missão, para que, posteriormente, seja realizado o planejamento da ação defensiva com a alocação dos meios de defesa nas diversas missões de interceptação.

A formulação matemática da fase de alocação de armas contra pacote de ataque aéreo é apresentada na Seção 2. Esta formulação foi implementada com o software de otimização LINGO 11.0, considerando-se o cenário proposto em Vieira Junior *et. al.* (2009). Na Seção 3, o cenário no qual o modelo foi implementado é descrito e a análise da solução proposta é realizada. O estudo do comportamento do modelo, por meio da análise de sensibilidade da estratégia de defesa proposta e de sua efetividade frente aos fatores de decisão considerados na formulação, é desenvolvido na Seção 4, e, na Seção 5, são apresentadas considerações finais sobre as contribuições, as limitações e os próximos passos deste trabalho.

2. Formulação Matemática

A alocação de armas refere-se à determinação de quais incursores serão interceptados e de quais armas de defesa serão engajadas nestas interceptações. No cenário adotado, tais designações têm por finalidade a minimização da efetividade do pacote de ataque aéreo, alocando armas de defesa segundo a importância dos pontos sensíveis, a capacidade das armas de defesa contra os vetores hostis identificados e o nível de ameaça representado por cada incursor contra cada ponto sensível.

Deste modo, no problema de alocação de armas a alternativa de decisão adequada será aquela que, respeitando às restrições de disponibilidade das armas de defesa (meios aéreos e meios antiaéreos), for capaz de levar a um patamar mínimo a efetividade do pacote de ataque aéreo inimigo (Hosein, 1989), ou em sentido inverso, maximizar a integridade dos pontos sensíveis, como se segue.

$$\text{Maximizar } \sum_{k=1}^K W_k \prod_{j=1}^n \left(1 - \pi_{jk} \prod_{a=1}^A (1 - p_{aj})^{y_{ak}} \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \right) \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq disp(i), \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad (3)$$

Em que:

K – número de pontos sensíveis sob ameaça

n – número de incursores

m – número de tipos de meios aéreos de defesa

$disp(i)$ – disponibilidade de meios aéreos do tipo i , $\forall i = 1, 2, \dots, m$

A – número de meios antiaéreos de defesa

W_k – grau de importância do ponto sensível k , $\forall k = 1, 2, \dots, K$

π_{jk} – probabilidade do incursor j efetuar ação hostil contra um ponto sensível k , $\forall j = 1, 2, \dots, n, \forall k = 1, 2, \dots, K$

p_{ij} – probabilidade de um meio aéreo de defesa do tipo i impedir que o vetor hostil j execute ação hostil, $\forall i = 1, 2, \dots, m, \forall j = 1, 2, \dots, n$

p_{aj} – probabilidade de um meio antiaéreo de defesa a impedir que o vetor hostil j execute ação hostil, $\forall a = 1, 2, \dots, A, \forall j = 1, 2, \dots, n$

x_{ij} – quantidade de meios aéreos de defesa do tipo i alocados contra o incursor j , $\forall i = 1, 2, \dots, m, \forall j = 1, 2, \dots, n$

y_{ak} – variável de alocação de um meio antiaéreo de defesa a para efetuar a defesa do ponto sensível k , $\forall a = 1, 2, \dots, A, \forall k = 1, 2, \dots, K$

$y_{ak} = \begin{cases} 1, & \text{se o meio antiaéreo de defesa } a \text{ é alocado para proteção do ponto sensível } k \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

A Equação (1) é a função objetivo que maximiza a soma do grau de importância esperado dos pontos sensíveis não atingidos por ações hostis e, portanto, maximiza a integridade dos pontos sensíveis da defesa. A restrição indicada por (2) garante que o total de meios aéreos de defesa alocados nas missões de interceptação não ultrapassar a disponibilidade de tais armas. E, por fim, (3) exige que as variáveis de decisão sejam inteiras.

É interessante destacar que y_{ak} refere-se à alocação dos meios antiaéreos de defesa. Uma vez que no ambiente operacional de defesa aeroespacial as unidades de artilharia antiaérea são previamente alocadas, o valor assumido por cada y_{ak} é um dado de entrada, de modo que as variáveis de decisão do problema restringem-se aos x_{ij} , relativos à alocação dos meios aéreos de defesa.

Há outras considerações, que apesar de não se referirem às variáveis de decisão, são relevantes para que seja garantida a validade do modelo, a saber:

$$\sum_{C_k} y_{ak} \leq A, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \forall i = 1, 2, \dots, m \text{ e } \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$0 \leq p_{aj} \leq 1, \forall a = 1, 2, \dots, A \text{ e } \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$0 \leq \pi_{jk} \leq 1, \forall j = 1, 2, \dots, n \text{ e } \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$W_k \geq 0, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

C_k é o conjunto dos meios antiaéreos de defesa capazes de proteger o ponto sensível k de ações hostis, $\forall k = 1, 2, \dots, K$. Assim sendo, (4) exige que o número de meios antiaéreos alocados não seja maior que sua disponibilidade (A).

As Equações (5), (6) e (7) determinam, respectivamente, que as capacidades dos meios de defesa aéreos e antiaéreos e o grau de ameaça dos incursores, representados por meio de probabilidades, sejam números reais entre 0 e 1. E, por fim, (8) exige que o grau de importância associado a cada um dos pontos sensíveis pertença ao conjunto dos números reais não-negativos.

Portanto, tendo em vista a formulação matemática proposta para a construção do modelo, pode-se realizar a alocação eficiente dos meios aéreos de defesa, a partir do conhecimento da importância dos pontos sensíveis segundo o julgamento da defesa, da capacidade dos meios de defesa, do prévio posicionamento dos meios antiaéreos de defesa e da avaliação da ameaça dos vetores hostis identificados.

3. Implementação do Modelo

Para a simulação do modelo utilizou-se o cenário e os dados presentes em Vieira Junior *et. al.* (2009). Neste trabalho, os autores supõem que uma força inimiga planeja um pacote de ataque aéreo contra um determinado território objetivando obter superioridade aérea e assumem as considerações a seguir:

- A força inimiga dispõe das seguintes aeronaves: 12 A-1, 12 F-5, 12 A-29 e 12 AT-26;
- As aeronaves são agrupadas em esquadrilhas segundo suas similaridades quanto à velocidade e altitude, de forma que as aeronaves A-1 e F-5 podem voar juntas e as aeronaves A-29 e AT-26 podem compor a mesma esquadrilha;
- Cada aeronave tem uma probabilidade de destruição em relação a cada alvo e a partir desta probabilidade individual, determina-se a probabilidade de destruição de cada alvo por cada uma das esquadrilhas de ataque formadas, ou seja, o nível de ameaça de cada esquadrilha incursora contra cada ponto sensível (π_{jk});
- Há 26 pontos sensíveis propensos ao ataque, associados a graus de importância (W_k) cuja soma é igual à unidade. A Tabela 1 apresenta tais pontos sensíveis e seus respectivos graus de importância.

Embora em Vieira Junior *et. al.* (2009) sejam planejadas duas missões de pacote de ataque aéreo, para o estudo a ser desenvolvido neste trabalho apenas o primeiro ataque planejado será considerado, cuja a composição e alvos são descritos na Tabela 2.

TABELA 1: PONTOS SENSÍVEIS E SEUS GRAUS DE IMPORTÂNCIA

Alvo	Descrição	W_k	Alvo	Descrição	W_k
1	Distr. B1	0,1523	14	Usina	0,0381
2	Distr. B2	0,0635	15	Radar 1	0,0600
3	Hangar - B1	0,0208	16	Radar 2	0,0300
4	Hangar - B2	0,0166	17	Radar 3	0,0150
5	Hangar - B3	0,0042	18	Radar 4	0,0450
6	Pátio 1 B1	0,0138	19	Pista-B1	0,0384
7	Pátio 2 B1	0,0092	20	Pista-B2	0,0512
8	Pátio B2	0,0308	21	Pista-B3	0,0384
9	Pátio 1 B3	0,0046	22	Link-B1	0,0400
10	Pátio 2 B3	0,0185	23	Link-B2	0,0100
11	Paiol-B1	0,0332	24	Link-B3	0,0300
12	Paiol-B2	0,0664	25	Centro C2	0,0834
13	Paiol-B3	0,0664	26	Link-Centro C2	0,0200

TABELA 2: COMPOSIÇÃO E ALVOS DO ATAQUE CONSIDERADO

	A-1	F-5	A-29	AT-26	Alvos
Esq. 1	4	4	0	0	Distr. B1
Esq. 2	2	4	0	0	Centro C2
Esq. 3	4	2	0	0	Paiol-B3
Esq. 4	0	0	12	0	Pista-B2
Esq. 5	2	2	0	0	Radar 4
Esq. 6	0	0	0	12	Pista-B3

Quanto à capacidade das armas de defesa na interceptação dos vetores incursores, representadas em termos de probabilidade (p_{aj} e p_{ij}), foram gerados números aleatórios entre 0 e 1.

Inicialmente, considerou-se a disponibilidade de três meios antiaéreos de defesa, AAAe 1, AAAe 2 e AAAe 3, localizados de modo a proteger os pontos sensíveis indicados na Tabela 3, e de três tipos de meios aéreos de defesa, D1, D2 e D3, cada um deles com apenas uma unidade disponível.

TABELA 3: PONTOS SENSÍVEIS PROTEGIDOS PELOS MEIOS ANTIAÉREOS

Meios Antiaéreos de Defesa	Pontos sensíveis protegidos
AAAe 1	Radar 4
AAAe 2	Centro C2 Link-Centro C2
AAAe 3	Distr. B1 Hangar - B1 Pátio 1 B1 Pátio 2 B1 Paiol-B1 Pista-B1 Link-B1

O modelo foi implementado no software de otimização LINGO 11.0 e a solução proposta é apresentada na Tabela 4.

TABELA 4: ESTRATÉGIA DE DEFESA PROPOSTA PELO MODELO CONTRA O PACOTE DE ATAQUE AÉREO CONSIDERADO

Nº de armas	Esq 1	Esq 2	Esq 3	Esq 4	Esq 5	Esq 6	Função objetivo
D1=1 D2=1 D3=1	AAAe 3 D1	AAAe 2 D2	D3	-	AAAe 1	-	0,0918

Posto que a função objetivo do modelo proposto expressa a soma do grau de importância esperado dos pontos sensíveis não atingidos por ações hostis com a aplicação da estratégia de defesa indicada, esta não fornece informação significativa sobre a real efetividade da estratégia. Por exemplo, ao se aplicar a tática de defesa proposta, um dos dezesseis resultados possíveis é aquele em que apenas as missões de interceptação contra as esquadrilhas 2 e 3 são bem sucedidas, de tal modo que os pontos sensíveis ficam sujeitos às ações hostis das esquadrilhas 1, 4, 5 e 6, as quais não são neutralizadas pela defesa.

Uma vez que o somatório dos graus de importância associados aos pontos sensíveis é igual à unidade, pode-se adotar a soma dos graus de importância dos pontos sensíveis não atingidos pelas ações hostis como medida da efetividade da estratégia de defesa em cada possível resultado de sua aplicação, conforme indicado em (9).

$$EFTV_Def = 100 * \sum_{k_{protegidos}} W_k \tag{9}$$

Em que:

$EFTV_Def$ – efetividade da estratégia de defesa

$k_{protegidos}$ – pontos sensíveis que não foram atacados

W_k – grau de importância do ponto sensível $k, \forall k = 1, 2, \dots, K$

Deste modo, a análise da efetividade da estratégia de defesa proposta pelo modelo de otimização foi desenvolvida por meio de simulações de seus possíveis resultados utilizando a ferramenta *Crystal Ball*. As probabilidades de ocorrência dos dezesseis possíveis valores de efetividade da estratégia de defesa indicada na Tabela 4 foram obtidas, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Histograma dos níveis de efetividade da estratégia de defesa proposta

O resultado obtido com tais simulações indica que, para as capacidades dos meios de defesa disponíveis e os níveis de ameaça dos incursores considerados, a máxima efetividade que se pode alcançar com a estratégia de defesa indicada na Tabela 4 é igual a 91,04%, interceptando-se as esquadrilhas incursoras 1, 2, 3 e 5, e que a probabilidade de ocorrência deste nível de efetividade é de 0,4632. Além disso, a probabilidade de se alcançar mais de 80% de efetividade com a aplicação da estratégia de defesa proposta é de 0,8564.

Nota-se, portanto, que a realização da análise de efetividade fornece dados bastante significativos para o apoio do planejamento da defesa. Deste modo, além de propor uma tática de defesa eficiente para o cenário considerado, o modelo de análise de decisão é capaz de evidenciar quais conseqüências podem ser esperadas com a aplicação da estratégia, bem como suas probabilidades de ocorrência, possibilitando, por exemplo, que o decisor antecipe o planejamento de ações de apoio aos pontos sensíveis com maior probabilidade de serem atingidos.

4. Análise do Comportamento do Modelo

O desenvolvimento de análises de sensibilidade da estratégia proposta em relação aos parâmetros de defesa considerados na formulação matemática é de fundamental importância para o estudo do comportamento do modelo. Desta forma, as estratégias propostas e suas efetividades foram analisadas modificando-se:

- a disponibilidade dos meios aéreos de defesa;
- o posicionamento dos meios antiaéreos de defesa;
- a capacidade de interceptação das armas de defesa disponíveis.

4.1 Análise do efeito da disponibilidade dos meios aéreos de defesa

A Tabela 5 apresenta a alocação proposta pelo modelo com diferentes disponibilidades de aeronaves de interceptação, bem como o valor da função objetivo e os valores limites de efetividade da estratégia de defesa em cada caso.

TABELA 5: ALOCAÇÃO ÓTIMA DAS ARMAS DE DEFESA PARA DIFERENTES DISPONIBILIDADES DOS MEIOS AÉREOS DE DEFESA

Nº de armas	Esq 1	Esq 2	Esq 3	Esq 4	Esq 5	Esq 6	F.O.	Efetividade da defesa	
D1=1 D2=1 D3=1	AA Ae3 D1	AA Ae2 D2	D3	-	AA Ae1	-	0,0918	Max	91,04
D1=2 D2=1 D3=1	AA Ae3 D1	AA Ae2 D1	D3	D2	AA Ae1	-	0,1498	Max	96,16
D1=3 D2=1 D3=1	AA Ae3 D1	AA Ae2 D1	D3	D2	AA Ae1 D1	-	0,2504	Max	96,16
D1=4 D2=1 D3=1	AA Ae3 D1	AA Ae2 D1	D3	D2	AA Ae1 D1	D1	0,4099	Max	100,00
D1=1 D2=2 D3=1	AA Ae3 D1	AA Ae2 D2	D3	D2	AA Ae1	-	0,1363	Max	96,16
D1=1 D2=3 D3=1	AA Ae3 D2	AA Ae2 D2	D3	D2	AA Ae1 D1	-	0,1921	Max	96,16
D1=1 D2=4 D3=1	AA Ae3 D2	AA Ae2 D2	D3	D2	AA Ae1 D1	D2	0,2404	Max	100,00
D1=1 D2=1 D3=2	AA Ae3 D1	AA Ae2 D2	D3	-	AA Ae1 D3	-	0,1281	Max	91,04
D1=1 D2=1 D3=3	AA Ae3 D3	AA Ae2 D1	D3	D2	AA Ae1 D3	-	0,1651	Max	96,16
D1=1 D2=1 D3=4	AA Ae3 D3	AA Ae2 D1	D3	D2	AA Ae1 D3	-	0,1911	Max	96,16
								Min	56,33

Pode-se verificar que o acréscimo no número de armas de defesa disponíveis aumenta o valor da função objetivo do modelo de otimização, mas não implica, necessariamente, no aumento do número de incursões interceptadas, ou seja, em maior efetividade da tática de defesa, visto que não há restrições quanto à alocação de mais de um meio de defesa na interceptação de um mesmo incursor.

Considerando-se adequado que a defesa alcance no mínimo uma efetividade de 80% contra os incursores, foi analisado como a disponibilidade de armas altera a probabilidade de ocorrência de valores de efetividade maiores que este patamar. A Figura 2 apresenta as probabilidades de ocorrência de valores de efetividade maiores que 80% para os casos em que há variação somente na disponibilidade de armas de defesa do tipo D1, ou seja, quantidade de meios D1 variando de 1 a 4, com a quantidade de meios D2 e D3 fixa e igual a 1.

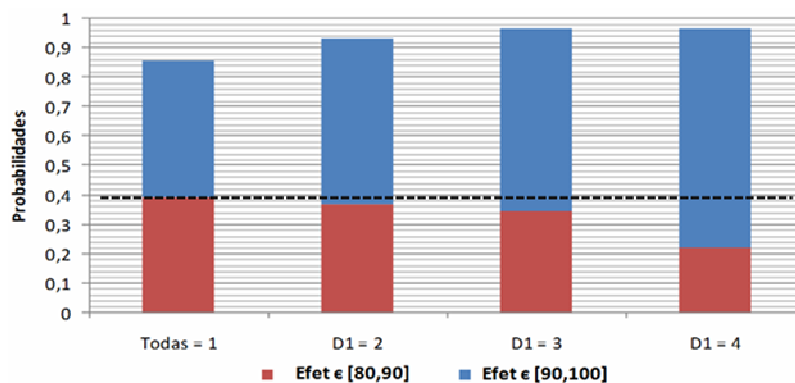


Figura 2: Probabilidades de ocorrência de níveis de efetividade de defesa maiores que 80% para diferentes disponibilidades da arma de defesa D1

Pela Figura 2, observa-se que o acréscimo na disponibilidade da arma D1 reduz as probabilidades de a efetividade estar no intervalo maior que 80% e menor que 90% ($Efet \in [80,90]$) e aumenta a probabilidade da efetividade ser maior que 90% ($Efet \in [90,100]$), de forma que, ao fim, cresce a expectativa da efetividade da estratégia de defesa ser maior que 80% ($Efet \in [80,100]$). O maior acréscimo verificado ocorre quando o número de armas do tipo D1 aumenta de 1 para 2. O efeito observado é reduzido ao elevar-se a disponibilidade do meio D1 de 2 para 3, tornando-se pouco perceptível com o aumento de 3 para 4 armas, apesar de neste último caso ocorrer uma considerável elevação da probabilidade de $Efet \in [90,100]$. Ou seja, conquanto a alocação de uma quarta arma do tipo D1 torne a defesa mais efetiva, como uma efetividade maior que 80% já é considerada adequada, a utilização de quatro armas D1 pode não ser vantajosa do ponto de vista de eficiência ou de custo.

A mesma análise foi desenvolvida alterando-se a disponibilidade dos meios de defesa D2 e D3, como indicado na Figura 3 e na Figura 4.

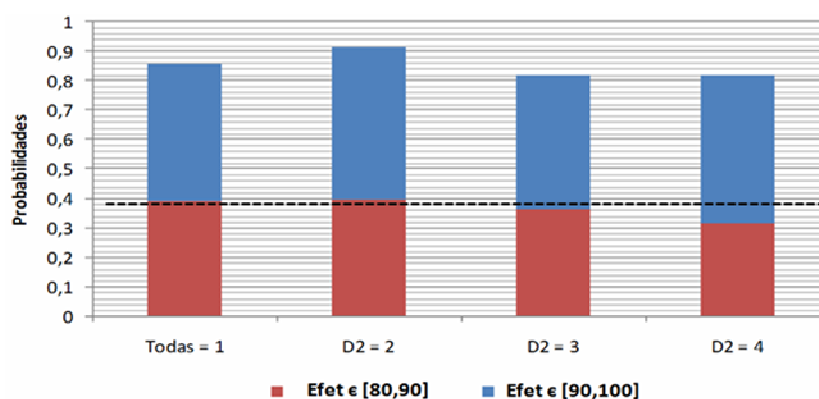


Figura 3: Probabilidades de ocorrência de níveis de efetividade de defesa maiores que 80% para diferentes disponibilidades da arma de defesa D2

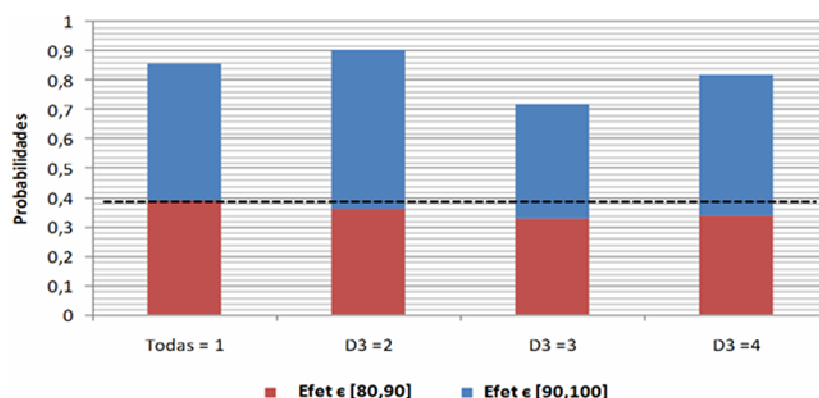


Figura 4: Probabilidades de ocorrência de níveis de efetividade de defesa maiores que 80% para diferentes disponibilidades da arma de defesa D3

Nesses casos verifica-se que o aumento da disponibilidade de algumas armas pode resultar na redução da probabilidade da efetividade da defesa ser maior que 80% (por exemplo, Figura 4, D3 = 3), embora o valor da função objetivo aumente (conforme apresentado na Tabela 5). Isto dependerá da capacidade de interceptação do meio de defesa contra os incursores. Por conseguinte, constata-se que o valor da função objetivo é uma informação pouco significativa, não sendo uma representação apropriada da efetividade da estratégia de defesa proposta, o que torna essencial a análise da efetividade da tática com simulações.

4.2 Análise do efeito do posicionamento dos meios antiaéreos de defesa

Para avaliar as alterações da estratégia de defesa devido ao posicionamento dos meios antiaéreos, foram realizadas simulações variando-se a posição de tais armas.

A critério de exemplificação, a Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam, respectivamente, a alocação proposta pelo modelo para cada uma das possíveis posições do meio antiaéreo AAAe 1 e as probabilidades de $Efet \in [80,100]$ e $Efet \in [90,100]$, em cada caso. Os dados em negrito referem-se aos resultados obtidos na primeira implementação do modelo, com este meio de defesa em sua posição inicial, ou seja, protegendo o radar 4.

TABELA 6: RESULTADOS DA ESTRATÉGIA DE DEFESA PARA DIFERENTES POSIÇÕES DO MEIO ANTIAÉREO DE DEFESA AAAE 1

Posição	Esq 1	Esq 2	Esq 3	Esq 4	Esq 5	Esq 6	F.O.	Efetividade da defesa	
Radar 2	AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	-	-	-	0,0922	Max	86,54
								Min	56,33
Radar 3	AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	-	-	-	0,0877	Max	86,54
								Min	56,33
Radar 4	AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	-	AAAe1	-	0,0918	Max	91,04
								Min	56,33
Centro C2	AAAe3 D1	AAAe1 AAAe2 D2	D3	-	-	-	0,1280	Max	86,54
								Min	56,33
Base Aérea 1	AAAe1 AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	-	-	-	0,1720	Max	86,54
								Min	56,33
Base Aérea 2	AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	AAAe1	-	-	0,1404	Max	91,66
								Min	56,33
Base Aérea 3	AAAe3 D1	AAAe2 D2	AAAe1 D3	-	-	AAAe1	0,1167	Max	90,38
								Min	56,33
Usina	AAAe3 D1	AAAe2 D2	D3	-	-	-	0,0965	Max	86,54
								Min	56,33

TABELA 7: PROBABILIDADES DE EFETIVIDADE MAIORES QUE 80% E 90% PARA CADA POSIÇÃO DA ARMA AAAE1

Posição	Probabilidade de a efetividade ser maior que 80% $Efet \in [80,100]$	Probabilidade de a efetividade ser maior que 90% $Efet \in [90,100]$
Radar 1	0,5723	-
Radar 2	0,5723	-
Radar 3	0,5723	-
Radar 4	0,8564	0,4632
Centro C2	0,6014	-
Base Aérea 1	0,5723	-
Base Aérea 2	0,8026	0,3758
Base Aérea 3	0,7681	0,2279
Usina	0,5723	-

Verifica-se que quando o meio antiaéreo AAAe 1 é posicionado para proteger a base aérea 2, obtém-se uma efetividade máxima (91,66%), maior que no caso inicial (91,04%), quando posicionado para proteger o radar 4. Assim, poderia ser intuitivo concluir que a alocação de AAAe 1 na base aérea 2 é mais efetiva que a estratégia inicialmente proposta, quando este meio protege o radar 4.

No entanto, observando-se as probabilidades da Tabela 7, verifica-se que as probabilidades de $Efet \in [80,100]$ e $Efet \in [90,100]$ são maiores quando este meio antiaéreo é posicionado de forma a proteger o radar 4 e não a base aérea 2. Este fato é consequência da maior capacidade de interceptação deste meio contra a esquadrilha incursora 5, que visa atingir o radar 4, em comparação com a sua capacidade contra a esquadrilha 4, cujo alvo é a pista da base aérea 2.

Ao se efetuar este tipo de análise para todos os meios antiaéreos de defesa nota-se que a distribuição prévia destes meios de defesa é um fator de decisão relevante para a estratégia de defesa, capaz de causar alterações não triviais na alocação ótima dos meios aéreos.

4.3 Análise do efeito da capacidade dos meios de defesa

Para finalizar o estudo do comportamento do modelo, foi desenvolvida a análise de sensibilidade da estratégia proposta pelo modelo em relação à capacidade dos meios de defesa. Observaram-se dois tipos gerais de comportamento: um relativo aos meios aéreos de defesa e outro referente aos meios antiaéreos.

Ao se alterar a capacidade de defesa dos meios antiaéreos, a função objetivo do modelo se mantém estritamente crescente em todo intervalo variando apenas sua inclinação quando a alocação ótima é modificada. A título de ilustração do que foi observado, a Figura 5 apresenta o comportamento da função objetivo com a variação da capacidade de defesa do meio antiaéreo AAAe 3 contra a esquadrilha 3.

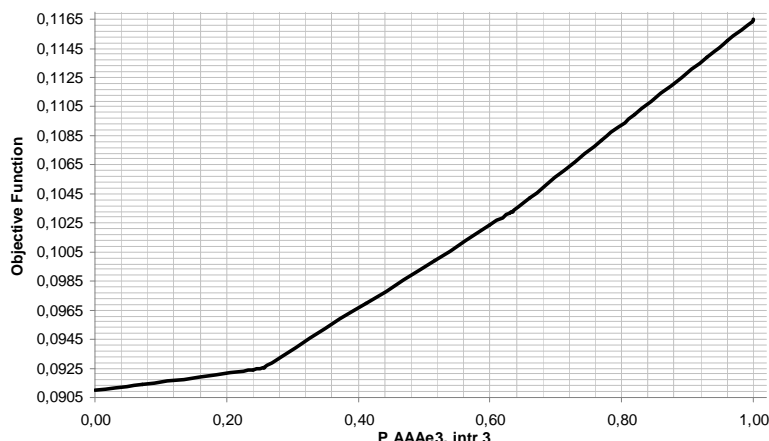


Figura 5: Variação da função objetivo do modelo com a capacidade de defesa da arma AAe 3 contra a esquadrilha 3

Já no caso dos meios aéreos cuja capacidade altera o resultado do modelo de otimização, observa-se que a função objetivo tem inicialmente comportamento de uma função constante e se torna uma função estritamente crescente após ocorrer a alteração da alocação ótima proposta. A Figura 6 apresenta o comportamento observado com a variação da capacidade de defesa do meio aéreo D2 contra a esquadrilha 2.

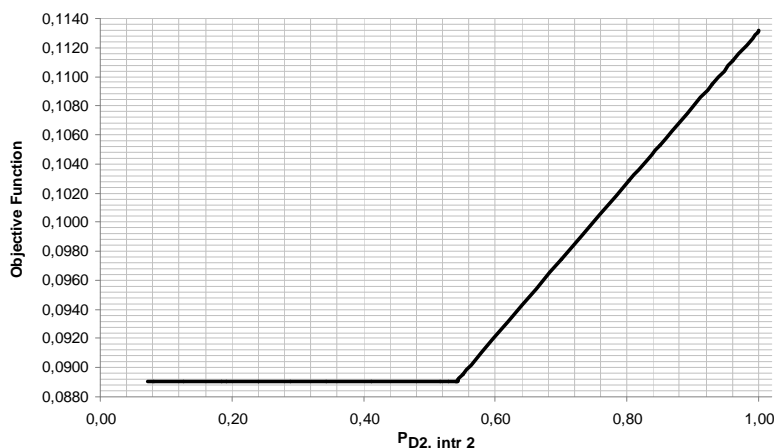


Figura 6: Variação da função objetivo do modelo com a capacidade de defesa da arma D2 contra a esquadrilha 2

As simulações realizadas destacaram a relevância da capacidade dos meios de defesa como fator de decisão no modelo proposto, sendo fundamental que se tenha pleno conhecimento dos fatores que determinam os p_{ij} 's, ou seja, que configurações de armamentos são mais adequadas, tanto para reduzir o tempo de interceptação quanto para tornar a arma mais eficiente na destruição do incursor, a fim de impedir que este seja novamente utilizado em ações hostis.

5. Considerações Finais

Este trabalho apresenta uma abordagem inicial para o desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão no cenário de defesa aeroespacial contra pacote de ataque aéreo. Nesse sentido, propôs-se uma metodologia para designar armas de defesa contra vetores hostis de forma otimizada e foi apresentada a análise da efetividade das estratégias propostas pelo modelo de otimização, destacando-se os principais fatores de decisão e seus efeitos sobre o planejamento de defesa.

Quando o objetivo deste trabalho não fosse encontrar generalidades no comportamento da alocação ótima dos meios de defesa em função dos fatores de decisão considerados, a implementação do modelo proposto no cenário adotado e as análises de sensibilidade realizadas permitiram identificar que tipos de estudo podem ser realizados e os resultados que podem ser esperados em posteriores aplicações do modelo de forma mais completa e em cenários mais complexos. Logo, é possível auxiliar o decisor na escolha das armas a serem empregadas nas missões de defesa, bem como em decisões quanto à aquisição e aperfeiçoamento dos meios de defesa e ao prévio posicionamento dos meios antiaéreos, indicando que alterações na efetividade da estratégia ótima poderiam ser esperadas.

Os próximos passos para a adequação do modelo proposto como ferramenta de análise de decisão no contexto de defesa aeroespacial contra um pacote de ataque aéreo referem-se: (1) ao estudo de metodologias apropriadas para o apoio à decisão na fase de avaliação de ameaças; (2) ao estudo de como vincular a medida da efetividade da estratégia de defesa à função objetivo do modelo; (3) à identificação das características dos elementos do cenário de defesa que determinam o nível de ameaça dos incursores e a capacidade dos meios de defesa e (4) à integração destas características para expressar o nível de ameaça dos incursores e a capacidade dos meios de defesa em termos de probabilidades, conforme realizado no modelo apresentado.

Referências

- Cambeses Júnior, M.**, *A Força Aérea e a defesa aeroespacial da nação brasileira: a defesa nacional*, Biblioteca do Exército, v.90, n. 800, p. 79-80, set./dez. 2004. (www.incaer.aer.mil.br/FABDef.htm, 8, 2009).
- Castro, D. R. S.**, *Optimization models for allocation of air strike assets with persistence*. 79f. Dissertação (Mestre em Pesquisa Operacional), Naval Postgraduate School, Monterey. 2002. (www.davi.ws/DaviCastro_Thesis_Dec2002.pdf, 3, 2009).
- Hosein, P. A.**, *A class of dynamic nonlinear resource allocation problems*. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Ciência da Computação), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. 1989. (dspace.mit.edu/handle/1721.1/14258?show=full, 6, 2009).
- Vieira Junior, H., Kienitz, K. H. e Belderrain, M. C. N.** (2009), Metodologia de apoio à decisão para os processos de seleção de alvos e armamentos, *Anais do XII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha (SPOLM)*, 1-12. (www.casnav.mar.mil.br/spolm/artigos/artigos2009/005.pdf, 10, 2009).