



ISSN 2175-6295 Rio de Janeiro- Brasil, 12 e 13 de agosto de 2010

## MODELAGEM DA ATRIBUIÇÃO DE AERONAVES A ALVOS CONFORME REQUISITOS OPERACIONAIS DE UMA FORÇA AÉREA

**Rainer Ferraz Passos**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)  
Caixa Postal 6017 – Campus do CTA – São José dos Campos - SP – 12228-970  
rainerfp@ita.br

**Adilson Marques da Cunha**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)  
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – São José dos Campos - SP – 12228-900  
cunha@ita.br

**Resumo:** Partindo de uma definição de valor unitários para alvos apresentada durante o SPOLM 2009, este artigo descreve a utilização de uma formulação de programação matemática para otimizar a alocação de meios aéreos de combate a alvos. A sua principal característica é incluir restrições associadas ao alcance, à capacidade de combustível e aos requisitos operacionais doutrinários, bem como quanto à necessidade de alocar aeronaves para a escolta, em função dos meios do adversário. Os resultados obtidos a partir da aplicação da formulação indicam a necessidade de implementação e aplicação de algoritmos baseados em metaheurísticas para problemas maiores e a aplicabilidade de estudos específicos quanto à comparação entre interceptadores adversários e aeronaves utilizadas para escolta.

**Palavras-Chave:** Alocação Armamento-Alvo, Otimização, Militar.

**Abstract:** Starting from a target evaluation presented during SPOLM 2009, this article describes the construction of a mathematical programming model to optimize the assignment of air-fighting means to targets. Its main feature is to include restrictions on the range, fuel requirements, and operational doctrine, as well as support to assign aircraft for escort, according to the means of the adversary. The results obtained with the application of the mathematical formulation indicate the need to implement algorithms based on metaheuristics for larger problems and the appliance of studies especially on comparing opponents interceptors and own escort fighters.

**Keywords:** Weapon-Target Assignment, Optimization, Military.

## 1. Introdução

No contexto do Estado-Maior (EM) de uma Força Aérea Componente, criada para atuar em algum dos Teatros de Operação (TO) de um conflito armado, aplica-se hoje o conceito de que a condução e aplicação das forças devem ser orientadas para a produção de um estado final desejado definido a priori.

O foco sobre o estado final desejado conduz ao levantamento dos efeitos que podem construir esse estado e, dessa forma, a dois processos que envolvem: identificar a importância dos possíveis alvos, priorizando-os; e verificar a compatibilidade das capacidades dos armamentos disponíveis com os efeitos necessários sobre esses alvos.

O primeiro desses processos foi definido pelo Departamento de Defesa dos EUA (DoD) (Estados Unidos da América, 2007) como “*targeting*”, representando a **seleção e priorização de alvos**, bem como a adequação da “resposta” apropriada aos mesmos, considerando os **requisitos e as capacidades operacionais**. Neste artigo denomina-se este processo como “seleção de alvos”.

Já o processo seguinte, chamado “*weaponneering*”, é definido como a análise e **determinação da quantidade de cada armamento específico**, letal ou não, necessária para a consecução do nível de dano desejado para cada alvo, considerando suas vulnerabilidades bem como as características do armamento e de suas possíveis formas de emprego. Neste artigo denomina-se este processo de “avaliação de alvos”.

Diante desse contexto, o intuito desta pesquisa é o de adaptar formulações conhecidas do problema de “alocação armamento-alvo”, do inglês “*Weapon-Target Assignment Problem*” (WTA), com o objetivo de dotar um EM de modelos matemáticos que propiciem, após a **seleção e avaliação dos alvos**, encontrar uma alocação possível das plataformas d’armas disponíveis (aeronaves), a qual retorne o conjunto de efeitos de maior valor para a consecução do estado final e que atenda aos **requisitos e capacidades operacionais** do momento, a fim de otimizar o emprego das plataformas.

Para descrever o estado atual de tal pesquisa, este trabalho se encontra estruturado da seguinte forma: a segunda seção apresenta a formulação do WTA clássico; a seção 3 apresenta a modelagem proposta, após introduzir os critérios e requisitos operacionais considerados principais; e a seção 4 descreve os exemplos de utilização experimentados, os quais levaram às considerações registradas na conclusão.

## 2. Modelagem do Problema de Alocação Armamento-Alvo (WTA)

Trata-se da definição da modelagem de operações de combate que tem evidente relação com o propósito da pesquisa relatado na introdução e, para a qual, diferentes autores, como Pederson (2008) e Vieira Junior et al. (2009), referenciam a abordagem de Ahuja et al. (2007).

Nessa abordagem, o problema de WTA é definido como a modelagem de operações de combate nas quais se deseja maximizar o dano esperado total causado em alvos adversários, utilizando-se um número limitado de armamentos (Ahuja et al., 2007). Sendo sua formulação apresentada pelo seguinte problema de programação não-linear inteira:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n V_j \left( \prod_{i=1}^m q_{ij}^{x_{ij}} \right) \quad (1a)$$

Sujeito a

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

$$x_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall i, j \quad (1c)$$

Onde,

Os alvos são numerados de 1 a  $n$ ;

Os armamentos são numerados de 1 a  $m$ ;

$V_j$  denota o valor do alvo  $j$ , escalar maior para alvos relativamente mais importantes entre si; e

$W_i$  denota a quantidade disponível de armamento  $i$ , inteiro do número de unidades de  $i$ .

Assumindo  $p_{ij}$  como a probabilidade de destruição do alvo  $j$  por uma unidade do armamento  $i$ , obtém-se:

$q_{ij} = 1 - p_{ij}$  que denota a probabilidade de sobrevivência do alvo  $j$  se uma unidade do armamento  $i$  for alocada a ele.

Como

$x_{ij}$  representa o número de armamentos  $i$  alocados ao alvo  $j$ ,

Então

$q_{ij}^{x_{ij}}$  representa a probabilidade de sobrevivência do alvo  $j$  quando atribuído às quantidades  $x_{ij}$  dos diferentes armamentos  $i$ .

Dessa forma, essa formulação minimiza o valor esperado dos alvos não atingidos, enquanto assegura que a quantidade de armamentos utilizados não supere a quantidade disponível.

### 3. Modelagem Proposta

A **modelagem proposta** neste artigo busca verificar a possibilidade de inclusão de restrições que espelhem algumas **necessidades operacionais** próprias do EM da Força Aérea Componente de um TO de algum conflito armado.

Nesse contexto, consideram-se as aeronaves como plataforma d'armas, no sentido que integram um conjunto de armamentos e o sistema de controle e emprego dessas armas.

Dentre as principais dificuldades dos operadores dos EM, para otimizar o emprego das plataformas disponíveis, destacam-se:

- O balanceamento da utilização das **plataformas para atacar** os alvos **ou** para **servir de proteção** (escolta) das demais, face à capacidade do adversário de utilizar aeronaves interceptadoras para impedir os ataques; e
- A definição de quais plataformas, em cada "pacote" de ataque, deverão reabastecer já em vôo, **ampliando seu alcance** para o ataque, face ao fato da **quantidade de combustível** disponível nas aeronaves reabastecedoras ser **restrita**.

Assim, definiu-se que as principais restrições a serem incorporadas à modelagem clássica tratariam:

(1) Quanto ao alcance -

- a) Uma aeronave só pode atacar os alvos dentro de seu raio de alcance; e
- b) O reabastecimento em vôo pode aumentar o raio de alcance de uma aeronave;

(2) Quanto à possibilidade de Reabastecimento em Vôo (REVO) -

- a) A possibilidade de REVO é limitada pela quantidade de combustível que a aeronave reabastecedora pode fornecer;

(3) Quanto à interceptação pelo adversário -

- a) A quantidade de plataformas, que conseguem completar o objetivo de empregar seu armamento sobre o alvo, diminui com a quantidade de interceptadores adversários que podem impedir sua missão; e

- b) Algumas aeronaves podem ser alocadas para proteger as demais, no lugar de realizarem ataque, o que diminui a quantidade de alvos atacados, mas também diminui a quantidade de ataques que os interceptadores inimigos podem impedir;
- (4) Quanto à doutrina de emprego das aeronaves, que define condições para sua utilização (Requisitos Operacionais) -
  - a) As aeronaves só podem atuar em conjuntos de duplas, ou seja, em quantidades pares de cada tipo de aeronave alocada, para qualquer alvo.

Essas restrições foram tratadas com as considerações a seguir.

### 3.1. Alvos e pastas de alvos

O estudo de um alvo é sintetizado em uma pasta do mesmo (*target folder*) (Estados Unidos da América, 2007). Este documento define o ponto de impacto ideal para o armamento bem como a sua quantidade necessária para se obter o efeito desejado. Considera-se então que a pasta defina o número de bombas a serem lançadas, de forma que, efetivamente, obtenha-se o efeito desejado dentro da probabilidade de acerto de cada forma de lançamento.

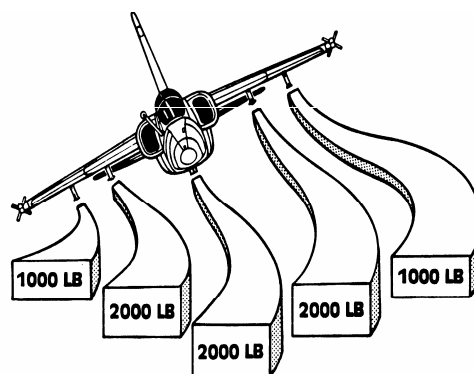
Sendo,

- $J$  o conjunto de alvos  $j$  numerados de 1 a  $n$ ;
- $d_j$  a distância do alvo  $j$  para a base em milhas náuticas;
- $b_j$  a quantidade estimada de bombas para destruir alvo  $j$  em unidades; e
- $v_j$  o valor do alvo  $j$  (valor relativo definido *a priori*).

### 3.2. Configuração de plataformas d'armas e quantidade de bombas

Uma simplificação utilizada é considerar a equivalência entre os diferentes modelos de bombas. Isto permite computar a quantidade de bombas transportada por uma aeronave, considerando apenas um modelo delas.

Cada ponto de carga de uma aeronave tem um limite de massa transportável, como ilustrado na figura 1 em libras (LB), e pode ser utilizado, para levar bombas, mísseis ou tanques de combustível adicionais. As diferentes combinações possíveis destas cargas recebem o nome de **configurações**.



**Figura 1** – Ilustração da capacidade dos pontos de carga da aeronave A-1.

Fonte: Cunha, 2009.

Dessa forma, a configuração define a carga transportada pela plataforma, bem como seus dados de alcance. Assim, considera-se no modelo as configurações utilizadas como configurações individuais numeradas (uma unidade de modelo de aeronave em uma dada configuração), respeitando a quantidade de aeronaves de cada modelo.

Onde,

$A = \{A1, F5, A29, AT26, KC130, KC137\}$  é o conjunto de modelos de aeronaves;

$q_a$  é o número de aeronaves disponíveis por modelo, em unidades;  
 $C = \{A1a, A1b, F5a, F5b, A29a, A29b, AT26a, AT26b, revo1, revo2\}$  conjunto de configurações;  
 $S = \{escolta, drink1, drink2\}$  o conjunto das áreas de apoio;  
 $Sr = \{drink1, drink2\}$  o subconjunto das áreas de apoio para REVO;  
 $Av = \{A1a_1, \dots, A1a_{q_{A1}}, A1b_1, \dots, A1b_{q_{A1}}, \dots, revo2_{q_{KC137}}\}$  “configurações individuais”;  
 $M_{av,a}$  matriz binária - identifica o modelo de aeronave de cada configuração individual;  
 $T_{av,c}$  matriz binária – identifica a configuração de cada configuração individual;  
 $E$  conjunto dos tipos de dados das configurações;  
 $F_{av,e}$  matriz com os dados de cada configuração individual; e  
 $h_{av}$  alcance básico da configuração individual sem REVO.

### 3.3. Inclusão de restrições de alcance

A inclusão das restrições de alcance foi realizada pela definição de uma variável binária  $z_{av,j}$  que define se cada configuração individual alcança cada um dos alvos  $j$ . Entram neste cômputo o combustível disponível na configuração (inicial + REVO) e seu consumo.

Onde,

$$z_{av,j} = \begin{cases} 1, & \text{se config. individual av alcança o alvo } j; e \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para tal, define-se também outra variável binária  $R_{av,drink}$  para registrar quais configurações individuais reabasteceram em qual área de reabastecimento.

Onde,

$$r_{av,sr} = \begin{cases} 1, & \text{se config. individual av alocada para revo na área sr ; e} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

### 3.4. Considerações sobre interação com o adversário

A missão das aeronaves interceptadoras adversárias é a de defender os pontos sensíveis de seu partido. Por isso, considera-se que atingem seu objetivo, caso obriguem as plataformas atacantes a abandonarem o ataque para se protegerem.

As plataformas configuradas como escolta, ou seja, com armamento próprio para combater os interceptadores adversários, são lançadas com a missão de impedir que os adversários ameacem as plataformas atacantes. Para tal, mantêm os interceptadores ocupados com sua própria proteção.

Dada a capacidade dos mísseis modernos, os engajamentos entre interceptadores e escoltas se dão a distâncias superiores ao alcance visual e, assim, dependem primariamente das capacidades dos mísseis e dos radares embarcados.

Por isso, experimentou-se estabelecer parâmetros para quantificar o número provável, ou valor esperado, de aeronaves atacantes que teriam sua missão impedida por interceptador, bem como, o número provável de atacantes protegidos por aeronave de escolta.

Dessa forma, representando a capacidade de interceptadores e de escoltas, sob a forma de número de atacantes, foi possível definir uma penalidade a ser atribuída à função objetivo do Problema de Programação Linear (PPL). Esta definição leva a solução do PPL a alocar aeronaves para escolta, conforme a capacidade inimiga, diminuindo, conseqüentemente, o número de alvos atacados.

No entanto, observou-se que obter diferentes soluções permite compreender melhor a sensibilidade das possíveis seleções de alvos quanto à quantidade de aeronaves alocadas para escolta. Por isto, optou-se por não incorporar as restrições quanto à interação com o adversário, mas solucionar o PPL, fixando-se a cada vez um número diferente de aeronaves de escolta e, assim, obter soluções variando desde a que atinge mais alvos, mas sem escolta, até a que aloca menos alvos, mas com conta com o máximo de escolta possível.

### 3.5. Formulação proposta

Depois de realizadas as considerações anteriormente descritas, o modelo proposto neste artigo é detalhado na formulação a seguir, de (2a) a (2o).

Onde,

$$x_{av,j} = \begin{cases} 1, & \text{se configuração individual av atribuída ao alvo j e alcança alvo j ; } e \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{av,s} = \begin{cases} 1, & \text{se configuração individual av atribuída ao apoio s ; } e \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$k_j = \begin{cases} 1, & \text{se total de bombas alocadas ao alvo j atende ao previsto na pasta ; } e \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$l_j \in \{0,1,2,\dots\} - \text{total de bombas alocadas ao alvo j.}$$

Função objetivo:

$$\text{Max} \sum_{j=1}^n v_j t_j \quad (2a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{av \in Av} \sum_{j=1}^n x_{av,j} M_{av,a} + \sum_{av \in Av} \sum_{s \in Sp} y_{av,s} M_{av,a} \leq q_a \quad \forall a \quad (2b)$$

$$\sum_{av \in Av} x_{av,j} T_{av,c} = 2 \cdot \text{num}_{c,j} \quad \forall c, j \quad (2c)$$

$$\frac{\left( F_{av,\text{fuel\_op}} + \sum_{sr \in Sr} F_{av,\text{cap\_revo}} r_{av,sr} \right)}{F_{av,\text{consumo}}} / d_j \geq z_{av,j} \quad \forall av, j \quad (2d)$$

$$\sum_{av \in Av} F_{av,\text{cap\_revo}} r_{av,sr} \leq \sum_{av \in Av} y_{av,sr} F_{av,\text{for\_revo}} \quad \forall sr \quad (2e)$$

$$\sum_{av \in Av} y_{av,sr} \leq 1 \quad \forall sr \quad (2f)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{av,j} \leq 1 \quad \forall av \quad (2g)$$

$$z_{av,j} \geq x_{av,j} \quad \forall av, j \quad (2h)$$

$$\sum_{av \in Av} F_{av,\text{bomb}} x_{av,j} = l_j \quad \forall j \quad (2i)$$

$$l_j / b_j \geq k_j \quad \forall j \quad (2j)$$

$$x_{av,j} \leq k_j \quad \forall av, j \quad (2k)$$

$$\sum_{sr \in Sr} r_{av,sr} \leq \sum_{j=1}^n x_{av,j} \quad \forall av \quad (2l)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{av,j} d_j / h_{av} \geq \sum_{sr \in Sr} r_{av,sr} \quad \forall av \quad (2m)$$

$$x_{av,j} \leq F_{av,bomb} \quad \forall av, j \quad (2n)$$

$$\sum_{sr \in Sr} r_{av,sr} T_{av,c} = 2.irevo_{sr,j,c} \quad \forall sr, j, c \quad (2o)$$

As restrições são detalhadas como:

- (2b) – Número de configurações individuais alocadas não excede o número total de aeronaves de cada modelo;
- (2c) – Configurações individuais têm que ser atribuídas aos alvos em quantidade par ( $2.num_{c,j}$ ) de cada tipo de configuração  $c$ , para todo alvo  $j$  ( $num_{c,j}$  é uma variável auxiliar inteira não negativa);
- (2d) – Para a configuração individual  $av$  ser alocada a alvo  $j$ , seu alcance total tem que ser maior que a distância do alvo;
- (2e) – Fornecimento de combustível restrito à capacidade do reabastecedor em cada área  $sr$ ;
- (2f) – Número de reabastecedores em cada  $sr$  limitado a 1 (ou conforme doutrina);
- (2g) – Cada configuração individual  $av$  ataca apenas um alvo  $j$ ;
- (2h) – Configuração individual  $av$  ataca alvo  $j$  apenas se alcança um alvo  $j$ ;
- (2i) - Quantidade de bombas alocadas ao alvo  $j$ ;
- (2j) - Alvo  $j$  é atacado apenas se alocadas mais bombas que as definidas em sua na pasta;
- (2k) - Configuração individual  $av$  não pode ser alocada ao alvo  $j$  caso o total atribuído não seja suficiente para obter-se o efeito desejado;
- (2l) - Configuração individual  $av$  não reabastece se não ataca;
- (2m) - Configuração individual  $av$  reabastece apenas se alcance básico é insuficiente;
- (2n) - Configuração individual  $av$  que não tem capacidade de empregar bombas ( $F_{av,bomb} = 0$ ) não é alocada para ataque; e
- (2o) – Duplas de configurações individuais  $av$ , de mesma configuração  $c$ , e que seguem para o mesmo alvo  $j$ , reabastecem juntas em conjuntos de dois ( $2.irevo_{sr,j,c}$ ) ( $irevo_{sr,j,c}$  é uma variável auxiliar inteira não negativa).

## 4. Experimentação

Depois de realizada a descrição do modelo, na seção 3, com as devidas considerações, a seção 4 apresenta os resultados e constatações percebidas durante a experimentação deste modelo. Antes, são apresentados os detalhes a respeito da implementação.

### 4.1. Implementação do modelo

A plataforma utilizada para implementação contou com um processador Intel Atom de 1.66GHz e 2 GB de memória RAM, utilizando o sistema operacional Windows XP.

O modelo foi implementado utilizando-se o sistema para modelagem de programação matemática *General Algebraic Modeling System* (GAMS, 2010), com o pacote CPLEX 10.1 como *solver*, e optou-se por realizar os experimentos com a base de dados delineada por Vieira Junior *et al.* (2009), apresentada durante o Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha (SPOLM) de 2009.

Esse conjunto de dados foi estendido, criando-se dados fictícios para os 26 alvos e incluindo-se sua distância para o aeródromo de Florianópolis-SC (SBFL), assim, o aeródromo passou a ser tratado como base de origem dos pacotes de aeronaves.

Além dessa distância, a tabela 1 apresenta o valor de cada alvo para a campanha, de forma que a soma dos 26 alvos completa o valor “1” e percebe-se a importância relativa entre

os mesmos, bem como apresenta a quantidade estimada de bombas necessárias para obter-se o efeito desejado sobre cada alvo, conforme definido na pasta do alvo.

Tabela 1 – Dados fictícios sobre os alvos.

Alvo	Valor unitário do alvo *	Bombas estimadas *	Distância (NM)
Radar_1	0,06	31	160
Link_B1	0,04	22	
Hangar_B1	0,0208	30	
Paiol_B1	0,0332	37	
Pista_B1	0,0384	28	193
Pátio_1_B1	0,0138	19	
Pátio_2_B1	0,0092	28	
Centro_C2	0,0834	18	
L-Centro_C2	0,02	28	204
Distr_B1	0,1523	18	240
Link_B2	0,01	17	
Hangar_B2	0,0166	21	
Paiol_B2	0,0664	178	297
Pista_B2	0,0512	21	
Pátio_B2	0,0308	21	
Radar_2	0,03	24	302
Link_B3	0,03	22	
Hangar_B3	0,0042	22	
Paiol_B3	0,0664	19	
Pista_B3	0,0384	14	313
Pátio_1_B3	0,0046	20	
Pátio_2_B3	0,0185	26	
Radar_4	0,045	13	327
Distr_B2	0,0635	36	368
Usina	0,0381	37	399
Radar_3	0,015	14	416

\* Obs.: Quantidade de bombas, para probabilidade de destruição do alvo de 80%, e valor unitário dos alvos obtidos a partir de Vieira Junior et al. (2009).

Já a tabela 2 apresenta os dados necessários, todos fictícios, definidos para duas aeronaves de REVO, duas configurações possíveis para os modelos A1, F5, A29 e AT26.

Tabela 2 – Dados fictícios sobre as configurações possíveis.

Configurações	A1a	A1b	F5a	F5b	A29a	A29b	AT26a	AT26b
Combustível de decolagem (lb)	1750	2250	2100	3150	1050	1350	1200	1860
Consumo por distância (lb/NM)	5	5	7	7	3	3	6	6
Combustível recebido por REVO na vertical da Base (lb)	260	260	710	710	-	-	-	-
Quantidade esperada de bombas no alvo	6	2,66	4,71	0	3,9	1,94	3,14	1,14
Habilitado para escolta	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Modelo equivalente em Vieira Junior et al. (2009)	-	A1	F-5	-	-	A-29	-	AT-26
Configurações	revo1		revo2					
Combustível total que pode fornecer em REVO (lb)	4000		5000					



## 4.2. Resultados e considerações

Após a implementação, alguns resultados tiveram tempo de processamento inadequado para o contexto do EM, pois excederam dez horas de processamento, enquanto, neste trabalho, adotou-se como desejável um tempo total inferior a duas horas. Por isto, foram realizadas experimentações com reduções do conjunto de alvos, da quantidade de aeronaves e do conjunto de modelos, mantendo-se sempre duas aeronaves de REVO (tabela 3).

A experimentação com conjuntos menores, ou seja, com problemas de menor dimensão, evidenciou o custo de tempo associado à quantidade de variáveis na formulação do problema. Observa-se, na tabela 3, que a remoção de apenas um modelo, no caso o AT26, leva a redução de 12 aeronaves e, conseqüentemente, 24 configurações individuais. Como cada configuração individual está associada a quatro das variáveis de decisão do problema, o processamento diminuiu de mais de dez horas para meia hora.

Essa constatação apresenta a importância da necessidade de identificar-se o melhor balanceamento entre a qualidade das soluções e a capacidade de produzi-las em tempo oportuno, para o conflito ou a operação que estiver em curso.

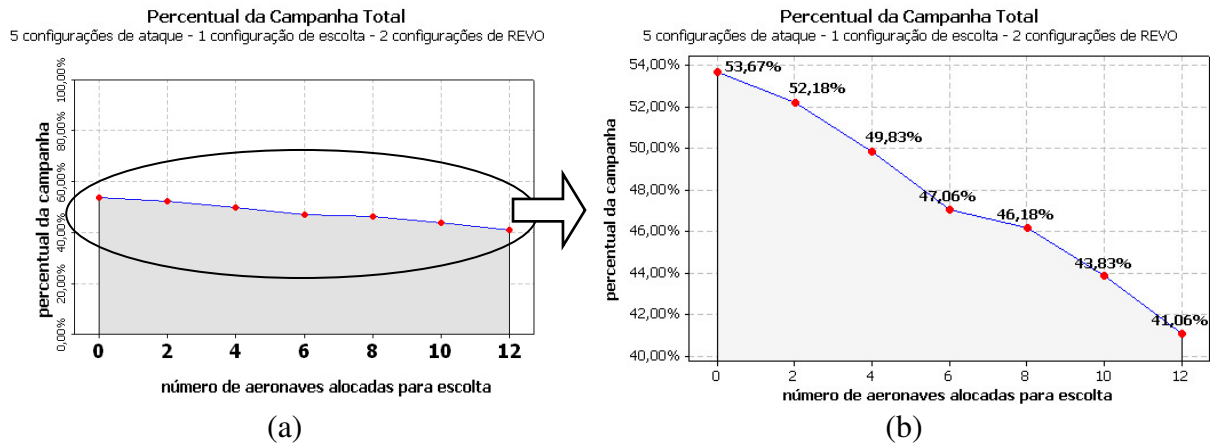
Tabela 3 – Comparação das experimentações com três dos diferentes conjuntos de dados.

Número de modelos	Aeronaves de cada modelo (F5 sempre 12)	alvos	Número de aeronaves alocadas para escolta	% da campanha	Tempo (seg)
3  (Menor conjunto de dados)	4	10	0	Proporção diferente do caso com 26 alvos.	207
			2		34
			4		66
			6		10
			8		13
			10		2
			12		2
3  (Conjunto de dados utilizado)	12	26	0	53,67%	1790
			2	52,18%	123
			4	49,83%	77
			6	47,06%	1920
			8	46,18%	1921
			10	43,83%	1790
			12	41,06%	123
4  (Conjunto de dados completo)	12	26	0	37,19%	37001 (atingiu limite de 10h e 16min)
			2	35,92%	
			4	33,41%	
			6	32,07%	
			8	30,83%	
			10	34,69%	
			12	36,21%	

Pela estrutura da formulação, a resolução de problemas de dimensão mais elevada, ou seja, com mais alvos e aeronaves, pode gerar um elevado número de variáveis inteiras, o que conseqüentemente pode consumir um elevado tempo de processamento e produzir (nesse tempo) apenas soluções viáveis de qualidade apenas razoável. Dessa forma, o caso reforça a aplicabilidade de algoritmos que utilizem conceitos como os de metaheurísticas para abordar este tipo de problema, dentro de um prazo de tempo oportuno para o contexto delineado.

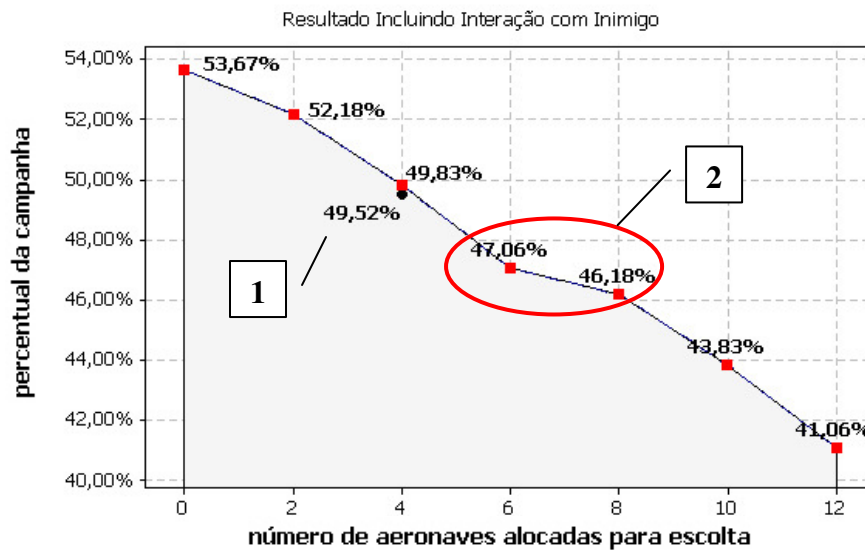
Ao final, optou-se por trabalhar com todos os 26 alvos, 12 aeronaves de cada um dos modelos A1, F5 e A29 e uma aeronave de cada modelo de reabastecedor, ou seja, não foi utilizado o modelo AT26 dos definidos por Vieira Junior et al. (2009), mas obteve-se um total de 26 alvos e 74 configurações individuais possíveis, dentre as 38 aeronaves disponíveis.

Os resultados obtidos com esse conjunto de dados são ilustrados na figura 2a e seu detalhe assinalado com uma elipse é reproduzido na figura 2b.



**Figura 2** – Ilustração da área de solução dos resultados, conforme percentual da campanha obtido com o pacote de configurações e o número de aeronaves alocadas para escolta.

Já na figura 3, observa-se mais uma vez uma ampliação da área assinalada na figura 2a, mas incluindo o resultado obtido (detalhe 1) ao se incorporar à formulação restrições referentes à interação com inimigo. Neste caso específico, o resultado se refere a uma situação com seis interceptadores inimigos, com capacidade estimada inferior à das aeronaves de escolta amigas, e indica que o número ideal de escoltas seriam quatro.



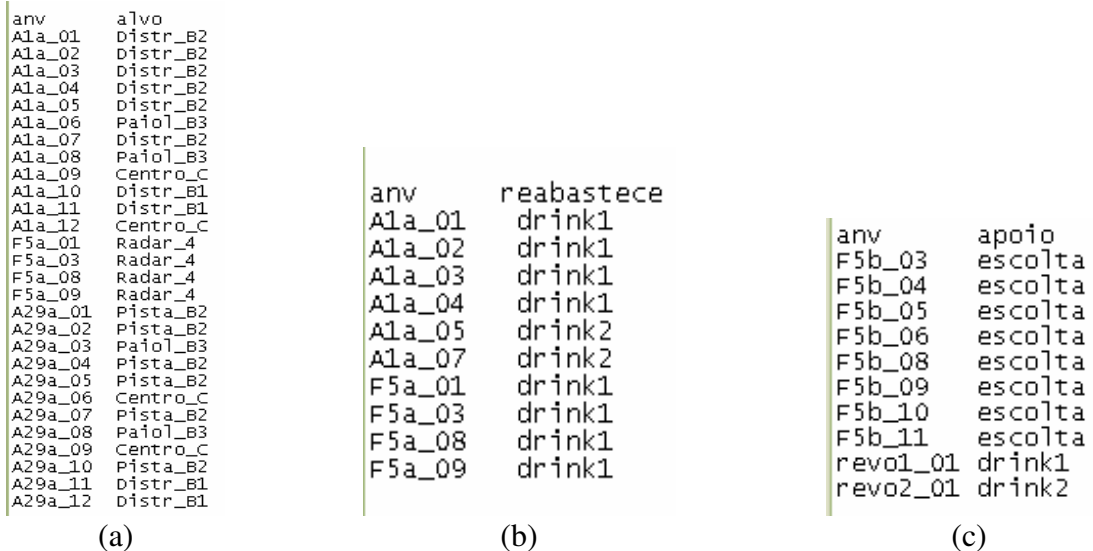
**Figura 3** – Detalhes dos resultados: (1) formulação com interação com inimigo; e (2) trecho com menor sensibilidade do resultado quanto ao número de escoltas.

O detalhe (1) da figura 3 representa que a formulação incluindo a interação com o adversário indicou o emprego de quatro aeronaves como escolta, dados os parâmetros supracitados.

No entanto, observando-se também o detalhe (2) da figura 3, percebe-se que pode haver soluções em que se aumenta a proteção dos atacantes com pequena perda quanto ao valor dos alvos engajados, ou seja, a variação da sensibilidade do valor obtido, em relação à quantidade de escoltas, pode levar a um caso em que valha a pena diminuir o valor dos resultados, para aumentar a proteção para os atacantes.

Isso indica uma segunda consideração: pode ser mais interessante ao EM contar com diferentes soluções possíveis e considerar qual pacote de ataque escolher conforme uma análise mais específica dos meios aéreos de escolta e de interceptação.

Por fim, a figura 4 ilustra os *outputs* produzidos pelo modelo, indicando a alocação das diversas configurações individuais aos alvos e às atividades de reabastecimento e escolta.



**Figura 4** – Captura de tela dos *outputs* com oito escoltas: (a) configurações individuais alocadas aos alvos; e (b) configurações individuais definidas para reabastecer; e (c) configurações individuais alocadas para apoio.

Com esses resultados, considera-se, finalmente, que a modelagem atingiu o seu objetivo de incluir as restrições de alcance, de combustível e de requisitos operacionais, bem como proporcionou diferentes resultados para facilitar a análise do balanceamento da alocação de aeronaves para a escolta em função dos meios do adversário.

## 5. Conclusão

A otimização da alocação de um conjunto restrito de armas a alvos foi tratada neste artigo, observando-se a formulação clássica do problema WTA, a partir da qual foram apresentadas considerações sobre fatores relevantes para aplicações práticas na Força Aérea.

Em seguida, apresentou-se uma formulação em que, **depois de selecionados e priorizados os alvos e definidas as quantidades necessárias de armamento específico**, otimiza-se a alocação das plataformas d’armas disponíveis aos alvos, atendendo-se aos **requisitos e capacidades operacionais** do cenário do momento.

Os resultados de sua implementação mostram que a modelagem atingiu o seu objetivo de incluir as restrições de **alcance**, de **combustível** e de **requisitos operacionais**, bem como proporcionou diferentes resultados para facilitar a análise do balanceamento da alocação de aeronaves para a escolta em função dos meios do adversário.

As considerações elencadas com os resultados permitem sugerir trabalhos futuros: (1) que implementem os modelos com **metaheurísticas**, para **acelerar resultados** com bases de dados amplas; e (2) que abordem mais profundamente o cálculo da **quantidade ideal de escoltas** dado um adversário.

Finalmente, reitera-se que toda a abordagem do trabalho foi realizada sobre a formulação de um modelo matemático para otimização, cujo *input* foi obtido utilizando-se uma análise de apoio à decisão para definição do valor unitário dos alvos, ou seja, em um processo com diferentes ferramentas.

## 6. Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem aos autores do artigo “Metodologia de Apoio a Decisão para os Processos de Seleção de Alvos e Armamentos”, apresentado durante o SPOLM 2009, pela presteza ao compartilhar dados e informações, ao Comando da Aeronáutica (COMAER) e ao Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA) que, por intermédio do Instituto de Tecnologia Aeroespacial (ITA) e do seu Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO), viabilizaram esta pesquisa.

## 7. Referências

- Ahuja, R. K., Kumar, A., Jha K. C. e Orlin J. B. (2007) “Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem.” *Operations Research* Vol 55, n° 6, 2007: 1136-1146.
- Cunha, R.D. (2009) “História da Força Aérea Brasileira”. Disponível em <<http://www.rudnei.cunha.nom.br>>. Acesso em 04/12/2009.
- Estados Unidos da América, (2007) “Joint Targeting” – Joint Publication 3-60. 2007.
- GAMS. (2010) “General Algebraic Modeling System”. Disponível em: <<http://www.gams.com/solvers/index.htm>>. Acesso em 31/05/2010.
- Pederson, D., (2008) “Ensuring Schedulability in the Weapon Target Assignment Problem” 76<sup>th</sup> MORS Symposium, 2008. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA490120&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>>. Acesso em: 10/11/2009..
- Vieira Junior, H., Kienitz, K.H., Belderrain, M.C.N. (2009) “Metodologia de Apoio a Decisão para os Processos de Seleção de Alvos e Armamentos.” *Anais do XII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha – SPOLM 2009*.