



AIR & SPACE POWER

JOURNAL
EM PORTUGUÊS

2º TRIMESTRE 2004

Modelos de Otimização com Persistência para Alocação de Aeronaves de Ataque

MAJOR-AVIADOR DAVI ROGÉRIO DA SILVA CASTRO
Força Aérea Brasileira



DESDE SUAS ORIGENS na Segunda Guerra Mundial, métodos de Análise Operacional, como a otimização, tratam de problemas relacionados com a alocação de meios. A otimização (ou Programação Matemática) tem sido utilizada em várias situações civis e militares para determinar o melhor arranjo entre tarefas e agentes. Nessas situações, os modelos de otimização produzem respostas em que, garantidamente, as tarefas serão realizadas no mais alto grau de eficiência,¹ sujeitas às restrições impostas pela disponibilidade e outras limitações dos agentes.

No nosso problema específico, os “agentes” são aeronaves de ataque e as “tarefas” são alvos

militares a serem neutralizados. As restrições referem-se a priorização dos alvos, efeitos e capacidades dos armamentos, disponibilidade, velocidade e localização das aeronaves etc. A meta principal é colaborar da melhor maneira possível para os objetivos gerais da campanha aérea. Exemplos desse tipo de modelagem são discutidos na seção de revisão da literatura.

Planejamos ir um pouco mais longe desenvolvendo, ainda, um modelo de alocação dinâmico. Esse modelo prevê a alocação de recursos por um considerável horizonte de tempo em um ambiente tático sujeito a mudanças e suas recomendações são ótimas mesmo quando ocorrem (realísticas) alterações nas condi-

ções iniciais. Isto significa que o problema deve ser resolvido várias vezes em seqüência, com a possibilidade de que decisões prévias tornem-se restrições às posteriores.

O resultado desse estudo contribui para o esforço de planejamento da campanha de ataque automatizando os processos de tomada de decisão envolvidos no planejamento de missão no nível de Força Aérea Componente. Além disso, aborda a situação em que torna-se necessário novo planejamento devido ao surgimento de um ambiente tático diferente: novos alvos, prioridades modificadas, atualização na disponibilidade de aeronaves ou modificações nas condições meteorológicas que afetem o desempenho de sensores e armas.

O problema será representado matematicamente por variáveis inteiras e binárias para descrever, quantificar e qualificar os estados e controlar o sistema. Os planos são elaborados para múltiplos períodos no futuro, mas à medida que o tempo passa e melhores informações e prognósticos tornam-se disponíveis, o modelo se desloca à frente um período. Aplicando teorias sobre "persistência" [Brown, Dell e Wood 1997], estaremos aptos a modelar cenários extremamente mutáveis que surgem em situações táticas do mundo real. Mesmo se estivermos planejando apenas um período à frente, a noção de persistência ainda é importante para o caso em que um plano que tenha sido publicado e esteja em andamento, necessita de alterações antes da sua efetiva execução.

Air Tasking Orders e "Pacotes" de Ataque Aéreo

A *Air Tasking Order (ATO)*² é o instrumento administrativo utilizado pelo Estado-Maior da Força Aérea Componente para disseminar os planos diários às unidades aéreas e agências de comando e controle. A *ATO* normalmente contém instruções específicas e inclui códigos de chamada, Hora Sobre o Objetivo (HSO)³ e todos os detalhes necessários para a execução de um plano. Uma *ATO* é o resultado de um complexo processo de seleção de alvos e alocação de meios cobrindo grande variedade de tipos de missões. Usualmente, esse processo de

planejamento da *ATO* estende-se por dois dias e requer cuidadosa coordenação de tarefas, consideração de dados sobre o armamento, estrutura da força, disponibilidade de armas e surtidas, aspectos de inteligência sobre o inimigo, meteorologia e outros inúmeros fragmentos de informação.

Normalmente, o ritmo de batalha de um *COAT* (Centro de Operações Aéreas do Teatro) prevê a existência simultânea de três *ATO*: (1) a *ATO* em execução (plano de hoje), (2) a *ATO* em produção (plano para amanhã) e (3) a *ATO* em planejamento (plano para depois de amanhã).

Em seu trabalho, Griggs [1994] define, precisamente, o que é um pacote de ataque aéreo: "grupo de aeronaves de caça e bombardeiros combinados para prover apoio mútuo contra ameaças inimigas enquanto buscam o objetivo comum de destruir um conjunto de alvos. Pacotes de ataque são normalmente construídos em vários passos. Primeiro, o planejador da missão precisa selecionar o tipo certo e número de aeronaves e armamento para destruir cada alvo. Em seguida, se não houver restrições quanto a velocidades e táticas entre as aeronaves envolvidas, todos os vôos atacando alvos próximos uns dos outros são agrupados em pacotes. Por fim, o planejador da missão deve acrescentar aeronaves para fazer a supressão da defesa aérea inimiga (SDAI), além de caças para fazer a escolta do pacote". O acréscimo de aeronaves para as missões de SDAI e escolta depende de sua disponibilidade, das ameaças da rota (como mísseis superfície-ar), da missão e dos tipos de aeronaves no pacote.

O planejamento de uma força de ataque pode tornar-se bastante difícil rapidamente se considerarmos a enorme quantidade de combinações entre aviões, táticas e armas contra cada tipo de alvo, ameaça e condições ambientais. Além disso, a alocação de forças de ataque pode tanto fazer parte de uma ferramenta de planejamento em tempo real quanto de um sistema orçamentário de longo prazo; enfim, cada situação focaliza aspectos diferentes da escalação da missão e o tempo para solução depende em muito do propósito do estudo.

Para o desenvolvimento de um modelo matemático dentro dos nossos objetivos específicos vamos revisar, brevemente, as principais pesquisas sobre alocação de forças de ataque.

Revisão da literatura

O primeiro trabalho que encontramos sobre o assunto [McDonnell et alii, 2001] foi elaborado no Space and Naval Warfare Center (SPAWAR) da Marinha americana e descreve um modelo não-linear cuja solução foi aproximada por meio de algoritmo genético (método heurístico). O modelo proposto prevê tanto missões de ataque quanto de supressão, bem como alocação a múltiplos alvos e múltiplas ameaças. Supõe-se, ainda, que o armamento é predeterminado e que a força de ataque pode ser realocada caso necessário. Esse trabalho foi fortemente baseado nos modelos de Abrahams [1998] e Balart [1996], também não-lineares, cujos parâmetros essenciais, como valor dos alvos e efetividade do armamento, apresentam-se independentes do tempo (modelos de alocação estática).

Li, Curry e Boyd [2002] sugerem abordagens interessantes para criar pacotes de supressão da defesa inimiga, enquanto Griggs [1994], Jackson [1989] e Yost [1995] desenvolveram critérios para construir pacotes de ataque em modelos da USAF. Em outro trabalho Yost [1996] apresenta o modelo de otimização conhecido como "Time Strike" utilizado no auxílio do levantamento de requisitos para diferentes combinações de armamento convencional. Baseada no "Time Strike", a USAF, desde 1995, tem condições de refinar seus planejamentos operacionais analisando várias opções de tipos e quantidades de munições. A função-objetivo nesse modelo é linear, trata a campanha por fases (múltiplos períodos) e introduz a noção de "classes de alvos", que representa melhor o fato de que a busca pelos objetivos de campanha envolve a destruição de conjuntos de alvos inter-relacionados em oposição a alvos individuais, como vemos em outros modelos.

Por outro lado, Koewler [1999] criou um protótipo de ferramenta para escala e alocação que tenta equilibrar facilidade de uso com ge-

ração de soluções em um tempo aceitável do ponto de vista operacional. A metodologia desenvolvida baseia-se na combinação de conceitos da gerência de projetos, programação orientada a objetos e heurísticas.

Saling [1999] examina a estrutura de um Centro de Operações Aéreas Combinadas,⁴ o relacionamento entre a informação necessária para criação do Plano Mestre de Ataque Aéreo⁵ e métodos para distribuir essa informação para os combatentes via *ATO* ou, alternativamente, por meio de realocação dinâmica.

Finalmente, Dolan [1993] oferece uma solução para o problema de produção da *ATO* utilizada em jogos de guerra em nível de teatro na "Naval War College". Seu modelo decide que pacote de ataque deve ser empregado contra cada alvo e foi melhorado por Crawford [1994], que incorporou a dimensão do tempo, permitindo, assim, múltiplas saídas por aeronave por dia. Os pacotes disponíveis são definidos por uma equipe durante os exercícios de jogos de guerra.

A doutrina atualmente em vigor nas forças militares americanas guia o processo de planejamento de missão completamente. Uma documentação em especial, a "Joint Publication 3-01.2" [1986], discute o planejamento das operações, as atividades de Inteligência, procedimentos e técnicas de comando e controle, bem como alguns princípios fundamentais de onde retiramos a orientação para definir as funções-objetivo de nossos modelos. Dois desses princípios são essenciais para a condução das operações aéreas: a *concentração de forças* e a *economia de esforços*.

Concentração de forças é a efetiva aplicação do poder de combate, que requer força suficiente concentrada no tempo e local apropriados para garantir a realização do objetivo.

Economia de esforços é a correta seleção e utilização de sistemas de armas e cuidadoso equilíbrio na distribuição de tarefas. O comandante, ao aplicar esse princípio, pretende obter a concentração de força efetiva, no local e tempo decisivos, ao mesmo tempo que conserva meios para fazer frente à reação inimiga.

O mesmo documento também contém instruções de como estabelecer prioridades para os alvos. Cinco critérios são de vital impor-

tância: ameaça, efeito viável (degradação da capacidade de operação do alvo ou melhoria das possibilidades de êxito das forças amigas), atraso no efeito (tempo decorrido entre o engajamento inicial e o efeito desejado, que pode ser reduzido aplicando-se o princípio da concentração de forças), cálculo do risco e forças disponíveis.

Parte da nossa pesquisa é direcionada para responder à questão de como modificar um planejamento previamente otimizado. Estamos particularmente interessados em buscar a solução para um modelo de múltiplos períodos em que as recomendações dos períodos iniciais são mantidas à medida que o tempo avança. Chamamos de “incentivo de persistência” a penalidade imposta à função-objetivo caso a solução se desvie das recomendações prévias. O método utilizado para tratar a persistência é descrito por Brown, Dell e Wood [1997]. Esses autores lembram que a falta de “persistência” é uma das fontes mais comuns de reclamações sobre a Otimização. O problema é tratado por meio de uma série de estudos de caso que demonstram como a persistência pode amenizar as diferenças de foco entre gerentes e matemáticos e mostram como desenvolver modelos tendo a persistência em mente desde o início.

Fases de planejamento de um ataque aéreo

O problema genérico de planejamento de um ataque aéreo pode ser estruturado para identificar e classificar objetivos, restrições, decisões e fatores influentes. Usando essa idéia, as decisões podem ser divididas em cinco áreas: (1) seleção dos alvos, (2) alocação de armas, (3) formação e escalção das missões, (4) roteamento da missão e agendamento e (5) planejamento contingente [Glenn 1980].

Na atividade de *seleção de alvos* examinam-se alvos potenciais (à luz dos objetivos do comandante da campanha) para determinar sua importância militar, prioridade de ataque e viabilidade quanto à disponibilidade de armamento para se obter o dano desejado [USAF 1998]. O produto dessa fase é uma sugestão de Lista Priorizada de Objetivos

(LPO)⁶ com recomendações quanto a prioridades e danos desejados.

Durante o processo de *alocação de armas* estima-se a quantidade requerida de um tipo específico de armamento para se atingir o nível desejado de dano considerando-se a vulnerabilidade do alvo, efeitos dos armamentos, erros de lançamento, critério de dano, confiabilidade do armamento etc. [USAF 1998]. A eficiência do armamento varia de acordo com a arma, o alvo, o critério de dano, as condições de lançamento e o ambiente em que o alvo se encontra. Existem diferentes formas de se definir a efetividade dos armamentos dependendo da combinação arma-alvo. Utilizaremos apenas a probabilidade de destruição,⁷ baseada na informação sobre o alvo, o armamento e as aeronaves disponíveis.

A *formação e escalção das missões* consiste na preparação dos pacotes de ataque. Usualmente, os planejadores começam com a alocação das aeronaves de ataque para, em seguida, escalar as missões de apoio a todos os deslocamentos do pacote — escoltas, SDAI, interferência eletrônica, controle e alarme em vôo, reconhecimento, reabastecimento em vôo e busca e salvamento.

No processo de *roteamento da missão e agendamento* os planejadores certificam-se de que não existem conflitos de tráfego entre os pacotes, que os aviões abastecedores estão disponíveis nos pontos previstos, horários de decolagem e pouso estão sincronizados etc. O processo de “desconflito” previne problemas como aeronaves em missões diferentes usando o mesmo espaço aéreo ou muitas aeronaves requisitando reabastecimento simultaneamente. O planejador deve ainda verificar que essa coordenação esteja de acordo com os HSO previstos e que tenham sido consideradas a defesa aérea inimiga e as condições meteorológicas na rota.

Finalmente, *planos contingentes* especificam alvos secundários e condições para abandono do plano principal, além de variações nas táticas de ataque caso a meteorologia no alvo seja diferente da prevista.

Esse trabalho aborda duas áreas do planejamento de missão de ataque: (1) alocação de armas e (2) formação e escalção das missões. Somente serão considerados os componentes

do pacote envolvidos diretamente nas missões de ataque, sendo necessário algum esforço adicional para se incluir escolta especializada e aeronaves de SDAI para aumentar a probabilidade de êxito do pacote contra as defesas inimigas.

Alocação de armas

No problema de alocação de armas, devemos considerar a efetividade de uma determinada quantidade de armamento, lançada por um determinado número de aeronaves contra um alvo que está associado a um critério de dano mínimo ou a uma probabilidade de destruição mínima aceitável. Para modelar essa situação adequadamente precisamos de funções não-lineares para calcular a probabilidade de destruição do alvo. Entretanto, preferiríamos um modelo de otimização linear, cuja solução envolve algoritmos mais rápidos e robustos. Portanto, como poderíamos incorporar os fatores não-lineares a um modelo de otimização linear?

A solução é enumerar as opções de ataque, ou seja, determinar todos os pacotes possíveis e calcular a eficiência de cada um deles contra cada um dos alvos relacionados. Esse cálculo faria parte de um processo preliminar, fora do modelo de otimização, que pode então ser definido como um “mixed-integer program” (MIP)⁸ com variáveis binárias representando os pares *pacotes de ataque x alvos*. Os modelos de Dolan [1993] e Crawford [1994] também incorporam pacotes de ataque pré-enumerados, com uma gradação (de 1 a 5) de preferência subjetiva para cada tipo de alvo.

Em vez de preferência subjetiva, calculamos a probabilidade de destruição para cada pacote contra cada tipo de alvo. Esse cálculo é simplificado e depende apenas do tipo e da quantidade de armamento que as aeronaves podem lançar. Consideramos também que algumas armas não são efetivas contra alguns tipos de alvos ou em certas condições meteorológicas.

Cada possível carregamento de armas e tanques extras de combustível para uma dada aeronave é chamado *configuração*. Um exemplo de pacote de ataque poderia ser a escalação de duas aeronaves do tipo *a* na configuração *c*,

que prevê quatro bombas do tipo w_1 e duas bombas do tipo w_2 .

Alocação das missões

A fase de planejamento que recebe maior ênfase nesse trabalho é a alocação de missões. É extremamente difícil tratar um problema desse tipo com total generalização e, por isso, algumas escolhas devem ser feitas quanto às alternativas para resolvê-lo. O resultado é que estão disponíveis várias abordagens (modelos) diferentes, todas razoáveis — consulte a seção de revisão da literatura.

A primeira escolha a ser considerada refere-se à opção por um modelo estático ou dinâmico. Um modelo estático trata todos os ataques como sendo realizados em apenas um período de tempo. Isto não significa que os ataques sejam simultâneos, mas o modelo estático não considera explicitamente a possibilidade de uma aeronave completar uma missão, voltar à sua base de origem, reabastecer, remunciar e decolar para um segundo ataque. Essa segunda missão só poderia ser atribuída após nova rodada.

Por outro lado, um modelo dinâmico trata a passagem de tempo explicitamente, permitindo que as aeronaves realizem múltiplos ataques. O modelo dinâmico pode ainda sugerir o HSO mais adequado caso haja flexibilização nos dados de entrada e sejam fornecidas “janelas de ataque”. Nas seções adiante apresentamos tanto modelos estáticos quanto dinâmicos.

Uma segunda escolha importante a ser feita sobre as características do modelo é quanto ao número de alvos que os pacotes podem atacar numa mesma missão. A restrição de alvo único, que será aplicada nos modelos apresentados nesse trabalho, pode não ser muito realista mas é bem mais simples que permitir múltiplos alvos por missão.

Finalmente, os pacotes de ataque podem ser homogêneos ou heterogêneos com respeito aos tipos de aeronaves participantes do pacote e às variantes nas configurações de armamento de cada uma delas. O modelo estático que será apresentado prevê a criação de pacotes de ataque heterogêneos. Por razões computacionais, entretanto, o modelo dinâmico é restrito

a pacotes homogêneos tanto em tipos de aeronaves quanto em armamento.

Planos contingentes

Apesar da ênfase principal de um plano de ataque residir nos eventos julgados mais prováveis, não deixa de ser também importante que sejam oferecidas respostas para as situações menos esperadas [Glenn 1980]. Um plano de ataque deve incluir planos contingentes com alvos secundários, escalas alternativas e variações nas táticas de ataque para o caso de mudança nas condições meteorológicas, na disponibilidade de aeronaves ou em alguma característica dos alvos.

Nossos modelos não incluem planos contingentes, em contraste, por exemplo, com a proposta de Kuykendall [1998] para alocação de mísseis *Tomahawk*, que sempre prevê recursos de reserva. Entretanto, podemos considerar que os “incentivos de persistência” ajudam indiretamente na criação do plano contingente, uma vez que estamos buscando adaptações às mudanças das condições iniciais com minimização de efeitos adversos.

Modelo estático com pacotes heterogêneos

Neste ponto convém definir melhor o que seja um “modelo matemático de otimização”. Modelos são representações (sempre simplificadas e limitadas) da realidade, projetadas para algum propósito específico [Gomes 2002]. Quanto à propriedade, podem ser icônicos (mapas, maquetes, etc.), analógicos (miniaturas, simuladores, etc.) ou simbólicos (expressões matemáticas).

Um modelo matemático, por sua vez, utiliza variáveis contínuas ou discretas cujo interrelacionamento é estabelecido por uma série de formulações (“regras”) lineares ou não-lineares. Por fim, os modelos matemáticos de otimização são objetos de estudo da “Programação Matemática”, ferramenta amplamente utilizada pela Pesquisa Operacional, cujo objetivo é encontrar a solução ótima para um dado sistema — maximizar ou minimizar uma

quantidade (lucro, custo, receita, etc.) —, segundo os critérios estabelecidos no próprio sistema. Um modelo matemático de otimização é definido por um conjunto de: parâmetros, variáveis, função-objetivo e restrições.

Neste capítulo apresentamos um modelo de otimização estática para criação da *ATO*. As decisões-chave são: que combinação de aeronaves, com que tipo de armamentos, provenientes de que aeródromos, deverão atacar que alvos?

A descrição do modelo, por ser extremamente técnica, não será apresentada em termos de expressões matemáticas. Apenas serão relacionados os principais elementos envolvidos de maneira a oferecer ao leitor uma visão em alto nível do trabalho desenvolvido. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

a) valor de cada aeronave se preservada para uso posterior. Entenda-se que em cada fase do conflito podemos atribuir valores diferentes a cada tipo de aeronave ou que aeronaves mais especializadas e escassas (para a missão de controle e alarme em vôo, por exemplo) devem possuir maior valor;

b) quantidade de armamento e alcance de cada tipo de aeronave, para cada configuração permitida;

c) número de aeronaves disponíveis em cada aeródromo e distância entre esses aeródromos e cada um dos alvos para determinação da necessidade ou dispensa de reabastecimento em vôo;

d) número de aeronaves de cada tipo e respectivas configurações voando nos pacotes de ataque;

e) probabilidade de destruição de cada pacote de ataque contra cada um dos alvos. O método envolve o erro circular provável⁹ para cada combinação aeronave x armamento, o raio letal de cada armamento e a composição de probabilidades de eventos dependentes para o armamento lançado por uma única aeronave e de eventos independentes entre as aeronaves de um mesmo pacote [Washburn 2002]. Por se tratar de um cálculo que envolve relacionamentos não-lineares, ele deve ser derivado antes do modelo de otimização;

f) probabilidade de sobrevivência de cada tipo de aeronave contra as ameaças previstas,

para cada configuração permitida. Este valor pode ser incrementado se considerarmos a utilização de aeronaves de supressão da defesa aérea inimiga (SDAI);

g) ameaças presentes na rota ou nas proximidades de cada objetivo;

h) valor de cada alvo ou objetivo;

i) nível de destruição ou dano requerido para cada objetivo, que pode tanto ser especificado por termos subjetivos como leve, moderado ou pesado, quanto por uma probabilidade de destruição (P_k). O mapeamento entre a terminologia subjetiva e as probabilidades segue na Tabela 1 abaixo.

Com base nessas informações, alguns outros dados são derivados como, por exemplo, o atrito esperado (aeronaves perdidas) para cada pacote atacando cada um dos alvos da lista. As variáveis de decisão são três: a primeira identifica o pacote que será utilizado contra cada alvo e o aeródromo de decolagem. A segunda variável controla os objetivos que estão sendo atacados e a última contabiliza o número de aeronaves de cada aeródromo que não são utilizadas.

As restrições são apenas que todos os alvos sejam atacados e que a soma das aeronaves utilizadas seja menor que o número de aeronaves disponíveis. Finalmente, a função-objetivo possui três componentes, que podem ser combinados num único por meio de pesos ou participarem de sucessivas rodadas em que o resultado preliminar restringe o modelo para a rodada subsequente [Rosenthal 1985]:

a) minimizar a soma dos valores dos alvos não atacados;

b) minimizar atrito e outras penalidades;

c) maximizar a soma dos valores das aeronaves preservadas.

O modelo foi implementado no pacote de software GAMS (*General Algebraic Modeling System*) combinado com CPLEX,¹⁰ para um problema-exemplo de cem alvos, sete aeródromos, três tipos de aeronaves e dois tipos de configurações para cada uma delas. Havia três tipos de armamentos e um total de vinte pacotes diferentes permitidos a partir das 156 aeronaves disponíveis, que geram, ao final, aproximadamente 5.900 variáveis. A ATO foi produzida por um computador Pentium IV de 2 GHz e 1 GB-RAM em menos de dois segundos.

Modelo dinâmico com pacotes homogêneos

O modelo dinâmico permite a criação de pacotes de ataque envolvendo somente aeronaves do mesmo tipo, configuradas de forma semelhante. Adicionalmente, é possível envolvê-las em mais de uma missão dentro do período de planejamento. Os parâmetros envolvidos neste modelo são os seguintes:

a) quantidade de armamento de cada tipo carregado por cada tipo de aeronave em cada configuração permitida;

b) erro circular provável de cada tipo de armamento, para cada tipo de aeronave;

c) raio letal de cada tipo de armamento contra cada tipo de alvo. A abordagem é simplificada, pois consideramos que o armamento não tem efeito além do raio letal;

d) mínimo estado meteorológico em que cada tipo de armamento pode operar. Há três

Tabela 1. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

nível de dano	descrição	P_k
leve	dano menor, algumas funções perdidas, mas ainda existe capacidade de operação	0,3
moderado	dano extenso, maioria das funções perdidas. Operação do sistema ainda possível, mas com eficiência bastante reduzida	0,7
pesado	sistema incapaz de operar	0,9

níveis apenas: adverso (tempo com chuvas e trovoadas em que o equipamento e os sensores não teriam condições mínimas de operação), razoável (céu encoberto) e bom (céu claro);

e) probabilidade de sobrevivência de cada tipo de aeronave contra as ameaças previstas, para cada configuração permitida;

f) velocidade, alcance e tempo de reposicionamento (para reabastecer e rearmar) de cada tipo de aeronave, em cada configuração possível;

g) valor de cada tipo de aeronave e quantidade de aeronaves disponíveis em cada aeródromo, em cada período de tempo;

h) distâncias entre aeródromos e alvos;

i) quantidade de aeronaves de cada tipo e configuração previstas em cada pacote de ataque;

j) tipos de ameaças presentes na rota ou nas proximidades de cada alvo;

l) valor, HSO e mínimo dano requerido para cada objetivo;

m) parâmetros de controle do tempo: hora presente (t_0), hora da primeira decolagem possível (t_1), tempo mínimo requerido para que uma ordem seja processada (t_1-t_0), duração de cada período de tempo (t_2-t_1) e horizonte (número total de períodos de tempo).

n) previsão meteorológica para cada período de tempo;

As variáveis e restrições são as mesmas do modelo anterior, ressaltando-se apenas ser necessário considerar o período de tempo em todas elas e determinar que condições afetariam as variáveis que controlam os pacotes a serem utilizados. Enfim, os relacionamentos são um pouco mais complicados, bem como a função-objetivo, que possui os mesmos três componentes do modelo estático, alterados convenientemente.

O modelo dinâmico foi testado com um problema de cem alvos, dezesseis períodos de quinze minutos e sete bases. Havia 36 aeronaves disponíveis de três tipos diferentes e duas configurações possíveis para cada tipo. Por fim, tínhamos três tipos de armamento e 24 pacotes de ataque podiam ser formados, gerando um total de mais de 10.000 variáveis. O resultado, com os mesmos recursos de *software* e *hardware* utilizados na solução do modelo estático, foi obtido em, aproximadamente, 200 segundos.

Alocação com persistência

O cenário a seguir apresenta um exemplo da obtenção de melhores resultados quando se considera persistência. Inicialmente, temos uma lista de dez alvos a serem atacados e um número limitado de aeronaves disponíveis. A Tabela 2 a seguir mostra as combinações possíveis de pacotes:

Tabela 2. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

pacote	aeronaves	configurações	número de aeronaves
n01	A-10	C1	2
n02	A-10	C1	4
n03	A-10	C1	2
	A-10	C1	2
n04	F-16	C1	1
	F/A-18	C1	1
n05	F-16	C1	1
	F/A-18	C1	1
n06	F-16	C1	2
	F/A-18	C1	2

Tabela 3. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

base	A-10	F-16	F/A-18
OEAH	8		
KHARJ		4	
OEJB			4
OEDF		4	
OERY	4		
OERK		2	2
CV71			8

As configurações diferem com respeito ao carregamento de armas. As aeronaves estão localizadas em sete bases, como mostrado na Tabela 3 acima.

Nessa demonstração, primeiro rodamos o modelo estático com essas informações, mas consideramos apenas oito alvos. Em seguida, alteramos o cenário e rodamos o modelo novamente com a lista completa de dez alvos. Este procedimento simula a situação em que nova informação se torna disponível momentos de-

pois que o primeiro planejamento é disseminado. Os alvos adicionados têm maior importância e devem ser atacados. As alterações entre as duas soluções são apresentadas na Tabela 4.

O resultado é que todos os alvos importantes são atacados, mas cinco das oito alocações iniciais apresentam modificações. Preferiríamos um novo plano com menos impactos, uma vez que adicionamos apenas dois alvos. Este é o motivo que justifica a aplicação da persistência ao modelo.

Tabela 4. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

alvo	1ª. rodada (8 alvos)				2ª. rodada (10 alvos sem persistência)			
	pacote	base	distância	P_k	pacote	base	distância	P_k
Safwan	n01	OEAH	353	0,95	n01	OEAH	353	0,95
Al Asad	n01	OEAH	724	0,89	n01	OERY	678	0,89
H2	n01	OEAH	773	0,95	n01	OERY	703	0,95
H3 Airbase	n01	OERY	707	0,95	não atacado			
H3 Highway	n01	OERY	719	0,95	n05	OERK	705	0,91
Wadi Al Khirr	n04	OERK	495	0,90	n04	OERK	495	0,90
Talil Air Base	n01	OEAH	442	0,95	n01	OEAH	442	0,95
Rasheed	n05	OERK	590	0,79	não atacado			
Safwan2	-	-	-	-	n01	OEAH	353	0,89
Safwan3	-	-	-	-	n01	OEAH	353	0,84

Tabela 5. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

alvo	1a. rodada (8 alvos)				2a. rodada (10 alvos com persistência)			
	pacote	base	distância	P_k	pacote	base	distância	P_k
Safwan	n01	OEAH	353	0,95	n01	OEAH	353	0,95
Al Asad	n01	OEAH	724	0,89	n01	OERY	678	0,89
H2	n01	OEAH	773	0,95	n01	OEAH	773	0,95
H3 Airbase	n01	OERY	707	0,95	não atacado			
H3 Highway	n01	OERY	719	0,95	n01	OERY	719	0,95
Wadi Al Khirr	n04	OERK	495	0,90	n04	OERK	495	0,90
Tallil Air Base	n01	OEAH	442	0,95	n01	OEAH	442	0,95
Rasheed	n05	OERK	590	0,79	não atacado			
Safwan2	-	-	-	-	n01	OERY	380	0,89
Safwan3	-	-	-	-	n01	OERK	363	0,84

A persistência é incorporada ao modelo por meio de penalidades, impostas quando há modificação na configuração. A penalidade é maior se o número de aeronaves do mesmo tipo aumenta na nova rodada e deve ser maior ainda se ocorre mudança no tipo de aeronave utilizada. Finalmente, a função-objetivo recebe mais um termo e pode-se aplicar o modelo novamente (veja-se a Tabela 5 acima).

A solução baseada no modelo com persistência retém o que é possível do planejamento original e, claramente, é muito mais fácil de ser executada. Apenas duas modificações foram necessárias para incluir os novos alvos e uma análise mais profunda mostra que houve um

decréscimo de apenas 1% no valor da função-objetivo. Ou seja, a solução com persistência é “subótima”, mas o ganho na execução de um planejamento menos impactante certamente compensa.

O modelo dinâmico com persistência pode ser aplicado várias vezes, com a realocação de pacotes de ataque considerando-se novos alvos, novas ameaças e modificações nas prioridades, meteorologia ou disponibilidade de meios.

O cenário para ilustrar persistência é parecido com o anterior, exceto pela regra de criação dos pacotes, diferente para o modelo dinâmico. Os alvos estão relacionados na Tabela 6, incluindo o HSO:

Tabela 6. Dados sobre os alvos do modelo dinâmico com persistência

alvo	valor do alvo	HSO	mínimo dano
Safwan	100	10:00	.80
Al Asad	150	10:15	.75
H2	160	11:40	.90
H3 Airbase	100	10:55	.50
H3 Highway	180	11:00	.40
Wadi Al Khirr	150	10:35	.85
Tallil Air Base	200	12:00	.85
Rasheed	80	10:40	.50

Air Tasking Order (gerada às 08:00h)								
ALVO	HSO	ETD	Aeron	BASE	DIST	CONFIG	Armam	P_k
Safwan	1000	0930	2 FA18	OEDF	194	C02	3 MK-83	0,81
Al Asad	1015	0900	2 FA18	CV71	587	C01	2 MK-84	0,75
H2	1140	0900	2 A10	OERY	703	C01	4 MK-82	0,90
H3 Airbase	1055	0915	1 FA18	CV71	679	C01	2 MK-84	0,50
H3 Highway	1100	0930	1 F16	OERK	705	C02	2 MK-84	0,45
Wadi Al Khirr	1035	0915	2 FA18	CV71	453	C02	4 MK-83	0,88
Tallil Air Base	1200	1030	2 A10	OERY	432	C02	2 MK-83	0,85
Rasheed	1040	0930	1 FA18	CV71	479	C01	2 MK-84	0,50

Figura 1. Solução do modelo dinâmico às 08:00h (A saída do modelo dinâmico é uma ATO com as seguintes informações: nome do alvo, hora sobre o objetivo, hora estimada de decolagem (ETD), número e tipo de aeronaves participantes, distância (em NM) da base até o alvo, configuração a ser utilizada, número e tipo de armamento a ser lançado e probabilidade de destruição esperada (P_k).

Há oito alvos, são 08:00h e é requerida uma hora de preparação para que ocorra a primeira decolagem. A ATO gerada na primeira rodada é apresentada na Figura 1 acima. Agora suponha que são 08:15h e precisamos rodar o modelo novamente. Todos os dados são os mesmos, exceto por uma alteração na previsão meteorológica de tempo “bom” para “razoá-

vel”, que afeta diretamente as probabilidades de destruição (P_k). Duas decolagens da solução proposta às 08:00h foram planejadas para as 09:00h; portanto, é muito tarde para mudá-las. Essas decisões fixadas estão indicadas por asteriscos na solução de 08:15h, que aparece na Figura 2.

Air Tasking Order (gerada às 08:15h)									
ALVO	HSO	ETD	Aeron	BASE	DIST	CONFIG	Armam	P_k	Fix
Safwan	1000	0930	2 FA18	OEDF	194	C02	3 MK-83	0,81	
Al Asad	1015	0900	2 FA18	CV71	587	C01	2 MK-84		*
H2	1140	0900	2 A10	OERY	703	C01	4 MK-82		*
H3 Airbase	1055	0915	1 F16	OERK	693	C01	2 MK-83	0,53	
H3 Highway	1100	0930	1 FA18	CV71	699	C02	2 MK-83	0,46	
Wadi Al Khirr	1035	0915	2 FA18	CV71	453	C02	4 MK-83	0,88	
Tallil Air Base	1200	1030	2 A10	OERY	432	C02	2 MK-83	0,85	
Rasheed	1040	0915	1 F16	OEDF	479	C01	2 MK-84	0,53	

Figura 2. Solução do modelo dinâmico às 08:15h sem persistência (As saídas marcadas com um asterisco foram fixadas por não estarem mais no contexto do planejamento. As diferenças para a solução das 08:00h estão sombreadas.)

As probabilidades de destruição (P_k) para as saídas fixadas estão em branco devido ao fato de haver grande chance de que o armamento escolhido inicialmente não seja eficiente, face à alteração ocorrida na previsão meteorológica. É tarde demais para se considerar modificações na configuração de armamento.

A versão do modelo dinâmico utilizada para se obter essa solução não inclui persistência. O resultado é que temos agora tipos de aeronaves diferentes, provenientes de outras bases, em três dos seis alvos relacionados para a segunda rodada, quantidade de alterações inaceitáveis em apenas quinze minutos.

O próximo passo é implementar penalidades de persistência da mesma maneira que fizemos no modelo estático. Assim, há penalidades cumulativas pela aplicação de aeronaves de tipos ou quantidades diferentes ou alterações na configuração de armamento na segunda rodada do modelo. Entretanto, não há penalidades quando o mesmo pacote é empregado ou quando há troca de configuração por conta de alteração da meteorologia. O resultado, apresentado na Figura 3, é muito melhor.

Todas as bases permanecem as mesmas e as três alterações de configurações eram esperadas pois no planejamento inicial a MK-84 é utilizada várias vezes, mas é menos efetiva da-

das as novas condições meteorológicas. Como antes, todos os alvos são atacados.

Conclusão

Este trabalho apresentou modelos que, de maneira ótima, são capazes de gerar pacotes de ataque aéreo e atribuir-lhes alvos a partir de uma lista priorizada. Um pacote consiste em aeronaves de várias bases em diversas configurações de armamento. Os modelos incluem verificações quanto à disponibilidade das aeronaves e seus alcances, que elas são capazes de cumprir o HSO previsto e que o armamento lançado tem eficiência compatível com o desejado para cada alvo selecionado.

Para os dois modelos criados, um estático e outro dinâmico, foram apresentadas variantes com persistência. Um modelo com persistência é importante quando um planejamento já está em andamento e surgem novos objetivos com prioridades mais altas. O modelo com persistência, a partir de penalidades impostas às modificações indesejadas, é capaz de gerar um plano “subótimo” que cause menos impacto na sua execução. Dessa forma, as iniciativas já tomadas em atenção ao plano inicial não são desperdiçadas.

A característica principal dos modelos apresentados é que as probabilidades de des-

<i>Air Tasking Order (gerada às 08:15h) /p</i>									
ALVO	HSO	ETD	Aeron	BASE	DIST	CONFIG	Armam	P_k	Fix
Safwan	1000	0930	2 FA18	OEDF	194	C02	3 MK-83	0,81	
Al Asad	1015	0900	2 FA18	CV71	587	C01	2 MK-84		*
H2	1140	0900	2 A10	OERY	703	C01	4 MK-82		*
H3 Airbase	1055	0915	1 FA18	CV71	679	C02	2 MK-83	0,57	
H3 Highway	1100	0930	1 F16	OERK	705	C01	2 MK-83	0,53	
Wadi Al Khirr	1035	0915	2 FA18	CV71	453	C02	4 MK-83	0,88	
Tallil Air Base	1200	1030	2 A10	OERY	432	C02	2 MK-83	0,85	
Rasheed	1040	0930	1 F16	CV71	479	C02	2 MK-83	0,57	

Figura 3. Solução do modelo dinâmico às 08:15h com persistência (Nesta solução com persistência ocorrem apenas três pequenas modificações, marcadas com sombreamento.)

truição (P_k), de natureza não-linear, são computadas previamente, permitindo que o modelo principal permaneça no domínio linear, ainda que existam variáveis inteiras e binárias. Assim, os métodos para solução de “mixed-integer programs” podem ser utilizados, gerando resultados em tempo totalmente compatível com o planejamento de uma célula de programação em um Centro de Operações Aéreas do Teatro (COAT). □

Referências

- P. Abrahams et alii, “MAAP: the military aircraft allocation planner”, in *Evolutionary Computation Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence*, IEEE Press, pp. 336-341, 1998.
- R. Balart et alii, “Decision Aids for Asset-to-Objective Allocation”, *Proceedings of Asilomar-29*, IEEE, pp. 807-811, 1996.
- G. G. Brown, R. F. Dell e R. K. Wood, “Optimization and Persistence”, *Interfaces*. Vol 27, Número 5. setembro-outubro de 1997.
- D. R. S. Castro, “Optimization Models for Allocation of Air Strike Assets with Persistence”, Tese de Mestrado em Pesquisa Operacional, Naval Postgraduate School, Monterey (Número de acesso no DTIC: ADA 411746), Califórnia, dezembro de 2002.
- E. A. Cohen, “Gulf War Air Power Survey” (Relatório em cinco volumes), U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993.
- K. R. Crawford, “Enhanced Air Tasking Order Optimization Model”, Tese de Mestrado em Pesquisa Operacional, Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, 1994.
- M. H. Dolan, “Air Tasking Order (ATO) Optimization Model”, Tese de Mestrado em Pesquisa Operacional, Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, 1993.
- F. A. Glenn e J. M. Bennett, “Decision Aiding Concepts for Air Strike Planning”, Analytics, Relatório Técnico 1454-A (Número de acesso no DTIC: ADA 096060), dezembro de 1980.
- L. F. A. M. Gomes, C. F. S. Gomes e A. T. Almeida, “Tomada de Decisão Gerencial — Enfoque Multicritério”, Editora Atlas, São Paulo, 2002.
- B. J. Griggs, “An Air Mission Planning Algorithm for a Theater Level Combat Model”, Tese de Mestrado, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, Ohio, 1994.
- J. A. Jackson Jr., “A Taxonomy of Advanced Linear Programming Techniques and the Theater Attack Model”, Tese de Mestrado, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, Ohio, 1989.
- Joint Publication 3-01.2, “Joint Doctrine for Theater Counter Air Operations”, The Joint Chiefs of Staff, Washington, DC, abril de 1986.
- D. A. Koewler, “An Approach for Tasking Allocated Combat Resources to Targets”, Tese de Mestrado, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, Ohio, março de 1999.
- S. D. Kuykendall, “Optimizing Selection of Tomahawk Cruise Missiles”, Tese de Mestrado, Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, março de 1998.
- V. C. Li, G. L. Curry e E. A. Boyd, “Towards the Real Time Solution of Strike Force Asset”, Working draft (sponsored by the Office of Naval Research), 2002.
- J. McDonnell, N. Gizzi e S. J. Louis, “Strike Force Asset Allocation using Genetic Search”, Working paper (work supported by National Science Foundation), 2001.
- R. E. Rosenthal, “Principles of Multiobjective Optimization”, *Decision Sciences*, Vol. 16, 1985, pp. 133-152.
- J. M. Saling, “Dynamic Re-Tasking: The JFACC and the Airborne Strike Package”, Research Report, Air University, Maxwell AFB, Alabama, abril de 1999.
- United States Air Force Pamphlet 14-210, “USAF Intelligence Targeting Guide”, 1º de fevereiro de 1998.
- K. A. Yost, “Survey and Description of USAF Conventional Munitions Allocation Models”, Office of Aerospace Studies, Kirtland AFB, Technical Report OAS TR 95-1, fevereiro de 1995.
- K. A. Yost, “The Time Strike Munitions Optimization Model,” Departamento de Pesquisa Operacional, Naval Postgraduate School, Relatório Técnico NPS-OR-96-001, janeiro de 1996.

A. R. Washburn, "Notes on Firing Theory", Departamento de Pesquisa Operacional, Naval Postgraduate School, Relatório Técnico, maio de 2002.

Bibliografia

J. E. Almonte, "Rapid Targeting Triad Against the Mobile Threat: An Evolutionary Concept", Naval War College, Newport, Rhode Island, 8 de fevereiro de 2000.

E. D. Andersen e K. D. Andersen, "Presolving in Linear Programming", *Mathematical Programming*, Vol. 71-2, pp. 221-245, 1995.

R. E. Bixby et ali, "MIP: Theory and Practice Closing the Gap", em *System Modelling and Optimization: Methods, Theory and Applications*, Powell, M. J. D., e Scholtes, S., editores, Kluwer, The Netherlands, pp. 19-49, 2000.

A. L. Brearley, G. Mitra e H. P. Williams, "Analysis of Mathematical Programming Problems Prior to Applying the Simplex Algorithm", *Mathematical Programming*, Vol. 8, pp. 54-83, 1975.

G. G. Brown, D. M. Coulter e A. R. Washburn, "Sortie Optimization and Munitions Planning", Relatório NPSOR-93-011, Naval Postgraduate School, maio de 1993.

K. C. Chan et alii, "Operation Desert Storm: Evaluation of the Air Campaign", US General Accounting Office, Relatório GAO/NSIAD-97-134, Committee on Commerce, House of Representatives, junho de 1997.

W. G. Chapman, "Organizational Concepts for Sensor-to-Shooter World. The Impact of Real-Time Information on Air Power Targeting", Maxwell Air Force Base, Alabama, maio de 1997.

T. H. Deale, "On the fields of friendly strike . . . The Dichotomy of Air Force Doctrine and Training Involving Real-Time Targeting", School of Advanced Airpower Studies, Air University, Maxwell Air Force Base, Alabama, junho de 1999.

F. Frostic, "Air Campaign Against the Iraqi Army in the Kuwaiti Theater of Operations", Project Air Force, RAND, 1994.

J. Gondzio, "Presolve Analysis of Linear Programs Prior to Applying an Interior Point

Method", *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 9, Nº 1, Winter 1994.

B. J. Griggs, G. S. Parnell e L. J. Lemkuhl, "An Air Mission Planning Algorithm Using Decision Analysis and Mixed Integer Programming", *Operations Research*, 45(5): 662-676, setembro-outubro de 1997.

D. W. Hinton, "A Decision Support System for Joint Force Air Component Commander (JFACC) Combat Planning", Tese de Mestrado, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, Ohio, março de 1997.

V. Jain e I. E. Grossmann, "Algorithms for Hybrid MILP/CP Models for a Class of Optimization Problems", *INFORMS Journal of Computing*, 13, 258-276, Fall 2001.

A. Jewell, "Sortie Generation Capacity of Embarked Airwings", Center for Naval Analysis, dezembro de 1998.

Joint Publication 1-02, "Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms", The Joint Chiefs of Staff, Washington, DC, agosto de 2002.

Joint Publication 3-56.1, "Command and Control for Joint Air Operations", The Joint Chiefs of Staff, Washington, DC, 14 de novembro de 1994.

Joint Publication 3-60, "Joint Doctrine for Targeting", The Joint Chiefs of Staff, Washington, DC, 17 janeiro de 2002.

T. A. Keaney e E. A. Cohen, "Gulf War Air Power Survey, Summary Report", U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993.

G. E. Koleszar, "A Description of the Weapon Optimization and Resource Requirements Model (WORRM)", Relatório IDA D-2360, Institute for Defense Analysis, agosto de 1999.

I. J. Lustig e J. F. Puget, "Program Does Not Equal Program: Constraint Programming and its Relationship to Mathematical Programming", *Interfaces*, Vol 31, Nº 6, pp. 29-53, dezembro de 2001.

M. D. Mandeles, T. C. Hone e S. S. Terry, "Managing Command and Control in the Persian Gulf War", Praeger Publishers, 1996.

I. Maros e M. H. Khaliq, "Advances in Design and Implementation of Optimization Software", Imperial College Departmental

Technical Report ISSN 1469-4174, London, 2000.

J. P. McDonnell, "Apportion or Divert? The JFC'S Dilemma: Asset Availability for Time-Sensitive Targeting", Naval War College, Newport, Rhode Island, fevereiro de 2002.

M. W. P. Savelsbergh, "Preprocessing and Probing Techniques for Mixed Integer Programming Problems", *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, Nº 4, Fall 1994.

D. Searle et alii, "Rapid Targeting and Real-Time Response: The Critical Links for Effective Use of Combined Intelligence Products in Combat Operations", apresentado na Conferência AIAA Missile Science em 1996, Monterey, California, 3-5 de dezembro de 1996.

R. E. Steuer, "*Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*", Robert E. Krieger Publishing Company, 1989.

A. Swietanowski, "A Modular Presolve Procedure for Large Scale Linear Programming",

Working Paper WP 95-113, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, outubro de 1995.

E. C. Thomas, "The Future of All-weather, Rapid Reaction Precision Targeting", Maxwell Air Force Base, Alabama, abril de 2000.

D. E. Thaler e D. A. Shlapak, "Perspectives on Theater Air Campaign Planning" RAND's Project Air Force, 1995.

United States Joint Forces Command, "Commander's Handbook for Joint Time-Sensitive Targeting", Office of the Secretary of Defense, Washington, DC, 22 de março de 2002.

J. C. Van Hove, "An Integer Program Decomposition Approach to Combat Planning", Tese de Doutorado (Ph. D.), Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, Ohio, setembro de 1998.

Notas

1. Entenda-se que a eficiência está definida no modelo matemático. Ou seja, a expressão "alto grau de eficiência" não é absoluta. O resultado depende das variáveis e de todas as demais considerações tratadas na abordagem matemática do problema, conforme o nível de detalhamento estabelecido.

2. Preferimos não traduzir o termo *ATO*, por não existir, ainda, uma expressão em português adequada ou mesmo uma concepção brasileira para esse tipo de documento. Em princípio, a *ATO* abrangeria um conjunto de OFRAG (Ordens Fragmentárias), correspondentes às missões envolvidas em um mesmo pacote.

3. Tradução de "Time on Target" (TOT).

4. Tradução de "Joint Air Operations Center" (JAOC).

5. Tradução de "Master Air Attack Plan" (MAAP).

6. Tradução de "Prioritized Target List" (PTL).

7. Tradução de "probability of kill" (P_k).

8. Um "mixed-integer program" ou MIP é um modelo de otimização linear com algumas variáveis inteiras e/ou binárias. A não-linearidade dessas variáveis é tratada de uma forma especial (através do algoritmo "branch-and-bound"), que não compromete o modelo como um todo, ou seja, não é necessário abandonar o algoritmo Simplex, o que possibilita velocidade e robustez na solução.

9. O erro circular provável é definido como o raio do círculo cujo interior espera-se que seja atingido por 50% dos lançamentos.

10. GAMS (General Algebraic Modeling System) é um *software* utilizado para codificação de problemas de Programação Matemática. Constitui-se de uma linguagem simples, que permite a transcrição de um modelo em linguagem de alto nível e acesso a uma série de "solvers" lineares e não-lineares. CPLEX é um desses "solvers", extremamente rápido na solução de modelos lineares ou misto-inteiros (MIP).