

Utilização da heurística *Extremal Optimization* para alocação coordenada de múltiplos alvos em Combate Aéreo BVR

Leonardo Honorio Macedo, Rodrigo Arnaldo Scarpel, Henrique Costa Marques
 Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – São José dos Campos – SP

Resumo — Este trabalho investigou a heurística *Extremal Optimization* (EO) para a resolução do problema de Alocação Armamento-Alvo, do inglês *Weapon-Target Assignment* (WTA), quando aplicado a um contexto de Combate Aéreo Além do Alcance Visual, do inglês *Beyond Visual Range* (BVR). O WTA é um problema de otimização combinatória, classificado como NP-Completo. Devido a esta característica, sua complexidade cresce exponencialmente a medida que o número de variáveis aumenta. Assim, métodos heurísticos se mostram os mais adequados a esta classe de problemas, se comparado a tentativa de resolução por métodos exatos. O Experimento realizado neste trabalho demonstrou que o EO adaptado ao WTA em um cenário de combate BVR convergiu rapidamente para o mínimo global da função, mostrando-se bem adequado a resolução de problemas desta classe.

Palavras-Chave — Otimização, Alocação de alvos, Heurística.

I. INTRODUÇÃO

A alocação coordenada de múltiplos alvos em um cenário de Combate Aéreo Além do Alcance Visual, do inglês *Beyond Visual Range* (BVR), refere-se a alocar mísseis de médio alcance, do inglês *Medium-Range Air-to-Air Missile* (MRAAM) carregados por plataforma aérea, contra alvos aéreos com o objetivo de maximizar a probabilidade de destruição destes últimos. Este problema é conhecido na literatura acadêmica como um problema de alocação armamento-alvo, do inglês *Weapon-Target Assignment* (WTA). O WTA surgiu na necessidade de modelar operações de combate onde se desejava maximizar o dano total esperado causado aos alvos inimigos utilizando-se um número limitado de armamentos [1]. Trata-se de um problema de otimização combinatória, formalmente apresentado em 1958 [2], classificado como NP-completo [3]. A Fig. 1 exemplifica o WTA em um cenário de combate BVR, onde três aeronaves de caça carregando um total de seis mísseis MRAAM, precisam alocar seus armamentos em seis adversários de forma a minimizar a expectativa de sobrevivência destes, ou seja, uma alocação de maior probabilidade de sucesso no caso do lançamento dos mísseis MRAAM.

O WTA abordado neste artigo insere-se na classificação de alocação baseada no alvo, do inglês *Target-based Weapon-Target Assignment* (TBWTA). Usa-se o termo *Target-based*

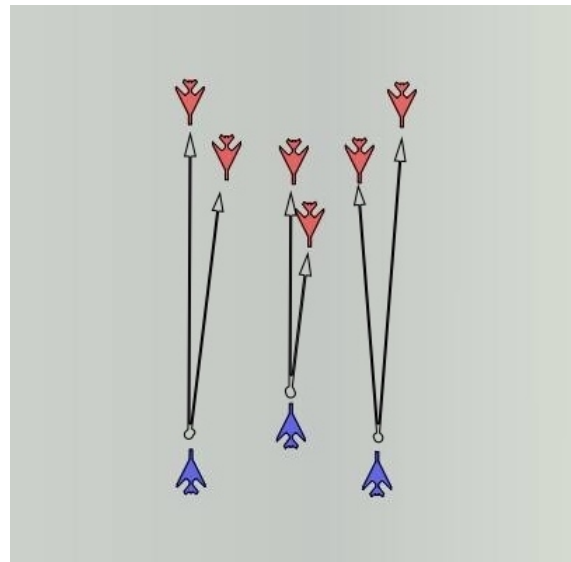


Fig. 1 – Cenário de combate BVR.

para distinguir este problema de um outro tipo de WTA baseado nos ativos a serem protegidos, do inglês *Asset-based Weapon-Target Assignment* (ABWTA), onde armamentos são designados a alvos, de modo que o valor do grupo de ativos a serem protegidos é maximizado, supondo que os alvos em si são mísseis engajando os ativos [4]. Para TBWTA estudado neste trabalho, parte-se do pressuposto que em um dado instante de tempo, a quantidade e localização dos armamentos, assim como de todos os alvos são conhecidos. Assim, uma única designação pode ser realizada para todos os alvos envolvidos. Este tipo de abordagem classifica o WTA como estático, do inglês *Static Weapon-Target Assignment* (SWTA) [5]. Em situações onde não se conhece *a priori* a posição de todos os alvos, esta é feita em múltiplos estágios de tempo. Em um primeiro estágio, engaja-se os alvos conhecidos com um número limitado de armamentos; observa-se o resultado deste primeiro estágio; replaneja-se um novo engajamento com base no *feedback* do engajamento anterior aos alvos remanescentes ou em novos alvos, repetindo-se o procedimento [1]. Esta abordagem classifica o problema de WTA em dinâmico, do inglês *Dynamic Weapon-Target Assignment* (DWTA), sendo este um caso generalizado do WTA estático. Para facilitar o entendimento, o problema de alocação abordado neste artigo, ou seja, baseado no alvo e estático, será referenciado apenas como WTA daqui em diante.

Por se tratar de um problema do tipo NP-completo, propostas de solução utilizando-se algoritmos exatos só são possíveis em instâncias menores do problema. Ao aumentar o número de variáveis, o problema pode tornar-se intratável para um algoritmo exato, não convergindo para uma solução ótima. Assim, grande parte das pesquisas envolvendo WTA e suas variações se concentraram em estudar soluções baseadas em algoritmos heurísticos, onde, apesar de não se garantir a otimalidade, os mesmos proporcionam resultados bem satisfatórios, com vantagens de um menor custo computacional e de tempo [6]–[9]. Este tipo de abordagem heurística permite resolver o problema de alocação de maneira rápida, eficiente e, principalmente, escalável em função da quantidade de variáveis envolvidas. É importante frisar que em um cenário complexo de combate BVR, com aeronaves voando a altas velocidades, a quantidade e posição dos alvos conhecidos muda rapidamente. Assim, possuir um método de solução escalável é altamente desejável para fornecer robustez ao processo.

II. O PROBLEMA DA ALOCAÇÃO COORDENADA DE MÚLTIPLOS ALVOS

A. Metodologia Proposta

Para a resolução do WTA aplicado a um combate aéreo BVR, utilizou-se a heurística evolucionária chamada *Extremal Optimization* (EO). A EO foi proposta em 1999 por Boettcher e Percus [10] e trata-se de uma heurística de propósito geral baseada no não equilíbrio dinâmico de grandes flutuações que rearranjam a maior parte do sistema, também conhecida como “avalanches”, com o potencial de fazer qualquer configuração acessível, evitando mínimos locais [11]. Este algoritmo foi inspirado no modelo de criticabilidade auto-organizada, do inglês *self-organized critically* (SOC) de Bak *et al* [12], que é um conceito de física estatística utilizado para descrever uma classe de sistemas que têm um ponto crítico como atraente. Para o WTA aplicado ao combate BVR, o EO de Boettcher e Percus (2003) [11] pode ser assim resumido:

1. Inicialize randomicamente um vetor solução S , contendo a sequência de todos os n pares de alocação agente-alvo; Faça $S_{\text{best}} := S$;
2. Permute cada elemento (i.e. agentes) desse vetor, escolhendo-os randomicamente, gerando n novas soluções;
3. Calcule e ordene (da melhor para a pior) as soluções geradas, pelo seu valor de *fitness*;
4. Substitua a solução original (passo 1) por uma nova solução, de acordo com a distribuição de probabilidade $P_k \sim K^{-\tau}$
5. Repita os passos 2 a 4, até que um critério de parada seja atingido;
6. Devolva a melhor solução S encontrada durante o processo.

Adaptado de [11]

Nesta aplicação, P_k corresponde a probabilidade inerente a cada posição do *rank* de n soluções geradas. O parâmetro τ -EO na distribuição $K^{-\tau}$ controla a capacidade de diversificação da heurística. Para $\tau = 0$, o EO se comporta simplesmente como um algoritmo randômico de busca local. Por outro lado, com $\tau \rightarrow \infty$, o processo se aproxima a uma busca determinística local, atualizando apenas as priores soluções da ordem de soluções, podendo ficar preso em mínimos locais [11].

B. Cenário Proposto

Para o estudo do problema, vamos supor o cenário exemplificado na Fig.1, onde existem M agentes (misséis), carregados por P plataformas, tendo que alocar Q alvos. Seja a sequência de agentes $A = \{r, r = 0, 1, \dots, M - 1\}$; a sequência de plataformas $B = \{s, s = 0, 1, \dots, P - 1\}$; e a sequência de alvos $C = \{t, t = 0, 1, \dots, Q - 1\}$. A probabilidade do alvo t ser atingido pelo agente r representa o fator de ameaça (*threat factor*) do agente r ao alvo t , ou $tf_{rt} [0,1]$. Como cada agente é carregado por uma plataforma s , podemos dizer que o fator de ameaça do agente r ao alvo t é igual ao fator de ameaça da plataforma s que carrega este agente r ao alvo t , ou $tf_{rt} = tf_{st} [0,1]$. Da mesma forma, existe o fator com que o alvo t ameaça a plataforma s , ou seja, $tf_{ts} [0,1]$.

Para calcular os fatores de ameaça necessários, implementou-se o modelo no *framework* computacional AEROGRAF [13], desenvolvido pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAV), da Força Aérea Brasileira. Neste *framework*, é possível estimar o envelope dinâmico de um míssil MRAAM, conforme observado na Fig. 2., em função das características do armamento utilizado e nas informações de posição, velocidade, altitude e proa das aeronaves envolvidas.

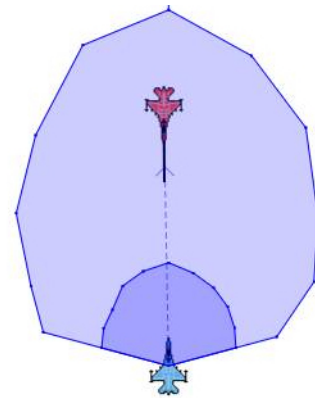


Fig. 2 – Envelope Dinâmico de um míssil MRAAM.

A partir do envelope dinâmico, foi modelada uma curva de probabilidade por meio de uma função sigmoide, de forma a representar, para cada envelope gerado, o fator de ameaça em qualquer ponto onde o alvo se encontra, conforme mostrado na Fig.3.

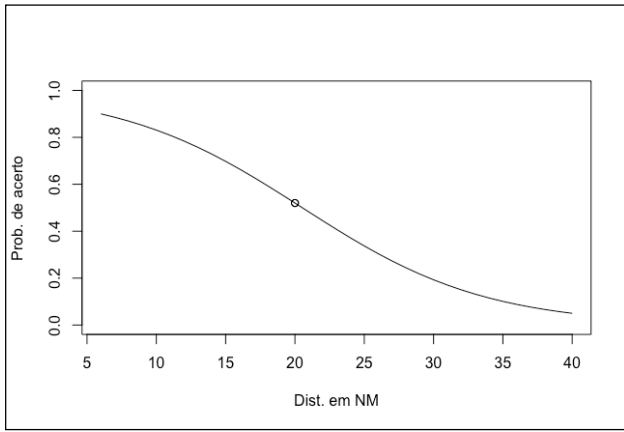


Fig. 3 – Curva de probabilidade do fator de ameaça.

Na Fig.3, o ponto sobre a curva exemplifica um fator de ameaça de 60%, na condição expressa pela Fig. 2, quando a distância entre atirador e alvo é de 20NM.

C. Modelagem do Problema

A partir do cálculo dos fatores de ameaça, foi possível modelar a função objetivo do WTA.

Inicialmente, dado que o número total de alvos é Q , o número total de plataformas é P e que cada plataforma carrega r agentes, o número total de agentes (M) é dado por:

$$M = \sum_{r=0}^{P-1} r \quad (1)$$

A quantidade de agentes r por plataforma pode ser diferente, desde que o total de agentes (M) seja no mínimo igual e no máximo o dobro do número total de alvos (Q).

$$Q \leq M \leq 2Q \quad (2)$$

O fator de ameaça, ou *threat factor* do agente r para o alvo t (tf_{rt}) representa a probabilidade do r -ésimo agente destruir o t -ésimo alvo. Logo, o t -ésimo alvo sobrevive com a probabilidade de $1 - tf_{rt}$. A ameaça remanescente oferecida pelo alvo t é:

$$(1 - tf_{rt}) * \sum_{s=0}^{P-1} tf_{ts} \quad (3)$$

Assim, a Função Objetivo (Z) apresentada em (4), consiste em minimizar a ameaça total remanescente oferecida pelos alvos, utilizando-se todos os agentes disponíveis.

$$\min Z = \sum_{t=0}^{Q-1} \sum_{s=0}^{P-1} \left\{ tf_{ts} * \left[\prod_{r=0}^{M-1} (1 - tf_{rt})^{X_{rt}} \right] \right\} \quad (4)$$

Onde X_{rt} indica:

$$\begin{cases} X_{rt} = 1, & \text{agente } r \text{ alocado ao alvo } t \\ X_{rt} = 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Neste estudo, a exemplo de estudos anteriores ao mesmo contexto [14], dois pressupostos foram definidos. O primeiro diz respeito a que todos os alvos devem ser engajados por pelo menos um e não mais do que dois mísseis (agentes). O segundo pressupõe que todos os agentes devem ser utilizados. Essas restrições ao problema foram expressas em (6).

$$s. a. \begin{cases} \sum_{r=0}^{M-1} X_{rt} \leq 2, \forall t \in \{0, 1, \dots, Q-1\} \\ \sum_{t=0}^{Q-1} X_{rt} = 1, \forall r \in \{0, 1, \dots, M-1\} \end{cases} \quad (6)$$

III. EXPERIMENTO

O experimento foi executado de acordo com os parâmetros da Tabela I. Os fatores de ameaça foram dispostos nas Tabelas II e III. Neste experimento, todos os agentes r são do mesmo tipo e agentes de uma mesma plataforma s possuem o mesmo fator de ameaça para um mesmo alvo t .

Em relação aos recursos computacionais, foi utilizado um notebook Dell Latitude E7440, com Sistema Operacional Windows 10 Pro 64bits, processador Intel Core i7-4600, 2.10GHz, com 8GB de memória RAM. O algoritmo de resolução do WTA foi codificado em C++.

TABELA I – DADOS DO EXPERIMENTO

P (plataformas)	Q (alvos)	M (mísseis)
3	6	6

TABELA II – FATOR DE AMEAÇA PLATAFORMA - ALVO

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
s_0	$8,06e^{-1}$	$4,55e^{-1}$	$5,77e^{-1}$	$5,60e^{-1}$	$5,93e^{-1}$	$6,30e^{-1}$
s_1	$6,33e^{-1}$	$3,01e^{-1}$	$7,45e^{-1}$	$5,44e^{-1}$	$2,76e^{-1}$	$1,47e^{-1}$
s_2	$5,45e^{-1}$	$2,45e^{-1}$	$1,10e^{-1}$	$1,82e^{-1}$	$4,88e^{-1}$	$7,13e^{-1}$

TABELA III – FATOR DE AMEAÇA ALVO - PLATAFORMA

	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
t_0	$8,06e^{-1}$	$6,33e^{-1}$	$5,46e^{-1}$	$8,06e^{-1}$	$6,33e^{-1}$	$5,46e^{-1}$
t_1	$4,55e^{-1}$	$3,01e^{-1}$	$2,46e^{-1}$	$4,55e^{-1}$	$3,01e^{-1}$	$2,46e^{-1}$
t_2	$5,77e^{-1}$	$7,45e^{-1}$	$1,11e^{-1}$	$5,77e^{-1}$	$7,45e^{-1}$	$1,11e^{-1}$
t_3	$5,60e^{-1}$	$5,44e^{-1}$	$1,83e^{-1}$	$5,60e^{-1}$	$5,44e^{-1}$	$1,83e^{-1}$
t_4	$5,93e^{-1}$	$2,77e^{-1}$	$4,88e^{-1}$	$5,93e^{-1}$	$2,77e^{-1}$	$4,88e^{-1}$
t_5	$6,30e^{-1}$	$1,48e^{-1}$	$7,13e^{-1}$	$6,30e^{-1}$	$1,48e^{-1}$	$7,13e^{-1}$

IV. RESULTADOS

O resultado numérico do experimento foi disposto na Tabela IV. A Fig.4 exibe o gráfico geral de convergência do algoritmo, enquanto que a Fig.5 exibe este mesmo gráfico de forma expandida na área de convergência. Neste teste, a

convergência deu-se na quarta iteração do processo. Por fim, a Fig 5 expõe o resultado prático da alocação.

TABELA IV – VALORES DA FUNÇÃO OBJETIVO (Z)

Iterações	Valor de Z (EO)	Z ótimo	Tempo de execução (seg)
500	3,007791	3,007791	$< 10^{-6}$

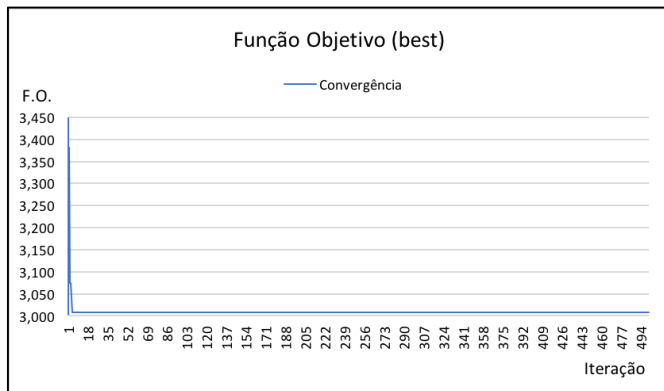


Fig. 4 – Função Objetivo (Z) versus Iteração.

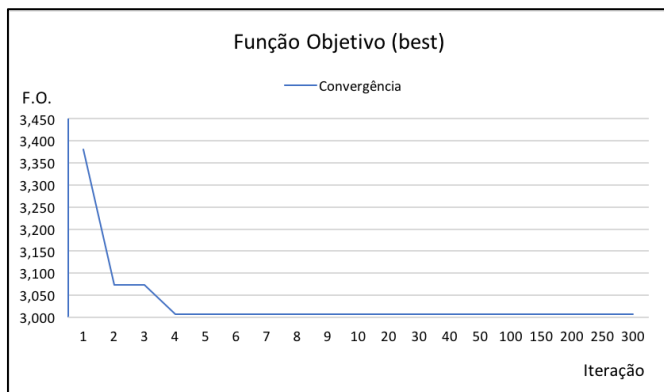


Fig. 5 – Função Objetivo (Z) versus Iteração (expandido).

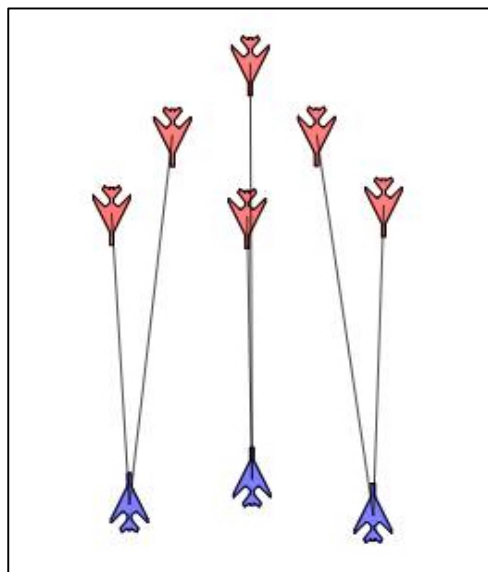


Fig. 6 – Alocação Final.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou o problema de WTA aplicado a um cenário de combate aéreo BVR. O experimento demonstrou que o algoritmo EO adaptado ao problema em questão, mostrou-se estável em convergir para o mínimo global da função, mesmo sem investigar todas as possibilidades disponíveis, além de ser de fácil implementação e possuir apenas um único parâmetro a ser definido. Futuros experimentos serão conduzidos no sentido de aplicar uma segunda heurística para gerar uma solução inicial para o EO, partindo-se assim de uma solução ainda mais aprimorada em comparação à uma solução inicial aleatória, bem como testar o algoritmo em instâncias maiores do problema.

REFERÊNCIAS

- [1] R. K. Ahuja, A. Kumar, K. C. Jha, and J. B. Orlin, "Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem," *Oper. Res.*, vol. 55, no. 6, pp. 1136–1146, 2007.
- [2] A. S. Manne, "A Target-Assignment Problem," *Oper. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 346–351, Jun. 1958.
- [3] S. P. Lloyd and H. S. Witsenhausen, "Weapons Allocation is {NP}-Complete," in *Proceedings of the Summer Conference on Simulation*, 1986, pp. 1054–1058.
- [4] P. M. Pardalos and L. S. Pitsoulis, *Nonlinear assignment problems: algorithms and applications*, no. 7. Springer US, 2000.
- [5] D. A. Grundel, "Probabilistic analysis and results of combinatorial problems with military applications," University of Florida, 2004.
- [6] B. Liu, Z. Qin, R. Wang, Y. B. Gao, and L. P. Shao, "A hybrid heuristic particle swarm optimization for coordinated multi-target assignment," *2009 4th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2009*, pp. 1929–1934, 2009.
- [7] W. Jingye, "Weapon-Target Assignment Research Based on Genetic Algorithm Mixed with Damage Simulation," in *International Conference on Computer Application and System Modeling*, 2010, no. Iccasm, pp. 460–463.
- [8] J. Wang and Y. W. Zhu, "A solving algorithm for Target Assignment optimization model based on SA," *Proc. - Int. Conf. Artif. Intell. Comput. Intell. AICI 2010*, vol. 3, no. Icn, pp. 489–493, 2010.
- [9] M. A. Sahin and K. Leblebicioglu, "A hierarchical fuzzy decision maker for the Weapon Target Assignment," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 18, no. PART 1, pp. 8993–8998, 2011.
- [10] S. Boettcher and A. G. Percus, "Extremal Optimization: Methods derived from Co-Evolution," in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1999, pp. 825–832.
- [11] S. Boettcher and A. G. Percus, "Extremal Optimization: An Evolutionary Local-Search Algorithm," in *Computational Modeling and Problem Solving in the Networked World*, 2003, pp. 61–77.
- [12] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, "Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, no. 4, pp. 381–384, 1987.
- [13] IEAV, "Projeto Aerograf." [Online]. Available: http://www.ieav.cta.br/divisoes/site-egi/?page_id=36. [Accessed: 05-Jul-2017].
- [14] De-Lin Luo, Chun-Lin Shen, Biao Wang, and Wen-Hai Wu, "Air Combat Decision-Making for Cooperative Multiple Target Attack Using Heuristic Adaptive Genetic Algorithm," in *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005, pp. 473–478.