



Análise Operacional: Otimização e Estatística

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

Use of the Extremal Optimization heuristic for coordinated allocation of multiple targets in BVR Air Combat

Leonardo Honorio Macedo, Rodrigo Arnaldo Scarpel, Henrique Costa Marques

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – São José dos Campos - SP

Article Info

Article History:

Received	21 April	2022
Revised	19 July	2022
Accepted	03 August	2022
Available online	31 August	2022

Palavras-Chave:

Otimização
Alocação de Alvos
Heurística

Keywords:

Optimization
Target Allocation
Heuristic

E-mail addresses:

honoriohlm@fab.mil.br (L. H. Macedo)
rodrigo@ita.br (R. A. Scarpel),
hmarques@ita.br (H. C. Marques)

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.

Abstract

This work investigated the Extremal Optimization (EO) heuristic to solve the Weapon-Target Assignment (WTA) problem when applied to an Air Combat context Beyond Visual Range (BVR). WTA is a combinatorial optimization problem, classified as NP-Complete. Due to this characteristic, its complexity grows exponentially as the number of variables increases. Thus, heuristic methods are the most suitable for this class of problems, if compared to the attempt to solve them by exact methods. The experiment carried out in this work showed that the EO adapted to the WTA in a BVR combat scenario quickly converged to the global minimum of the function, proving to be very suitable for solving problems of this class.

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.

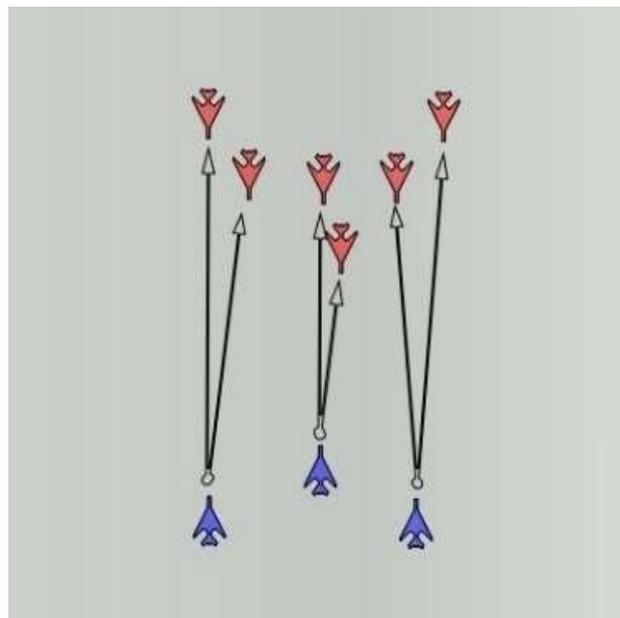


Fig. 1 – Cenário de combate BVR.

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

Usa-se o termo *Target-based* 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 (mísseis), 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.

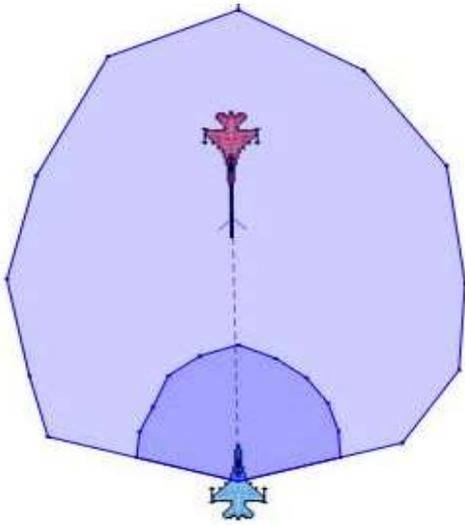


Fig. 2 – Envelope Dinâmico de um míssil MRAAM.

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 encontre, conforme mostrado na Fig.3.

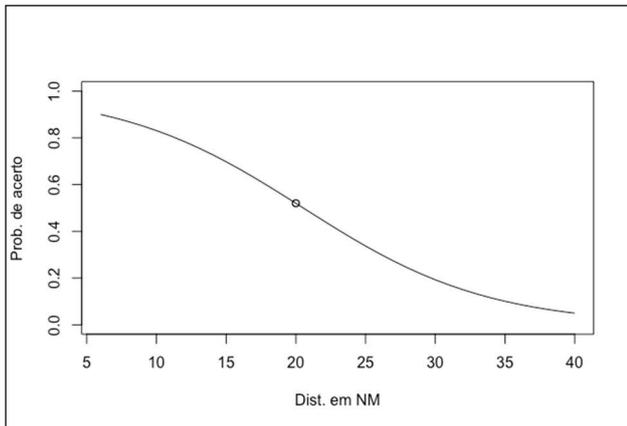


Fig. 3 – Curva de probabilidade do fator de ameaça.

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 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	$< 10^{-6}$

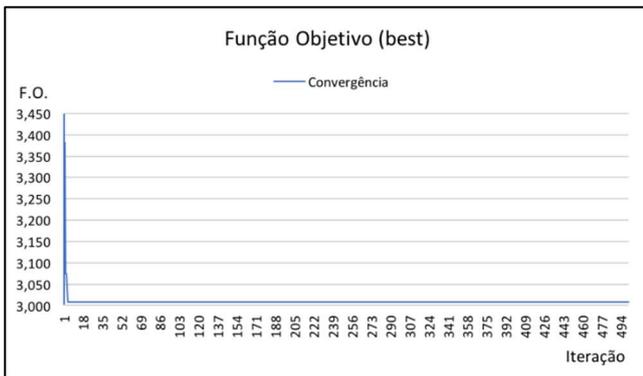


Fig. 4 – Função Objetivo (Z) versus Iteração.



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

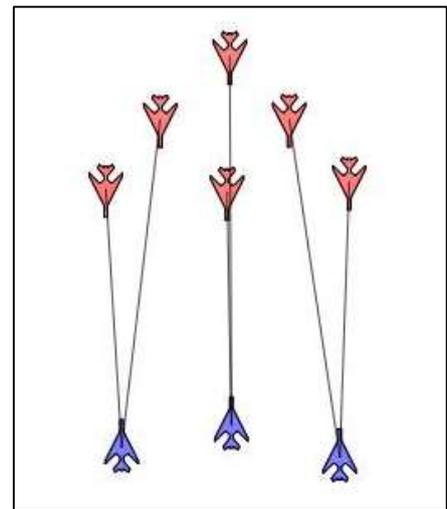


Fig. 6 – Alocação Final.

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. Icnc, 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.