

Aplicação do método Monte Carlo Scanning à alocação de artilharia antiaérea

Wilson J. Vieira^a, Alexandre D. Caldeira^b

^aAv. Nove de Julho 709, Ap. 601, Jardim Apolo, São José dos Campos, Brasil, 12243-000, vieirawj@uol.com.br

^bDivisão de Energia Nuclear, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, Brasil, caldeiraadc@fab.mil.br

RESUMO: O Método Monte Carlo Scanning foi desenvolvido na Subdivisão de Sistemas de Apoio à Decisão, do Instituto de Estudos Avançados, visando explorar a velocidade dos computadores atuais. A estratégia usada para abordar problemas de otimização tem como princípio a amostragem aleatória e exaustiva do domínio e a avaliação da função objetivo. O Método Monte Carlo Scanning é aplicado a um problema de alocação de artilharia antiaérea. Os resultados obtidos para o problema analisado são idênticos aos resultados da literatura, que utilizaram Programação Dinâmica. A simplicidade, a facilidade de implementação e a capacidade de encontrar rapidamente soluções maximizadas indicam que o Método Monte Carlo Scanning pode ser considerado como uma poderosa ferramenta de simulação computacional para sistemas de apoio à decisão militar.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Monte Carlo. Alocação de artilharia antiaérea. Análise operacional.

ABSTRACT: The Monte Carlo Scanning Method was developed in the Decision Support Systems Subdivision of the Institute for Advanced Studies to explore the speed of modern computers. The strategy used to address optimization problems has as its principle the thorough random sampling of the domain and the evaluation of the objective function. The Monte Carlo Scanning Method is applied to an antiaircraft artillery allocation problem. The results obtained for the analyzed problem are identical to the results of the literature, which used Dynamic Programming. Simplicity, ease of implementation, and the ability to quickly find maximized solutions indicate that the Monte Carlo Scanning Method can be considered as a powerful computational simulation tool for military decision support systems.

KEYWORDS: Monte Carlo simulation. Allocation of antiaircraft artillery. Operational analysis

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico na área militar tornou-se complexo de forma a requerer sistemas de apoio à decisão para a análise operacional. Esses sistemas devem auxiliar a resolver questões de projeto, de efetividade, de custo e de alocação de armas de defesa ou de ataque. Essas questões envolvem, em geral, a maximização ou minimização de certas quantidades como, por exemplo, recursos financeiros, materiais e humanos, quantidade de armas, apoio logístico etc.

O processo de otimização consiste em encontrar uma função de várias variáveis, que represente o problema, sujeita a restrições, para ser maximizada ou minimizada. Para atingir esse objetivo são utilizados métodos determinísticos, como programação linear, programação dinâmica, programação não linear, etc. Outra classe de métodos é chamada de métodos

heurísticos ou estocásticos, como Simulação Monte Carlo, *Simulated Annealing* (SA), algoritmos genéticos, redes neurais estocásticas, etc. Problemas reais, em geral, apresentam uma complexidade que preconiza a utilização de métodos estocásticos ou heurísticos [1].

Nicholas Metropolis, Stanisław Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann e Edward Teller são considerados [2] os criadores dos Métodos Monte Carlo. Pesquisadores da *Rand Corporation*, com financiamento da Força Aérea dos EUA, tornaram possíveis inúmeros desenvolvimentos nos Métodos Monte Carlo, que começaram a ser aplicados [3,4] em diversas áreas de C&T, incluindo a pesquisa operacional.

A Subdivisão de Sistemas de Apoio à Decisão, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), tem incentivado a utilização de métodos heurísticos para a solução de problemas de otimização. Dentro desse propósito, diversos trabalhos foram realizados [5-7] utilizando o Método SA.

Considerando-se a baixa velocidade de processamento dos computadores no passado, as aplicações de Métodos Monte Carlo eram muito limitadas. Entretanto, com a evolução da velocidade dos processadores, como mostrado na Tabela 1 [8], a utilização desses métodos passou a ser praticamente obrigatória para algumas classes de problemas. Como pode ser notado, o computador mais rápido do Brasil, que se encontra no Laboratório Nacional de Computação Científica, é 7000 vezes mais rápido do que o PC utilizado nesse trabalho.

Tab. 1 – Benchmarks Linpack selecionados

Nome	Descrição	TOP500	GFLOPS
SunwayTaihuLight	Jiangsu, China	1	93.014.600
Tianhe-2	Universidade Nacional de Defesa Tecnologia, China	2	33.862.700
Titan	DOE/SC/ORNL	3	17.590.000
10692 x Intel Xeon E5-2695v2	LNCC, Brasil	265	456.800
2 x Intel Xeon E5 2687W v4	2016	-	1.078
Intel Core I5 3330 CPU 3,00 GHz	PC utilizado nesse trabalho	-	64
Intel Core I7, 3,20 GHz, 4 núcleos	PC padrão em 2009 (64-bit)	-	33
Intel Pentium II, 450 MHz	PC padrão em 1999	-	0,4
Intel 386 DX, 33 MHz	PC padrão em 1989	-	0,008

Com o objetivo de mostrar que a velocidade dos computadores atuais permite encontrar soluções ótimas apenas varrendo o domínio e inspecionando a imagem da função objetivo, foi desenvolvido o Método *Monte Carlo Scanning* (MCS). O Método MCS utiliza o princípio básico de Monte Carlo, onde quantidades aleatórias distribuídas uniformemente entre [0,1] são utilizadas para a simulação de eventos que obedecem a praticamente qualquer lei de distribuição. Suas principais vantagens sobre outros métodos são a simplicidade, a robustez e a rapidez de implementação computacional.

Além do aumento exponencial da velocidade dos computadores com o tempo, o desenvolvimento do Método MCS foi motivado também pela dificuldade de sintonia dos parâmetros de convergência do

Método SA, considerada um grande obstáculo para aplicações em programas computacionais de uso de rotina. Nessa linha de pesquisa, foram realizados trabalhos de otimização de funções contínuas [9] e de uma função discreta, característica do problema de alocação de armas de defesa aérea [10-12] com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os de outros métodos e verificar a metodologia.

Dentre os diversos problemas de alocação de armas que podem necessitar de sistemas de apoio à decisão militar, um deles é o de alocação de Artilharia Antiaérea (AAA) para a defesa de diversos tipos de instalações [1]. Esse problema foi resolvido [1] utilizando o Método de Programação Dinâmica (PD) [13]. Nesse trabalho, esse mesmo problema foi analisado utilizando o Método MCS.

Na Seção 2, é descrito o problema de alocação de AAA e, na Seção 3, são comentadas, sucintamente, as metodologias [1,9] utilizadas na abordagem do problema. Na Seção 4, são reproduzidos os resultados alcançados e, na Seção 5, são apresentados comentários finais e recomendações para trabalhos futuros.

2. Alocação de artilharia antiaérea

O problema de alocação de AAA [1] considera que um planejador deva distribuir $NAAA$ baterias antiaéreas para a proteção de $NSites$ instalações. A sobrevivência de cada instalação é fornecida para cada nível de proteção, ou seja, quando desprotegida, protegida por uma bateria, por duas baterias e, assim, sucessivamente.

No caso analisado, $NAAA$ é igual a seis, $NSites$ é igual a quatro e as Probabilidades de Sobrevivência das Instalações (PSI) são fornecidas de acordo com a Tabela 2. Os dados apresentados na Tabela 2 são expostos graficamente na Figura 1. Como pode ser observado, as probabilidades de sobrevivência da Instalação 4 são maiores do que as da Instalação 3 que, por sua vez, são maiores do que as das Instalações 1 e 2. Inicialmente, para números pequenos de baterias antiaéreas alocadas, as probabilidades de sobrevivência da Instalação 1 são menores do que as da Instalação 2, porém, quando esse número aumenta, esse comportamento se inverte.

Tab. 2 – Sobrevivência das instalações (%)

Baterias antiaéreas	Instalação			
	1	2	3	4
0	30	40	40	40
1	40	50	50	50
2	50	60	60	60
3	60	60	70	80
4	70	60	80	90
5	70	60	80	90
6	70	60	80	90

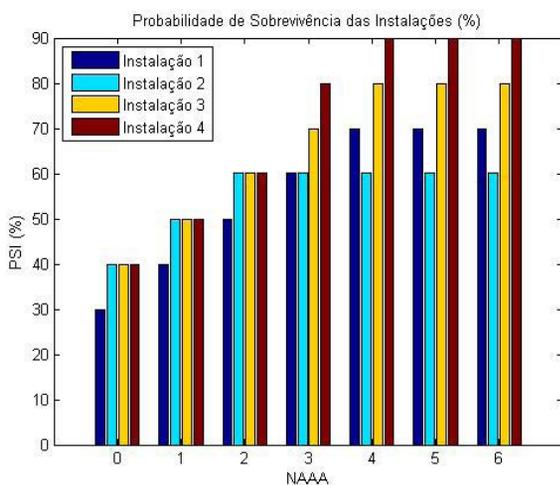


Fig. 1– Probabilidade de sobrevivência das instalações (%).

3. Metodologias

O Método de PD tem sido utilizado extensivamente em pesquisa operacional militar por causa de sua capacidade de tratar um grande número de problemas reais [1]. No entanto, esse método exige grande experiência na construção de algoritmos extensos e complexos, especialmente no caso de problemas com um grande número de variáveis que produzam matrizes de altas ordens.

A solução do problema de alocação de AAA utilizando o Método PD ilustra os principais mecanismos do método, que são a utilização de fórmulas recursivas e a manutenção de valores

máximos de soluções intermediárias para encontrar as soluções máximas finais [1].

O Método MCS utiliza o princípio básico de Monte Carlo e foi proposto com o objetivo de explorar a velocidade dos computadores atuais. A utilização eficiente do Método MCS requer a correta amostragem do domínio e o estabelecimento de uma função objetivo apropriada.

Na construção de amostras com $NAAA$ baterias antiaéreas distribuídas em $NSites$ instalações, foi utilizada uma função geradora para a amostragem de $NSites$ números aleatórios inteiros X_d , no intervalo $[0, NAAA]$, cuja soma também seja $NAAA$. No entanto, esse procedimento introduz um viés que compromete a uniformidade da amostragem. Portanto, a amostragem deve ser randomizada com o objetivo de corrigir esse viés.

A efetividade da proteção total das instalações é obtida através da maximização do valor total da sobrevivência das $NSites$ instalações, varrendo as várias combinações possíveis, expressa pela Função Objetivo (FO)

$$FO = \sum_{i=1}^{NSites} PSI(X_d(i) + 1, i), \quad (1)$$

sujeita à restrição

$$\sum_{i=1}^{NSites} X_d(i) = NAAA, \quad (2)$$

onde $X_d(i)$ representa o número amostrado de baterias antiaéreas para cada Instalação i .

Em resumo, a aplicação do Método MCS consiste, basicamente, na obtenção de uma amostra válida e no cálculo da função objetivo que, nesse caso, é a soma das probabilidades (%) de sobrevivência correspondente a cada instalação. Após um grande número de amostras processadas, as amostras repetidas são eliminadas e aquelas com o maior valor da função objetivo constituem o grupo de soluções de efetividade máxima. Na **Tabela 3**, é apresentado, passo a passo, um algoritmo do Método MCS para a alocação de AAA.

Tab. 3 – Algoritmo do Método MCS para a otimização da alocação de AAA.

Passo	Ação a ser executada
1	Amostrar $NSites$ números inteiros $Xd \in [0, NAAA]$, cuja soma seja igual a $NAAA$.
2	Garantir que a distribuição de Xd seja uniformemente distribuída através da randomização do vetor Xd .
3	Calcular FO .
4	Repetir os Passos 1 a 3 um número suficiente de vezes para garantir uma boa estatística. Na situação analisada foram utilizadas 1000 amostras.
5	Eliminar os valores de Xd repetidos.
6	Ordenar os planos de alocação de AAA de acordo com valores decrescentes da FO .
7	Escolher os planos que apresentaram os maiores valores da FO .

4. Resultados

Os resultados alcançados com o Método MCS, implementado no programa computacional MCS-AAA utilizando o ambiente Matlab [14], são idênticos aos resultados publicados na literatura [1]. As quinze soluções independentes, obtidas considerando 1000 amostras, são apresentadas na **Tabela 4**.

Tab. 4 – Planos de alocação otimizada das baterias de AAA

Plano	Alocação/instalação				Sobrevivência (%)				Função Objetivo
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	0	0	2	4	30	40	60	90	220
2	0	0	3	3	30	40	70	80	220
3	0	1	1	4	30	50	50	90	220
4	0	1	2	3	30	50	60	80	220
5	0	2	0	4	30	60	40	90	220
6	0	2	1	3	30	60	50	80	220
7	1	0	1	4	40	40	50	90	220
8	1	0	2	3	40	40	60	80	220
9	1	1	0	4	40	50	40	90	220
10	1	1	1	3	40	50	50	80	220
11	1	2	0	3	40	60	40	80	220
12	2	0	0	4	50	40	40	90	220
13	2	0	1	3	50	40	50	80	220
14	2	1	0	3	50	50	40	80	220
15	3	0	0	3	60	40	40	80	220

A **Figura 2** apresenta a distribuição relativa à **Tabela 4**. Pode-se notar que a distribuição possui mais baterias de AAA alocadas na Instalação 4.

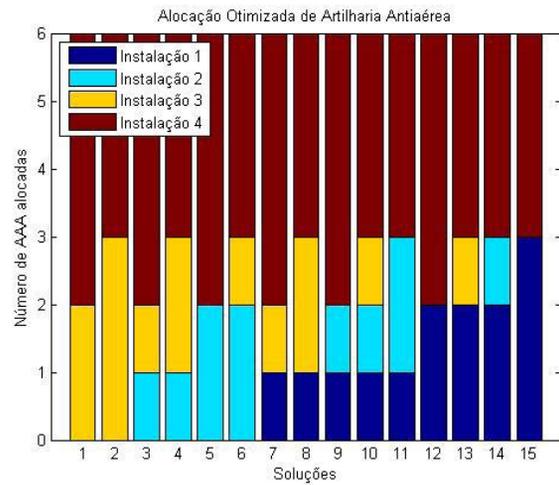


Fig. 2 – Planos otimizados com o número de baterias de AAA alocadas em cada instalação.

Outra situação analisada é o caso em que o planejamento requiera que todas as instalações tenham uma sobrevivência maior do que 50%. A **Tabela 5** mostra as quatro soluções maximizadas para esse caso. Esses resultados também são idênticos aos publicados na literatura [1].

Tab. 5 – Planos otimizados para valores de sobrevivência das instalações maiores ou iguais a 50%

Plano	Alocação/instalação				Sobrevivência (%)				Função Objetivo
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	2	1	1	2	50	50	50	60	210
2	2	1	2	1	50	50	60	50	210
3	2	2	1	1	50	60	50	50	210
4	3	1	1	1	60	50	50	50	210

A **Figura 3** apresenta a distribuição relativa à **Tabela 4**, onde se pode observar que as soluções possuem pelo menos duas baterias de AAA alocadas na Instalação 1, como é esperado através da análise da **Figura 1**.

Uma maneira de encontrar um número suficiente de amostras é observar o comportamento das soluções obtidas. Em se tratando de um método heurístico, se ao aumentar o número de amostras o número de soluções permanecer constante, então todas as soluções podem ter sido encontradas. Existem outras maneiras de garantir a qualidade dos resultados, mas, nesse trabalho, foi apenas observado o comportamento da solução.

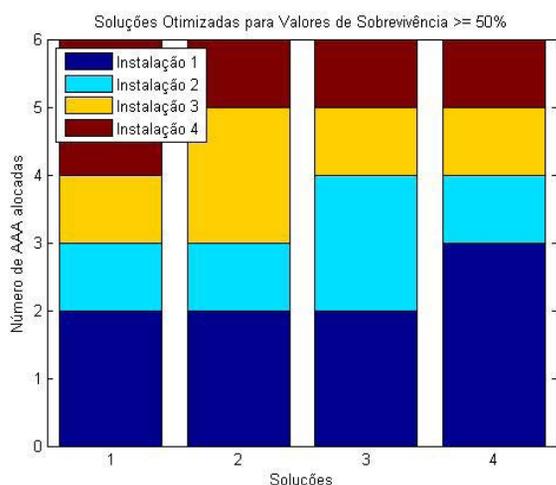


Fig. 3 – Planos otimizados com o número de baterias de AAA alocadas considerando valores de sobrevivência maiores ou iguais a 50%.

5. Comentários finais

Para o problema proposto de alocação AAA, o Método MCS, com apenas 1000 amostras, o que

representa um pequeno tempo de computação, apresentou soluções equivalentes às obtidas na literatura com o Método PD para o problema de alocação de baterias de AAA. Assim sendo, a simplicidade, que implica em uma grande facilidade de implementação, e a efetividade computacional do Método MCS o tornam muito atraente para ser utilizado em softwares, como a Plataforma AEROGRAF [15]. A próxima atividade, nessa linha de pesquisa, será a implementação do software MCS-AAA como um *plug-in* dessa plataforma. Por outro lado, caso haja interesse, o software pode ser disponibilizado mediante solicitação.

Pretende-se, no próximo trabalho, introduzir no Método MCS um procedimento de otimização com base em um refinamento das soluções encontradas. Finalmente, será desenvolvido um programa computacional para resolver o problema de alocação de armas de ataque aéreo utilizando o Método MCS.

Referências

- [1] JAISWAL, N. K. **Military operations research: quantitative decision making**, International Series in Operations Research & Management Science. Springer Science+Business Media: New York, 1997.
- [2] BAGATIN, Marta; GERARDIN, Simone (orgs). **Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers**, CRC Press, 2015.
- [3] KAHN, H. **Applications of Monte Carlo**, Rand Corporation, RM-1237-AEC, 1954.
- [4] HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMBD. C. Monte Carlo Methods. Fletcher & Son Ltd: Norwich, 1964.
- [5] VIEIRA, W. J.; CALDEIRA, A. D. **Uma Verificação do Método Computacional Simulated Annealing**, CTA/IEAv-EGI/NT-001/2016.
- [6] VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D. **Aplicação do Método Computacional Simulated Annealing em uma Função Objetivo Discreta**, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2016.
- [7] VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D. Simulação Monte Carlo da Alocação de Armas de Defesa Aérea, submetido à **Revista Spectrum**, 2017.
- [8] <https://www.top500.org/lists/2016/06/>. Último acesso em 26/06/2017.
- [9] VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D. **Método Monte Carlo de Varredura de Domínio**, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2017.
- [10] VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D. Aplicação do Método Monte Carlo Scanning no Problema de Alocação de Armas de Defesa Aérea, Nota Técnica CTA/IEAv, submetida para publicação, 2017.
- [11] VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D. Uma Ferramenta Computacional de Apoio à Decisão Militar para Alocação de Armas de Defesa Aérea em Multicamadas, submetido à **Revista Pesquisa Naval**, 2017.
- [12] Silva, J.C; VIEIRA, W. J; CALDEIRA, A. D... Uma Ferramenta Computacional de Apoio à Decisão Militar para o Problema de Alocação de Armas de Defesa Aérea, submetido ao **XIX SIGE**, 2017.
- [13] BELLMANN, R. **Dynamic Programming**, Princeton University Press: New Jersey, 1957.
- [14] MATLAB version 7.11.0. **Natick**, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.
- [15] PETERSEN, J. F.; AQUINO M. R. C; SALLES, R. N. Plataforma AEROGRAF: um SIG voltado para a Força Aérea, **SPECTRUM: Revista do Comando-Geral de Operações Aéreas**, v. 1, n. 11, pp. 26-28, 2008.