

Planejamento da Mobilização de Pessoal para a Missão EXCON TÁPIO utilizando Pesquisa Operacional

Dennys Leandro Agostini Rocha¹, Wagner Martins Molina Mota¹

¹Centro de Computação da Aeronáutica (CCA-SJ), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — O Exercício Conjunto Tápio (EXCON TÁPIO) é uma atividade operacional fundamental para o desenvolvimento doutrinário e o treinamento técnico das Unidades Militares do Comando de Preparo (COMPREP), da Marinha do Brasil, do Exército Brasileiro e de países parceiros. Organizado pela Base Aérea de Campo Grande (BACG) e coordenado pelo COMPREP, o exercício exige o planejamento e a execução da rota mais eficiente para a mobilização e desmobilização de militares da Força Aérea, além do planejamento de carga de diversas localidades do Brasil até a cidade de Campo Grande, MS. A logística deste exercício é crucial para o sucesso da operação, representando um desafio significativo para a coordenação e otimização das rotas. Este estudo objetiva desenvolver um modelo matemático para otimizar o planejamento da rota de transporte aéreo, considerando variáveis como distância, quantidade de passageiros por localidade e capacidade máxima de passageiros da aeronave. O trabalho apresenta formulações matemáticas em Programação Meta-heurística e propõe o Algoritmo Simulated Annealing (SA) para otimizar uma variação do Problema do Caixeiro Viajante (Traveling Salesman Problem, TSP). Os resultados obtidos confirmaram que a formulação adotada e o Algoritmo Simulated Annealing são eficazes em encontrar a melhor rota e soluções ótimas, ao incorporar heurísticas.

I. INTRODUÇÃO

O Exercício Conjunto Tápio (EXCON TÁPIO) é uma das mais importantes atividades operacionais realizadas pelo Comando de Preparo (COMPREP) da Força Aérea Brasileira (FAB), com participação das forças armadas da Marinha do Brasil e do Exército Brasileiro, além de países parceiros. Este exercício tem como principal objetivo o desenvolvimento doutrinário e o treinamento técnico das Unidades Militares envolvidas. O cenário de guerra simulado no EXCON TÁPIO é de um conflito assimétrico e limitado, baseado nas diretrizes do Manual de Defesa Militar MD 51-M-04, que aborda cenários de guerra irregular e regional.

A complexidade logística envolvida no exercício é notável, devido à necessidade de mobilizar e desmobilizar um grande número de militares e equipamentos em tempo hábil. A mobilização envolve 24 unidades operacionais e 12 unidades administrativas, além de unidades da Marinha e do Exército, localizadas em 13 estados diferentes. O transporte desses militares e equipamentos até a Base Aérea de Campo Grande (BACG), em Mato Grosso do Sul, exige um planejamento logístico eficiente para garantir o sucesso das operações.

O presente estudo busca otimizar o planejamento das rotas de transporte aéreo, minimizando custos operacionais e o tempo de voo. Para isso, desenvolvemos um modelo matemático com o uso de técnicas avançadas de Pesquisa Operacional, como o Algoritmo Genético (GA) e o Simulated Annealing (SA). Essas meta-heurísticas são amplamente utilizadas em problemas de otimização de grande escala, como o Problema do Caixeiro Viajante (TSP), sendo capazes de encontrar soluções eficientes em um tempo razoável.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na seção Metodologia, detalhamos os métodos e algoritmos utilizados para resolver o problema de otimização logística; na seção Resultados, discutimos os achados da pesquisa e suas implicações práticas; e, finalmente, na Conclusão, sintetizamos os principais pontos e sugerimos possíveis direções para trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

A. Formulação do Problema

O objetivo principal deste estudo é otimizar a rota de transporte aéreo utilizada no EXCON TÁPIO, minimizando tanto o custo quanto o tempo de voo, respeitando as restrições de capacidade das aeronaves e a demanda de passageiros em cada localidade. O custo, em km percorridos, é dado pela seguinte equação:

$$Z = \left(\sum_{i=0}^{n-1} d(x_i, x_{i+1}) \right) + \sum_{j=0}^k P_j + d(x_n, x_0)$$

onde $d(x_i, x_j)$ é a distância entre pontos i e j , n é o número total de localidades, e P_j é a penalidade paga por querer ir a uma localidade e não ter capacidade para alocar todos os PAX.

Além disso, o modelo impõe restrições de capacidade, garantindo que o número de passageiros em cada trecho não exceda o limite da aeronave. Caso a demanda de passageiros em uma localidade ultrapasse a capacidade, a aeronave deverá retornar à base para desembarcar antes de continuar a mobilização.

B. Algoritmos Utilizados

Para resolver o problema de otimização da rota de transporte aéreo, foram utilizados dois algoritmos de meta-heurística:

1 - Algoritmo Genético (GA): O GA é uma técnica de otimização inspirada nos princípios da evolução natural, que busca soluções por meio de processos de seleção, cruzamento e mutação. O GA foi configurado para gerar uma população inicial de soluções, evoluindo essa população ao longo de várias gerações até encontrar a melhor solução possível. Para mais detalhes sobre a implementação do GA, consulte Mitchell (1998).

2 - Simulated Annealing (SA): O SA é um método de busca estocástica baseado no processo de resfriamento de metais, que permite encontrar soluções subótimas com alta eficiência. O algoritmo explora o espaço de soluções perturbando iterativamente uma solução inicial e aceitando ou rejeitando novas soluções com base em um critério de aceitação probabilística. Mais informações sobre o SA podem ser encontradas em Kirkpatrick et al. (1983).

Ambos os métodos foram implementados para buscar a solução que minimiza a distância total da rota, respeitando as restrições de capacidade e a demanda por passageiros em cada localidade.

III. RESULTADOS

Os resultados do experimento mostraram que tanto o GA quanto o SA foram capazes de encontrar a solução ótima para o problema proposto, com a solução global mínima sendo de 14.338,57 km. O Simulated Annealing se destacou em termos de eficiência, encontrando a solução ótima em apenas 0,2 segundos, enquanto o GA apresentou um tempo médio de 5,40 segundos.

Em comparação, o método de Enumeração Exaustiva, embora tenha confirmado a solução ótima, levou 1278,59 segundos para avaliar todas as combinações possíveis. Esse resultado reforça a ineficácia do uso de Enumeração Exaustiva em problemas de grande escala, justificando o uso de meta-heurísticas como o GA e o SA.

Além disso, foi analisado o impacto de variações no número de passageiros e na capacidade das aeronaves. Em cenários onde o número de passageiros excede a capacidade da aeronave, foi necessário o retorno à base, o que aumentou significativamente o custo total de voo. Essas simulações demonstram a importância de otimizar as rotas de forma a minimizar tais retornos.

IV. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, podemos concluir que os métodos Algoritmo Genético (GA) e Simulated Annealing (SA) são eficazes para otimização logística no contexto do EXCON TÁPIO. O SA se mostrou o mais eficiente em termos de tempo de execução, enquanto o GA apresentou resultados robustos em termos de qualidade de solução, embora tenha exigido mais tempo de processamento.

A introdução de métodos de meta-heurísticas, como o GA e o SA, permite uma otimização eficiente da logística de transporte, resultando em economias significativas de tempo e custo, principalmente em exercícios de grande escala como o EXCON TÁPIO. Trabalhos futuros podem explorar a aplicação de algoritmos híbridos ou outras técnicas de pesquisa operacional para melhorar ainda mais o desempenho das soluções encontradas, bem como a inclusão de novas restrições, como condições meteorológicas ou disponibilidade de aeronaves.

Dito isso, o GA apresentou a solução ótima global consistente em 5.40 segundos, enquanto SA se destacou como o mais eficiente em termos de tempo de execução, encontrando a solução ótima global em apenas 0.2 segundos, o que o mostra como uma abordagem viável para resolver o problema da mobilização para o EXCON TÁPIO.

Da mesma maneira, como forma de nos aproximarmos mais ainda da realidade, podemos considerar um valor de \$30000 por hora de voo e uma velocidade de cruzeiro de 870 km/h para a aeronave responsável pela mobilização do pessoal. Nesse cenário, uma solução não otimizada, como por exemplo SBCG → SBBR → SBGL → SBPV → SBSM → SBAN → SBMN → SBBV → SBNT → SBSJ → SBCO → SBCT → SBGR → SBCG, que tem um custo de 20164.73 km, o potencial econômico seria de aproximadamente \$200902.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Portaria no 189/GC3, de 30 de janeiro de 2017. Aprova a 1ª modificação da Concepção Estratégica - Força Aérea 100. Boletim do Comando da Aeronáutica, Brasília, DF, n. 18, 1º fev. 2017b. DCA 11-45.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Portaria nº 113, de 1º de fevereiro de 2007. Dispõe sobre a "Doutrina Militar de Defesa - MD 51-M-04". Brasília: Boletim nº 006/MD, 9 fev. 2007.
- MITCHELL, M. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- REINELT, G. The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- ABDOLHAMID, M. et al. Metaheuristic Approaches for Solving the Traveling Salesman Problem: A Comparative Study. Journal of Optimization Theory and Applications, 2022.
- LEE, K. et al. Performance of Genetic Algorithms in TSP Solvers: Benchmarking Different Mutation and Crossover Techniques. International Journal of Computational Intelligence and Applications, 2021.