

Solução do problema de roteamento de veículos com o algoritmo de otimização por enxame de partículas

Luiz F. Xavier Alves¹, Graziela Santos de Araújo¹, Bianca de Almeida Dantas¹

¹Faculdade de Computação – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

Resumo. *O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) é um dos temas mais estudados em otimização combinatória, devido à sua ampla aplicabilidade prática. Dada a sua complexidade, conhecidamente NP-difícil, o uso de metaheurísticas tem sido explorado como forma de obter boas soluções em tempo computacional razoável. Nesse contexto, este artigo apresenta a implementação da meta-heurística populacional Particle Swarm Optimization (PSO), em conjunto com métodos de busca local, para a resolução do PRV Capacitado (PRVC). Os resultados obtidos indicam que o método é capaz de gerar soluções competitivas para instâncias de referência da literatura.*

Abstract. *The Vehicle Routing Problem (VRP) is a widely studied combinatorial optimization topics due to its practical applicability. Given its complexity, which is known to be NP-hard, the use of metaheuristics has been explored to obtain good solutions in a reasonable time. In this context, this article presents the implementation of the population based metaheuristic Particle Swarm Optimization, along with local search methods, for solving the Capacitated VRP. Our results indicate that this method is capable of generating competitive solutions for standard benchmark problems.*

Palavras-chave: Problema de Roteamento de Veículos, *Particle Swarm Optimization*, Otimização Combinatória

1. Introdução

O Problema do Roteamento de Veículos (PRV), originalmente proposto por Dantzig e Ramser [Dantzig 1959], consiste na busca por uma rota para que uma frota de veículos atenda às demandas de um conjunto de clientes respeitando algumas restrições. O PRV possui várias aplicações reais, especialmente na modelagem de situações relacionadas à logística de distribuição de produtos e no transporte de pessoas. Em sua versão clássica, chamada de PRV Capacitado (PRVC), uma frota de veículos com a mesma capacidade, localizados num depósito central, precisa ser roteada para atender um conjunto de clientes com demandas conhecidas. Partindo desse cenário, diferentes restrições ao problema podem ser adicionadas dependendo da situação em questão, gerando, assim, diversas variações do PRV.

O PRV, assim como suas variantes, é um problema NP-difícil, ou seja, não se conhece um algoritmo capaz de encontrar uma solução ótima em tempo polinomial. Diante disso, a obtenção de boas alternativas para solucionar o PRV e suas variantes em tempo razoável tem uma grande importância prática, o que tornou o uso de meta-heurísticas para a resolução desse problema um objeto de vários estudos, como é o caso deste trabalho.

A otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization* - PSO), introduzida por Kennedy e Eberhart [Kennedy 1995] é uma meta-heurística populacional na qual um conjunto de partículas se desloca no espaço de soluções. Durante a execução do algoritmo, de forma probabilística, as partículas são aceleradas em direção ao ótimo local de uma vizinhança ou em direção à melhor solução obtida pela própria partícula. Desse modo, este estudo busca implementar o algoritmo do PSO - em conjunto com algoritmos de busca local, como 2-opt e o swap* [Vidal 2021] - para a resolução do PRVC e analisar a sua viabilidade.

2. Metodologia

O presente trabalho concentrou-se no desenvolvimento de um algoritmo sequencial robusto, implementado na linguagem C++, visando a obtenção de soluções de alta qualidade para o PRVC. Inicialmente, desenvolveu-se uma versão base do *Particle Swarm Optimization* (PSO), submetida a comparações com conjuntos de instâncias da literatura para a calibração de parâmetros fundamentais, como o tamanho do enxame e o número de iterações.

Após a definição paramétrica, o foco voltou-se para o refinamento dos resultados por meio da integração de mecanismos de busca local. Primeiramente, integrou-se ao algoritmo proposto o operador 2-opt para otimização intra-rota, o qual proporcionou ganhos significativos na qualidade das soluções. No entanto, constatou-se que a inicialização puramente aleatória das partículas restringia a convergência do algoritmo; para mitigar essa limitação, adotou-se uma estratégia de inicialização setorizada. Por fim, o mecanismo de busca foi complementado com o operador inter-rotas Swap*. Na arquitetura proposta, este operador é aplicado sequencialmente ao 2-opt em um subconjunto de 5 partículas por iteração. Testes realizados indicaram que a combinação dos operadores 2-opt e Swap* no fluxo de execução do PSO é determinante para a obtenção dos melhores valores de fitness.

3. Resultados obtidos

A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos após 10 execuções independentes do PSO apresentado neste artigo. Nas duas primeiras linhas são apresentados, respectivamente, o número de clientes e a solução ótima da instância; enquanto as duas últimas exibem o melhor valor obtido e o tempo computacional em segundos. Os experimentos foram realizados em uma máquina equipada com processador Intel Xeon E5-2620 v4 @ 2.10 GHz e 16 GB de memória RAM DDR4. O ambiente de software utilizado foi o sistema operacional Ubuntu 24.04 LTS, executado através do *Windows Subsystem for Linux* (WSL).

Para cada teste, definiu-se o número de iterações em 5000, com uma população de 25 partículas. Destas, as 5 melhores de cada iteração eram selecionadas para o refinamento pelos algoritmos de busca local. Os experimentos utilizaram as instâncias do conjunto CMT [Christofides and Eilon 1969], disponíveis no repositório CVRPLib [CVRPLib 2025].

É possível perceber que os resultados obtidos aproximam-se das soluções ótimas registradas na literatura, tornando a estratégia abordada por esse artigo promissora para a resolução do PRVC, principalmente pelo uso dos algoritmos de busca local. Nota-se, porém, que o tempo de execução é um fator crucial a ser considerado no desenvolvimento dessa versão do PSO, visto que cresce muito ao se aumentar o número de clientes nos

Tabela 1. Resultados da execução do PSO

	CMT1	CMT2	CMT3	CMT4	CMT5	CMT11	CMT12
Qt. Clientes	50	75	100	150	199	120	100
Ótima	524,61	835,26	826,14	1028,42	1291,29	1042,11	819,56
Obtido	524,61	860,60	850,37	1075,05	1386,84	1044,46	858,32
Tempo	95,39	203,83	298,55	646,67	1143,21	413,22	302,54

casos de teste o que estimula, por exemplo, a integração de técnicas de paralelismo ao código construído.

4. Considerações finais

Após a implementação e testes do PSO para a resolução do PRVC, é perceptível que essa abordagem se mostra promissora para a obtenção de boas soluções. Entretanto, ainda é necessária a execução do algoritmo em instâncias de teste de escala maior, a fim de se fazer uma análise mais completa. Após as várias etapas no processo de pesquisa, fica claro que o investimento em estratégias de busca local é o principal foco a ser explorado para o aumento da qualidade das soluções.

Como trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de mitigar o tempo de execução da abordagem. Para tal, propõe-se a integração de estratégias de paralelismo, aplicáveis tanto nas operações do PSO (como a atualização de velocidades e posições) quanto na avaliação de vizinhanças nos algoritmos de busca local. Espera-se, com isso, viabilizar a resolução de instâncias de maior escala, mantendo a qualidade das soluções obtidas.

Referências

- Christofides, N. and Eilon, S. (1969). An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Journal of the Operational Research Society*, 20(3):309–318.
- CVRPLib (2025). All instances. <https://galgos.inf.puc-rio.br/cvrplib/en/instances>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- Dantzig, G. B. Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1):80–91.
- Kennedy, J., E. R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, pages 1942–1948.
- Vidal, T. (2021). Hybrid genetic search for the cvrp: Open-source implementation and swap* neighborhood. *Computers & Operations Research*.