

UMA HEURÍSTICA GRASP PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS ATIVOS E PASSIVOS

Gabriel Vinicius Bacci

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC), Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, CEP 13566-590, São Carlos - SP.
gabriel.bacci@usp.br

Maristela Oliveira Santos

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC), Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, CEP 13566-590, São Carlos - SP.
mari@icmc.usp.br

Pedro Augusto Munari Júnior

Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luís 310 - Monjolinho, CEP 13565-905, São Carlos - SP.
munari@dep.ufscar.br

RESUMO

O Problema de Roteamento de Veículos Ativos e Passivos (APVRP, do inglês *Active Passive Vehicle Routing Problem*) surge em operações logísticas relevantes, exigindo coordenação entre veículos ativos, que se movem autonomamente, e passivos, que dependem dos ativos para transporte. Este trabalho propõe uma heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para resolvê-lo, com foco em instâncias grandes, onde métodos exatos enfrentam limitações de escalabilidade. Ademais, analisa-se o uso das soluções obtidas pela GRASP como ponto de partida para a resolução por meio de um solver de programação inteira mista de propósito geral, usando uma formulação do APVRP. Para avaliar as abordagens, foram realizados experimentos com instâncias disponíveis da literatura, comparando o desempenho da GRASP com o de outra heurística da literatura. Os resultados mostram que a GRASP gera boas soluções com baixo tempo computacional e, quando usada como solução inicial, melhora o desempenho do solver.

PALAVRAS CHAVE. APVRP, GRASP, Solução Inicial.

Tópicos: MH - Metaheurísticas, L&T - Logística e Transportes

ABSTRACT

The Active Passive Vehicle Routing Problem (APVRP) arises in relevant logistics operations, requiring coordination between active vehicles, which move autonomously, and passive vehicles, which rely on the active ones for transportation. This work proposes a GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) heuristic to solve it, focusing on large instances where exact methods face scalability limitations. Furthermore, the use of the solutions obtained by GRASP is analyzed as a starting point for solving the problem through a general-purpose mixed-integer programming solver, using an APVRP formulation. To evaluate the approaches, experiments were conducted using benchmark instances from the literature, comparing the performance of GRASP with another heuristic in the literature. The results show that GRASP produces good solutions with low computational time and, when used as an initial solution, improves the solver's performance.

KEYWORDS. APVRP. GRASP. Initial Solution.

Paper topics: MH - Metaheuristics, L&T - Logistics and Transportation

1. Introdução

Em muitas operações logísticas, há a necessidade de coordenação e sincronização entre tipos distintos de veículos. Nesse contexto, surge o Problema de Roteamento de Veículos Ativos e Passivos, uma variante do Problema de Roteamento de Veículos (VRP, do inglês *Vehicle Routing Problem*) que considera dois tipos de veículos, os ativos, capazes de se mover autonomamente e os passivos, que dependem dos ativos para serem transportados. Segundo Meisel e Kopfer [2014], o APVRP modela diversos contextos práticos, como o transporte de contêineres em portos, a movimentação de materiais entre estações de trabalho em fábricas e a gestão de frotas mistas em transportadoras.

Neste projeto, propõe-se o desenvolvimento de uma heurística do tipo GRASP para o APVRP. O objetivo é obter soluções de boa qualidade com baixo tempo computacional, especialmente para instâncias de maior porte, caracterizadas, por exemplo, por mais de três veículos ativos, seis veículos passivos e quarenta solicitações, nas quais métodos exatos apresentam dificuldades em encontrar soluções factíveis. Posteriormente, essas soluções iniciais serão empregadas como ponto de partida para um solver MIP de propósito geral, utilizando uma formulação conhecida do APVRP, com o intuito de aprimorar os resultados obtidos pela heurística.

A literatura demonstra que o GRASP é uma abordagem robusta e eficaz para problemas de roteamento com características semelhantes ao APVRP. Embora o GRASP tenha sido aplicado a variantes do problema de coleta e entrega com restrições de precedência, sua aplicação específica ao APVRP ainda não foi amplamente explorada na literatura, o que constitui a principal motivação deste trabalho. Pretende-se contribuir para a resolução eficiente do APVRP, por meio da geração de boas soluções iniciais com uma heurística simples, usada como base para o modelo de otimização, sem impactar significativamente o tempo total de execução.

2. Descrição do problema

Neste problema, tem-se um conjunto de solicitações de transporte, em que cada solicitação envolve o transporte de um veículo passivo de um ponto de coleta até um ponto de entrega. O veículo passivo não se move de forma autônoma, necessitando que um veículo ativo o transporte. O processo começa quando o veículo ativo leva o passivo até o local de coleta, onde ocorre o carregamento. Em seguida, o passivo é transportado ao destino final, onde será descarregado. Durante o carregamento e o descarregamento, o veículo ativo pode se desacoplar do passivo para realizar outras tarefas, o que aumenta a eficiência operacional. No entanto, isso também adiciona um grau de complexidade ao problema, uma vez que a movimentação e o tempo de espera de ambos os tipos de veículos devem ser cuidadosamente coordenados.

Outro fator importante a ser considerado é que tanto os veículos passivos quanto os veículos ativos têm restrições de compatibilidade. Isso significa que nem todos os veículos ativos podem transportar qualquer veículo passivo, e nem todos os veículos passivos podem ser utilizados para qualquer solicitação. Também há janelas de tempo para que cada solicitação seja concluída, o que impõe prazos rígidos para o carregamento e a entrega. Isso faz com que o planejamento das rotas precise levar em consideração o tempo de viagem entre os locais, o tempo de carregamento e descarregamento, e os períodos de disponibilidade de cada veículo.

O principal objetivo deste problema de roteamento é minimizar os custos operacionais totais. Isso inclui os custos de viagem dos veículos ativos e passivos, o tempo total das rotas dos veículos ativos e as penalidades associadas a solicitações que não são atendidas dentro do prazo estipulado. Para atingir esse objetivo, é necessário otimizar o uso de ambos os tipos de veículos, planejando suas rotas de forma a maximizar a eficiência e garantir que todas as solicitações sejam atendidas dentro do período de planejamento. Seu principal desafio está na necessidade de sincronizar as operações dos veículos ativos com os veículos passivos, já que o sucesso da operação depende da coordenação eficiente entre ambos os tipos de transporte.

3. Modelagem Matemática

Para resolver o APVRP é utilizado o modelo apresentado em Meisel e Kopfer [2014], com uma pequena alteração em duas de suas restrições originais. Essas modificações não alteram o valor da função objetivo; elas são utilizadas para facilitar que as soluções geradas pelo modelo sejam viáveis do ponto de vista prático. Além disso, facilitam que as soluções obtidas através das heurísticas sejam fornecidas como solução inicial ao *solver* que resolve o modelo.

O modelo minimiza a soma ponderada da distância total percorrida, do tempo de conclusão das rotas e do número de solicitações não atendidas. Suas restrições asseguram a atribuição de solicitações a veículos passivos compatíveis, a realização única de coletas e entregas e o reposicionamento adequado desses veículos. Também garante que os veículos ativos iniciem e terminem no depósito, mantenham a continuidade das rotas e sincronizem seus deslocamentos com o transporte dos passivos. Os tempos de chegada, partida, coleta e entrega são controlados para respeitar a coordenação operacional e as janelas de tempo. Além disso, o modelo define domínios das variáveis e impõe limites temporais para que todas as operações sejam concluídas dentro do horizonte de planejamento.

4. Heurísticas

Foi proposta uma heurística GRASP para o APVRP, utilizando o gerador de soluções iniciais e a busca local descritas em Meisel e Kopfer [2014]. Além disso, a heurística LNS do mesmo autor foi reimplementada para fins de comparação. O gerador de soluções iniciais constrói rotas para os veículos passivos, inserindo solicitações ordenadas pelo fim das janelas de tempo, e valida a viabilidade das rotas ativas por meio de outra função, também descrita em Meisel e Kopfer [2014], que verifica se existe uma alocação de veículos ativos para a rota dos passivos gerada, que respeite as restrições temporais e de compatibilidade.

A busca local utilizada explora o espaço de soluções por meio de vizinhanças definidas, permitindo a modificação incremental das rotas com o objetivo de reduzir o custo total e manter a viabilidade da solução. Com o objetivo de tornar a busca local computacionalmente mais eficiente, focando na melhoria do número de pedidos atendidos na solução, optou-se por utilizar apenas a abordagem de busca local aplicada às rotas dos veículos passivos.

A LNS de Meisel e Kopfer [2014], que foi reimplementada, recebe uma solução inicial viável, uma heurística de remoção e uma de busca local, removendo aleatoriamente q requisições atendidas e aplicando a remoção por obstáculo, que prioriza eliminar aquelas que dificultam a inserção de não atendidas. As requisições escolhidas são removidas e, se necessário, os transportes são recriados, repetindo o processo em caso de inviabilidade. Em seguida, tenta-se reinserir as solicitações não atendidas e aplica-se busca local às rotas dos veículos passivos, repetindo o ciclo até o critério de parada, retornando a melhor solução obtida.

O procedimento GRASP proposto segue os seguintes passos. Primeiramente, uma solução é gerada utilizando o gerador de soluções iniciais, agora incorporando um parâmetro s . Durante a construção das rotas, as solicitações são ordenadas com base no tempo final de suas janelas de tempo. Contudo, diferentemente de uma inserção estritamente gananciosa, há uma probabilidade $s\%$ de que o pedido atual não seja inserido na posição de menor custo da rota. Nesse caso, o pedido é deslocado para uma posição posterior na lista de prioridades, e a tentativa de inserção é feita para o pedido seguinte. Esse processo é repetido iterativamente até que todos os pedidos da lista tenham sido considerados. Ao final, uma busca local é aplicada sobre a solução gerada. O procedimento é repetido até atingir algum critério de parada, retornando a melhor solução obtida.

5. Testes Computacionais

Para testar o modelo, bem como as heurísticas implementadas, foi utilizado o conjunto de instâncias proposto em Meisel e Kopfer [2014]. Esse conjunto contém seis grupos, nomeados de

A a F, cada um com 30 instâncias. Para os testes, foram utilizadas as 10 primeiras instâncias do conjunto A. As instâncias do modelo foram executadas com um limite de tempo de 1 hora, e ambas as heurísticas com um limite de 15 minutos. Semelhante ao trabalho de Meisel e Kopfer [2014], o *solver* não encontrou a solução comprovadamente ótima para nenhuma das instâncias. Porém, foi possível determinar um valor de *gap* para as instâncias do conjunto B, algo que não foi possível realizar em Meisel e Kopfer [2014].

Nos resultados obtidos com o modelo, percebe-se que o *gap* obtido pelo *solver* é consideravelmente alto, especialmente para as instâncias maiores. Para as instâncias do conjunto A, o *gap* médio foi de 19,51%. Para todas as instâncias do conjunto B, o *gap* foi superior a 70%, sendo que, para a maioria delas, superou 80%, resultando em um *gap* médio de 82,45%. As duas heurísticas apresentaram desempenho semelhante, encontrando soluções com o mesmo valor em 60% das instâncias. No entanto, a heurística GRASP obteve soluções melhores em três instâncias do conjunto A e em quatro do conjunto B, ficando abaixo apenas em uma instância do conjunto B, na qual a LNS produziu um resultado superior.

Para as instâncias do conjunto A, os valores das soluções obtidas pelas heurísticas são, na maioria dos casos, iguais ou inferiores aos obtidos com o modelo, com exceção de duas instâncias, em que a GRASP apresentou resultados superiores. Já para o conjunto B, ambas as heurísticas encontraram soluções com valor melhor que o obtido com o modelo, sendo que a GRASP superou a LNS na maioria dos casos. Os valores das soluções obtidas pelo *solver* com o modelo executado por uma hora, tendo como ponto de partida as soluções fornecidas pelas heurísticas, foram sempre iguais ou melhores do que aqueles obtidos pelo *solver* sem solução inicial.

Consistente com os resultados anteriores, as soluções obtidas usando o modelo com ponto de partida da GRASP foram, na maioria dos casos, melhores ou iguais às obtidas com ponto de partida da LNS, exceto em uma instância.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Os resultados mostraram que a GRASP proposta superou ou igualou a LNS na maioria dos casos avaliados, inclusive quando utilizada como solução inicial no modelo. Além disso, constatou-se que fornecer ao modelo uma solução inicial obtida pelas heurísticas resultou em soluções sempre melhores ou iguais às obtidas sem essa informação, contribuindo, em alguns casos, para melhorias significativas. Também se verificou que essa abordagem reduziu o *gap* na maior parte dos casos, principalmente para as instâncias do conjunto B.

Como trabalho futuro, pode-se testar as heurísticas em instâncias maiores, possibilitando uma análise comparativa mais robusta. Além disso, é possível criar uma heurística híbrida que combine a diversificação do GRASP com a intensificação da LNS, de forma a explorar melhor o espaço de soluções e obter resultados ainda mais promissores.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) no processo nº 2024/19351-2 e no processo temático nº 22/05803-3

Referências

Meisel, F. e Kopfer, H. (2014). Synchronized routing of active and passive means of transport. *OR Spectrum*, 36(2):297–322.