São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

Roteamento de veículos com múltiplos entregadores envolvendo clusterização e dois níveis de rotas com aplicações em *last-mile delivery*

Fernando Senna*, **Reinaldo Morabito, Pedro Munari**
Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, km 235 - Monjolinho, São Carlos - SP, 13565-905
*fernandordsenna@gmail.com

Leandro Coelho
Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval
Pavillon Palasis-Prince, 2325, rue de la Terrasse, Quebec, Canadá

Antonio Moretti
Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-970

RESUMO

A crescente demanda por entregas rápidas em áreas densamente povoadas cria novos desafios na literatura e prática envolvendo o roteamento de veículos. Nesse trabalho, são introduzidas duas variantes do problema de roteamento de veículos em que mais de um entregador pode viajar com os veículos de forma a reduzir o tempo de serviço ao longo da rota, alinhadas com uma crescente literatura voltada para problemas de roteamento envolvendo transporte multimodal em *last-mile delivery*. São propostas formulações, desigualdades válidas e um algoritmo *branch-and-Benders-cut* para resolver os problemas. Os experimentos realizados demonstram a efetividade das metodologias propostas.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de veículos. Decomposição de Benders. *Last-mile delivery*.

Tópicos: Logística e Transportes (L&T), Otimização Combinatória (OC)

ABSTRACT

The growing demand for fast deliveries in densely populated areas creates new challenges in both practice and theory. In this work, we introduce two variants of the vehicle routing problem in which more than one carrier is allowed to travel in each vehicle to reduce the overall service time throughout the route. These variants are aligned with a growing literature on multi-modal last-mile delivery. Formulations, valid inequalities and a branch-and-Benders-cut algorithm are proposed to solve these problems. Experimental results highlight the effectiveness of the proposed approaches.

KEYWORDS. Vehicle routing. Benders decompositition. Last-mile delivery.

Paper topics: Logistics and Transportation (L&T), Combinatorial Optimization (OC)

http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175048

1. Introdução

O recente crescimento de demanda por entregas de variados tipos em áreas urbanas densamente povoadas gera desafios metodológicos e práticos na área de *last-mile delivery*. Dois desafios notáveis são as más condições de trânsito e dificuldade de encontrar locais de estacionamento. Por outro lado, a proximidade de clientes cria a oportunidade de atender mais de um cliente em uma única parada do veículo, reduzindo o impacto dos desafios previamente descritos.

Nesse trabalho, são introduzidos dois problemas inéditos na literatura em que os veículos podem viajar com mais de um entregador, de forma que, quando o veículo é estacionado, os entregadores descem e servem os clientes em paralelo, reduzindo o tempo durante o qual os veículos ficam parados ao longo da rota. Esses problemas estão alinhados com uma série de outros estudos na literatura que investigam sistemas multimodais em *last-mile delivery*.

Pureza et al. [2012] abordam um problema em que os veículos podem viajar com mais de um entregador, a fim de reduzir o tempo de serviço nos clientes. Existem também diversos trabalhos que abordam a combinação de *drones* com veículos, de forma a ter uma parte dos clientes atendidos pelos *drones* e outra atendida pelos veículos [Moshref-Javadi e Winkenbach, 2021]. Wehbi et al. [2022] propõem um problema em que veículos encontram entregadores em pontos específicos da cidade, transferem uma parte da carga para os entregadores de forma que os entregadores sirvam uma parte dos clientes enquanto os veículos seguem suas rotas para atender os demais clientes. Até o momento, não se tem conhecimento de nenhum trabalho na literatura que aborde um problema em que os veículos podem viajar com mais de um entregador para que os entregadores sirvam os clientes em paralelo, avaliando as rotas tanto dos veículos quanto dos entregadores.

Diante disso, esse trabalho propõe dois problemas com tal dinâmica em dois níveis. No primeiro, assume-se que é possível saber a priori quais clientes serão visitados em cada parada do veículo e que rotas dos veículos e dos entregadores são definidas de forma a atender todos os clientes. Já no segundo problema, além das mesmas decisões do anterior, consideram-se ainda as escolhas de locais para estacionar e a definição de quais clientes são atendidos por cada parada do veículo, o que o torna ainda mais desafiador.

O restante desse documento se organiza da seguinte forma. A Seção 2 define os problemas a serem abordados, a Seção 3 apresenta a metodologia, a Seção 4 discute os experimentos computacionais realizados e, por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e possibilidades de trabalhos futuros.

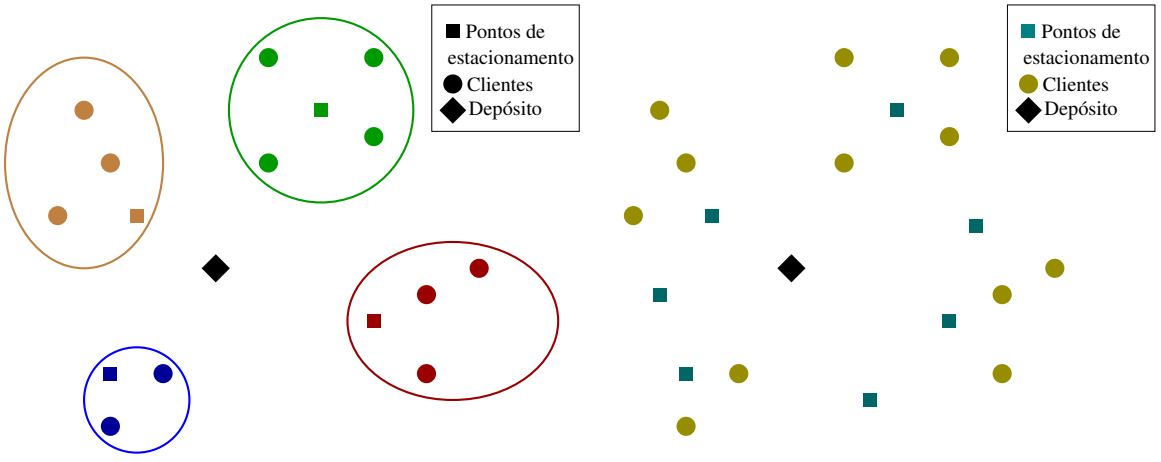
2. Definições dos problemas

O primeiro problema proposto neste trabalho para sistemas multimodais em *last-mile delivery*, chamado de Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo, Múltiplos Entregadores e Roteamento em Dois Níveis (PRVMER2), considera um conjunto de pontos de estacionamento que devem ser obrigatoriamente visitados pelos veículos. A cada ponto de estacionamento, existe pelo menos um cliente associado que deve ser visitado pelos entregadores enquanto o veículo está parado no respectivo ponto de estacionamento. Os clientes estão previamente designados aos pontos de estacionamento, formando *clusters* pré-definidos.

Cada veículo pode viajar com mais de um entregador, mas existem limites para o número de entregadores tanto por veículo quanto para o total da frota. Um dado veículo parte do depósito e viaja até um ponto de estacionamento. Uma vez estacionado o veículo, os entregadores viajando com esse veículo atendem todos os clientes associados a esse ponto de estacionamento e retornam ao veículo, que pode então seguir ao próximo ponto de estacionamento e assim em diante. Cada cliente é visitado por exatamente um entregador e cada ponto de estacionamento por exatamente um veículo. Ademais, são consideradas restrições de capacidade e janelas de tempo.

O segundo problema aqui proposto, intitulado Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo, Múltiplos Entregadores, Roteamento em Dois Níveis e Clusterização (PRVMER2C), tem uma dinâmica de veículos e entregadores que funciona de forma similar, porém os clientes não estão previamente atribuídos a pontos de estacionamento. Em vez disso, existe um conjunto de clientes e um conjunto de potenciais pontos de estacionamento. Deseja-se definir quais pontos de estacionamento serão efetivamente utilizados e a atribuição de clientes a pontos de estacionamento. Uma vez mais, cada cliente é visitado por um único entregador e cada ponto de estacionamento por no máximo um veículo. Nesse problema, porém, nem todo ponto de estacionamento precisa ser utilizado.

A Figura 1 ilustra a diferença entre os dois problemas que acabaram de ser definidos. Nota-se, na Figura 1a, que os clientes já estão previamente designados a pontos de estacionamento, formando *clusters*, enquanto na Figura 1b os clientes não estão designados e os pontos de estacionamento a serem utilizados precisam ser definidos.



(a) PRVMER2 (b) PRVMER2C

Figura 1: Ilustrações de elementos dos dois problemas definidos.

3. Metodologia

São propostas formulações de otimização linear inteira para os dois problemas, a fim de defini-los formalmente e resolvê-los. Também são propostas desigualdades válidas (algumas oriundas da literatura e outras inéditas) para ambas as formulações a fim de melhorar a qualidade de suas relaxações lineares e, assim, obter limitantes inferiores mais fortes.

Outrossim, são propostas decomposições de Benders para os problemas. No PRVMER2, o problema mestre (PM) define as rotas dos veículos e o número de entregadores viajando em cada veículo. Já no subproblema (SP) são definidas as rotas dos entregadores. Os SPs são separáveis com base nas rotas de veículo: definem-se as rotas dos entregadores de todos os *clusters* visitados por um mesmo veículo. No caso do PRVMER2C, a decomposição de Benders é similar, com a diferença de adicionalmente serem consideradas no PM as decisões de quais pontos de estacionamento serão efetivamente utilizados e a atribuição de clientes a pontos de estacionamento.

Além das decomposições, são definidos limitantes inferiores tanto para o tempo em que o veículo fica estacionado em cada *cluster* quanto para o custo das rotas dos entregadores nos *clusters*. No caso do primeiro problema, como os *clusters* estão pré-definidos, os limitantes inferiores são definidos resolvendo dois problemas de otimização linear inteira-mista para cada *cluster*: um

minimizando o custo das rotas e outro minimizando o tempo de permanência. Já no caso do segundo problema, o número de *clusters* factíveis é exponencial, fazendo com que seja impraticável resolver problemas de otimização linear inteira-mista para cada um deles. Dessa forma, definem-se limitantes inferiores analíticos.

O algoritmo desenvolvido baseando-se na decomposição de Benders funciona num esquema *branch-and-Benders-cut* [Moreno et al., 2019], isto é, toda vez que o PM encontra uma solução inteira, resolvem-se os SPs de forma a definir cortes de otimalidade (atualização dos custos das rotas de entregadores nos *clusters* com relação aos limitantes inferiores previamente definidos dado que o *cluster* é visitado por um veículo percorrendo uma dada rota) ou factibilidade (remoção do espaço de rotas factíveis as rotas de veículo que forem infactíveis), que são inseridos por meio de procedimentos do tipo *callback*.

4. Experimentos computacionais

Foram realizados experimentos computacionais com instâncias geradas com base nas instâncias de Solomon [1987] para o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo. Os experimentos foram feitos para os dois problemas considerando as três abordagens propostas: modelo compacto, modelo compacto com desigualdades válidas e *branch-and-Benders-cut*.

Observa-se, dos resultados obtidos, que as formulações dos problemas apresentam limitantes inferiores fracos, que são significativamente melhorados pelas desigualdades válidas. O algoritmo *branch-and-Benders-cut* melhora ainda mais os limitantes inferiores e superiores, levando a melhorias do *gap* de otimalidade.

5. Conclusão

Foram definidos dois problemas inéditos baseados no roteamento de veículos em dois níveis, aplicados a *last-mile delivery*. Formulações, desigualdades válidas e decomposições de Benders foram propostas para ambos os problemas. Os resultados evidenciam a adequação das metodologias propostas ao problema.

6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos números 2022/09679-5, 2022/05803-3, 2021/14441–5 e 2019/23596-2, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Canada Research Chair in Integrated Logistics.

Referências

Moreno, A., Munari, P., e Alem, D. (2019). A branch-and-benders-cut algorithm for the crew scheduling and routing problem in road restoration. *European Journal of Operational Research*, 275(1):16–34. ISSN 0377-2217.

Moshref-Javadi, M. e Winkenbach, M. (2021). Applications and research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review. *Expert Systems with Applications*, 177:114854.

Pureza, V., Morabito, R., e Reimann, M. (2012). Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. *European Journal of Operational Research*, 218 (3):636–647.

Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2):254–265.

Wehbi, L., Bektaş, T., e Çağatay Iris (2022). Optimising vehicle and on-foot porter routing in urban logistics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109:103371.