

MODELO INTEGRADO DE ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES TRIDIMENSIONAIS PARA A LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Renata Tilemann Facó – renata.tilemann@gmail.com
José Arnaldo Barra Montevechi – montevechi@unifei.edu.br

Palavras-chave: Roteirização de veículos; Empacotamento tridimensional; Logística de última milha; E-commerce

1. INTRODUÇÃO

A logística de última milha representa uma das etapas mais desafiadoras e custosas da cadeia de suprimentos, especialmente no contexto do comércio eletrônico. Caracterizada por altos volumes de entregas, rotas fragmentadas e variabilidade nas dimensões dos pacotes, essa fase exige soluções cada vez mais eficientes e adaptadas à realidade urbana (Savelsbergh & Van Woensel, 2016). Apesar dos avanços tecnológicos, as práticas de roteirização de entregas ainda são, em grande parte, realizadas sem considerar as restrições espaciais impostas pela diversidade de volumes transportados (Gendreau et al., 2006; Bortfeldt & Wäscher, 2013).

Embora os problemas de roteirização de veículos (VRP), originalmente formulados por Dantzig e Ramser (1959), e os de empacotamento tridimensional (3D-BPP) tenham sido amplamente estudados em suas respectivas áreas, a integração entre essas duas dimensões ainda é pouco desenvolvida. O avanço dos modelos 3L-VRP, que combinam roteamento e carregamento 3D, evidencia o esforço por soluções mais realistas, especialmente frente aos desafios da logística de última milha. Contribuições como as de Crainic et al. (2008) e Bortfeldt (2012) foram fundamentais nesse campo, mas muitas ainda tratam o carregamento de forma dissociada da roteirização.

Ainda há, entretanto, limitações importantes quanto à aplicabilidade prática desses modelos, especialmente no que se refere à consideração simultânea de

aspectos como sequência de entrega, empilhamento, estabilidade e eficiência logística. Diante disso, o objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo integrado de roteirização e carregamento de veículos para logística de última milha em e-commerce, que considere simultaneamente a dimensão, o volume e a sequência de entrega dos pacotes, permitindo avaliar a eficiência das soluções propostas de forma robusta e mensurável.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

A roteirização de veículos (Vehicle Routing Problem – VRP) é um dos problemas clássicos da pesquisa operacional, amplamente aplicado em sistemas logísticos. Desde sua formulação original por Dantzig e Ramser (1959), o VRP tem sido estendido para contemplar variações como janelas de tempo (VRPTW), entregas fracionadas (SDVRP) e múltiplos depósitos. No entanto, essas variações geralmente consideram apenas a capacidade total dos veículos, desconsiderando o posicionamento tridimensional das cargas.

Já o problema de empacotamento tridimensional (3D-BPP – Three-Dimensional Bin Packing Problem), formulado por Martello e Toth (1990), foca na melhor utilização do espaço cúbico disponível, respeitando restrições como empilhamento, orientação e estabilidade dos volumes. Essa linha de pesquisa tem sido amplamente desenvolvida no contexto industrial, voltada para a eficiência no uso do espaço em cargas de maior escala.

O esforço para integrar essas duas classes de problemas resultou em modelos como o 3L-CVRP (Three-dimensional Loading Capacitated VRP), que otimizam simultaneamente as rotas e o carregamento interno dos veículos. Estudos recentes, como Krebs et al. (2021), Liu et al. (2023) e Luo et al. (2021), vêm avançando nessa integração ao incorporar restrições geométricas complexas, como empilhamento compatível, estabilidade da carga e distribuição de peso entre eixos.

Apesar dos avanços nos modelos integrados de roteirização e empacotamento tridimensional, ainda são escassos os estudos que tratam dessas técnicas com foco explícito no ambiente logístico urbano e na realidade da última milha. A maioria dos

trabalhos permanece voltada a contextos industriais ou de transporte de longa distância, onde os volumes são grandes e as condições operacionais mais estáveis. Há indícios, portanto, de que poucos autores exploram a complexidade de aplicar esses modelos ao e-commerce urbano, o que sugere uma possível lacuna metodológica e prática ainda não suficientemente explorada. Essa percepção será investigada na etapa de revisão sistemática da literatura, com o objetivo de confirmar se há, de fato, um descompasso entre os modelos propostos e os desafios enfrentados na última milha.

2.2 Metodologia

O método proposto para este trabalho será desenvolvido em quatro etapas interdependentes. A primeira consiste na realização de uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar, classificar e analisar criticamente os estudos que integram roteirização de veículos e empacotamento tridimensional. Em seguida, será construída uma modelagem formal do problema, buscando representar simultaneamente o trajeto dos veículos, a organização espacial dos pacotes dentro dos compartimentos de carga, e restrições operacionais como volume, peso, estabilidade, empilhamento e sequência de descarregamento. A formulação buscará representar cenários realistas da logística de última milha no e-commerce.

Na terceira etapa, será desenvolvido e implementado um algoritmo computacional capaz de resolver o problema formulado. A proposta é utilizar abordagens híbridas, que combinem heurísticas de empacotamento tridimensional com metaheurísticas robustas para roteirização, como ALNS, tabu search ou algoritmos genéticos. A implementação será feita em ambiente de programação como Python, com o apoio de bibliotecas de otimização.

Por fim, o modelo será avaliado a partir de instâncias de teste representativas da realidade da última milha, incluindo tanto cenários simulados quanto, se possível, dados obtidos de operadores logísticos. As soluções serão avaliadas com base em métricas como taxa de ocupação volumétrica dos veículos, custo total das rotas, número de pacotes reatribuídos por incompatibilidade de carga, cumprimento da sequência de entrega e aderência a restrições temporais. A comparação com

abordagens tradicionais permitirá identificar os ganhos obtidos com a proposta e suas possibilidades de aplicação prática.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Como primeiro resultado, espera-se a consolidação de um panorama crítico da literatura científica sobre o problema de roteirização de veículos com restrições tridimensionais. Essa etapa deverá evidenciar lacunas ainda existentes, como a baixa aderência dos modelos às especificidades da logística de última milha no e-commerce, a ausência de métricas operacionais robustas e a subexploração de restrições práticas como sequência de descarregamento e incompatibilidade volumétrica.

A partir desse diagnóstico, o projeto deverá entregar um modelo computacional inovador que integre roteirização e carregamento tridimensional em um único framework, com formulação aderente às condições reais de operação em centros urbanos. Espera-se também o desenvolvimento de um algoritmo de resolução eficiente, que combine técnicas de otimização e empacotamento para lidar com múltiplas restrições de forma simultânea.

Por fim, a aplicação do modelo a instâncias representativas da operação de última milha deverá produzir soluções otimizadas e mensuráveis segundo critérios como aproveitamento de carga, distância percorrida, reatribuições de pacotes, tempo de entrega e cumprimento de sequências. Esses resultados poderão ser comparados com abordagens tradicionais, permitindo verificar os ganhos da proposta tanto do ponto de vista operacional quanto metodológico. Também se espera que a pesquisa contribua com a criação de bases de dados ou benchmarks que possam apoiar novos estudos na área.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências reunidas até aqui apontam que, embora exista um corpo consistente de estudos voltados à integração entre roteirização de veículos e carregamento tridimensional, boa parte dessas contribuições ainda está concentrada em contextos industriais ou logísticos de larga escala, com foco em eficiência

volumétrica e otimização matemática. A aplicação prática desses modelos ao ambiente urbano da última milha, especialmente no e-commerce, permanece limitada. Poucos trabalhos incorporam variáveis essenciais como sequência de entrega, estabilidade de carga e adaptabilidade a frotas leves, comuns nesse tipo de operação. A ausência de métricas operacionais robustas e de dados reais urbanos no processo de validação reforça a existência de uma lacuna teórica e prática a ser explorada.

Diante desse cenário, a proposta desta pesquisa busca responder a essa lacuna por meio do desenvolvimento de um modelo integrado e realista que una roteirização e carregamento tridimensional, adaptado às exigências da logística de última milha no comércio eletrônico. Ao articular rigor técnico, complexidade geométrica e aplicabilidade operacional, espera-se que os resultados obtidos contribuam tanto para o avanço científico na área quanto para a formulação de soluções mais eficientes e sustentáveis no campo da logística urbana. Além disso, a criação de instâncias de teste e benchmarks específicos poderá fomentar novas investigações, promovendo uma aproximação maior entre teoria e prática.

REFERÊNCIAS

BORTFELDT, A. A hybrid algorithm for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 225, n. 3, p. 452-464, 2013.

BORTFELDT, A.; WÄSCHER, G. Constraints in container loading – A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, v. 229, n. 1, p. 1-20, 2013.

CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; HERZ, P. A hybrid evolutionary algorithm for the 3D loading capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 9, p. 3008-3024, 2008.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.-Y. Metaheuristics for the Capacitated VRP. In: TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM, 2006.

KREBS, C.; EHMKE, J. F.; KOCH, H. Advanced loading constraints for 3D vehicle routing problems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v. 33, p. 277-307, 2021.

LIU, Y.; YUE, Z.; WANG, Y.; WANG, H. Logistics Distribution Vehicle Routing Problem with Time Window under Pallet 3D Loading Constraint. *Sustainability*, v. 15, n. 4, p. 3594, 2023.

LUO, Z.; LI, C.; WU, J.; HUANG, W. A 3D loading vehicle routing problem and its solution based on improved adaptive large neighborhood search. *Computers & Industrial Engineering*, v. 156, 107252, 2021.

MARTELLO, S.; TOTH, P. *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.

SAVELSBREGH, M.; VAN WOENSEL, T. City logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, v. 50, n. 2, p. 579-590, 2016.

TOTH, P.; VIGO, D. *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM, 2002.