57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Revisão da Literatura: Roteamento de Arcos na Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

Ana Clara S. Andrade, Pedro H. D. B. Hokama, Carlos H. da Silveira, Adler Diniz de Souza
Universidade Federal de Itajubá
Av. B P S, 1303 – Pinheirinho, Itajubá – MG
anaclarans@unifei.edu.br, hokama@unifei.edu.br,
carlos.silveira@unifei.edu.br, adlerdiniz@unifei.edu.br

Mário César San Felice
Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luís, s/n – Monjolinho, São Carlos – SP, 13565-905
felice@ufscar.br

RESUMO

A coleta de resíduos é um processo logístico essencial para o funcionamento das cidades. Entre as abordagens de otimização aplicadas a esse contexto, destaca-se o Problema de Roteamento de Arcos Capacitados (CARP), capaz de incorporar restrições práticas como janelas de tempo e instalações intermediárias. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática de publicações entre 2010 e 2025, com o objetivo de identificar métodos de solução, restrições adotadas e desafios relatados. Foram analisados 15 trabalhos, sendo 13 artigos de periódicos e 2 artigos de conferências, com predominância de heurísticas e metaheurísticas utilizadas para resolver instâncias de grande porte em tempos viáveis. As restrições mais frequentes foram janelas de tempo, instalações intermediárias e frações de resíduos. Os resultados evidenciam a flexibilidade do CARP em representar cenários urbanos complexos e indicam tendências de pesquisa voltadas a conciliar realismo operacional e eficiência computacional.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de arcos, Coleta de resíduos, Restrições práticas.

Tópicos (Logística e Transportes, Otimização Discreta)

ABSTRACT

Waste collection is a key logistic process for the functioning of cities. Among the optimization approaches applied to this context, the Capacitated Arc Routing Problem (CARP) stands out, as it can incorporate practical constraints such as time windows and intermediate facilities. This paper presents a systematic review of publications from 2010 to 2025, aiming to identify solution methods, adopted constraints, and reported challenges. A total of 15 studies were analyzed, comprising 13 journal articles and 2 conference papers, with a predominance of heuristics and metaheuristics used to solve large-scale instances within feasible times. The most frequent constraints were time windows, intermediate facilities, and waste fractions. The results highlight the flexibility of CARP in representing complex urban scenarios and indicate research trends towards reconciling operational realism with computational efficiency.

KEYWORDS. Arc routing. Waste collection. Practical constraints.

Paper topics (Logistics and Transport, Discrete Optimization)

https://proceedings.science/p/212228?lang=pt-br

1. Introdução

A gestão adequada de resíduos sólidos é um serviço fundamental e essencial na sociedade moderna, possuindo grande importância para a saúde pública, segurança e qualidade ambiental [Kaza et al., 2018]. Diante da complexidade logística envolvida, diversas estratégias baseadas em problemas de otimização combinatória têm sido propostas para planejar rotas eficientes de coleta. Entre eles, o Problema do Roteamento de Arcos Capacitados (CARP) destaca-se por modelar operações em que o serviço ocorre ao longo das vias, representando de forma realista a coleta porta a porta.

O CARP permite incorporar restrições práticas como capacidade limitada dos veículos, janelas de tempo, balanceamento de carga e pontos intermediários de descarte, refletindo os desafios encontrados em cenários urbanos. Considerando sua aderência às condições reais de operação, compreender como diferentes estudos abordam suas variações e métodos de solução é fundamental para apoiar aplicações mais eficazes na coleta de resíduos.

Este trabalho tem como objetivo mapear e analisar as abordagens propostas na literatura para a resolução do CARP aplicado à coleta de resíduos sólidos urbanos. A análise busca identificar as variações do problema consideradas, os métodos de resolução empregados, as restrições práticas envolvidas, os desafios de implementação reportados e as tendências metodológicas observadas. Para alcançar esse objetivo, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura.

2. Metodologia

As buscas foram realizadas nas bases *IEEE Xplore*, *ScienceDirect* e *Scopus*, utilizando-se operadores booleanos para combinar diferentes termos relacionados ao Problema de Roteamento de Arcos (**ARP**) e ao **contexto da coleta de resíduos sólidos**. Optou-se por restringir a busca ao contexto da coleta de resíduos sólidos por ser tratar de uma aplicação prática do ARP, com presença recorrente na literatura e relevância em cenários reais de planejamento urbano. A string de busca utilizada foi: *(“arc routing problem” OR “arc-routing problem” OR “arc routing” OR “arc-routing” OR “route inspection problem” OR “route inspection” OR “Chinese postman problem” OR “Chinese postman”) AND (“waste collection” OR “garbage collection” OR “solid waste collection” OR “residential waste collection” OR “household waste” OR “household collection”).*

Foram incluídos estudos que abordam o CARP ou suas variações no contexto de coleta de resíduos urbanos, apresentam algoritmos de otimização e utilizam *benchmarks* ou suas adaptações. Foram excluídos trabalhos fora do escopo temático, sem proposta metodológica original ou indisponíveis integralmente.

Após remoção de duplicados e aplicação dos critérios, 15 artigos publicados entre 2010 e 2025 foram selecionados para análise, abrangendo periódicos e anais de conferências. As informações extraídas incluíram: objetivo(s) de otimização, tipo de algoritmo, restrições, instâncias de teste, principais contribuições, ferramentas utilizadas e limitações relatadas.

3. Resultados e Discussão

A análise dos artigos selecionados revelou ampla diversidade de variações do CARP aplicadas à coleta de resíduos urbanos (Tabela 1), incluindo: demandas estocásticas (consideram incerteza na quantidade de resíduos), frações de resíduos (separação por tipo de material), janelas de tempo (restrições temporais de atendimento), setorização (divisão da área de coleta em setores), multicompartimento (veículos com compartimentos separados para diferentes tipos de resíduos), periodização (distribuição da coleta ao longo de múltiplos períodos), balanceamento (distribuição equilibrada da carga de trabalho) e instalações intermediárias (pontos de apoio para descarregamento ao longo das rotas).

Quanto aos métodos de solução, observou-se predominância de heurísticas construtivas e de busca local, pela capacidade de gerar soluções viáveis rapidamente em instâncias de grande porte.

Metaheurísticas, como *Adaptive Large Neighbourhood Search* (ALNS) e algoritmos meméticos, foram aplicadas para melhorar soluções iniciais. Métodos exatos, embora garantam otimalidade, mostraram-se restritos a instâncias menores. Matheurísticas se destacaram pelo equilíbrio entre qualidade e escalabilidade, apesar de maior custo computacional.

Em relação ao porte das instâncias, métodos exatos puros alcançam até cerca de 200 arcos, enquanto abordagens híbridas, que combinam heurísticas para gerar soluções iniciais com métodos exatos para refinamento, chegam a aproximadamente 3.000 arcos. Metaheurísticas lidam eficientemente com instâncias de poucas dezenas até cerca de 375 arcos. Heurísticas puras resolvem problemas muito grandes, superiores a 12.000 arcos, em tempos reduzidos, e matheurísticas tratam instâncias intermediárias a grandes, incluindo casos acima de 7.000 arcos, entregando soluções de alta qualidade, embora com custo computacional maior.

Entre os desafios relatados estão o aumento da complexidade ao incorporar múltiplas restrições práticas, a sensibilidade a parâmetros, e a dificuldade de equilibrar qualidade da solução e tempo de execução.

Referência	**Problema**	Demanda estocástica	Frações de resíduos	Janela de tempo	Setorização	Multicompartimento	Periodização	Balanceamento	Instalações intermediárias	**Técnica principal**
Wøhlk e Laporte [2019]	C-CARP		X				X	X		Heurística construtiva simples
Wøhlk e Laporte [2018]	CARP									FastCARP
Mei et al. [2011]	PCARP						X			Algoritmo Memético
Mofid-Nakhaee e Barzinpour [2019]	MCCARPIF		X			X			X	ALNS + Whale Optimization
Wei et al. [2024]	MLCARPIF								X	PIM, E-ALNS e Shake
Laporte et al. [2010]	CARPSD	X								ALNS
Liu et al. [2014]	WCVARPTC			X						MULTI-ACS + busca local
Ciancio et al. [2018]	MCGRPTW			X						Branch-Price-and-Cut
Willemse e Joubert [2016a]	MCARPTIF			X					X	Heurísticas construtivas
Willemse e Joubert [2019]	MCARPTIF			X					X	Operadores adaptados + aceleração da busca local
Cortinhal et al. [2016]	SARP				X			X		Busca local + heurística construtiva
Ramamoorthy e Syrotiuk [2020]	CARP									PROBE (dinâmico)
Jin et al. [2020]	ARPTPC			X						PIM e heurística com vizinhança
Willemse e Joubert [2016b]	MCARPTIF			X					X	Procedimentos de divisão
Zbib e Laporte [2020]	CSMC-CARP		X			X				Mateheurística em 3 fases

Tabela 1: Resumo das variações do CARP nos artigos selecionados

4. Conclusão

Esta revisão sistemática analisou o CARP e suas variações na coleta de resíduos urbanos, considerando métodos de solução, restrições e desafios. Dentre os métodos, observou-se a predominância de heurísticas e metaheurísticas para lidar com instâncias de grande porte. Nas restrições mais frequentes tem destaque janelas de tempo, instalações intermediárias e frações de resíduos. De forma geral, o CARP se mostra flexível e capaz de representar cenários urbanos complexos, e as soluções analisadas conciliam realismo operacional e eficiência computacional.

Referências

Ciancio, C., Laganá, D., e Vocaturo, F. (2018). Branch-price-and-cut for the mixed capacitated general routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 267 (1):187–199.

Cortinhal, M. J., Mourão, M. C., e Nunes, A. C. (2016). Local search heuristics for sectoring routing in a household waste collection context. *European Journal of Operational Research*, 255 (1):68–79.

Jin, X., Qin, H., Zhang, Z., Zhou, M., e Wang, J. (2020). Planning of garbage collection service: An arc-routing problem with time-dependent penalty cost. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(5):2692–2705.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., e Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.

Laporte, G., Musmanno, R., e Vocaturo, F. (2010). An adaptive large neighbourhood search heuristic for the capacitated arc-routing problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 44 (1):125–135.

Liu, J., He, Y., e Zhang, A. (2014). An improved multi-acs algorithm for the waste collection vehicle arc routing problem with turn constraints. In *2014 Tenth International Conference on Computational Intelligence and Security*, p. 25–29. IEEE.

Mei, Y., Tang, K., e Yao, X. (2011). A memetic algorithm for periodic capacitated arc routing problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41(6): 1654–1667.

Mofid-Nakhaee, E. e Barzinpour, F. (2019). A multi-compartment capacitated arc routing problem with intermediate facilities for solid waste collection using hybrid adaptive large neighborhood search and whale algorithm. *Waste Management & Research*, 37(1):38–47.

Ramamoorthy, M. e Syrotiuk, V. R. (2020). Online re-routing for vehicle breakdown in residential waste collection. In *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, p. 1–5. IEEE.

Wei, C., Wøhlk, S., e Che, A. (2024). A multi-level capacitated arc routing problem with intermediate facilities in waste collection. *Computers & Operations Research*, 167:106671.

Willemse, E. J. e Joubert, J. W. (2016a). Constructive heuristics for the mixed capacity arc routing problem under time restrictions with intermediate facilities. *Computers & Operations Research*, 68:30–62.

Willemse, E. J. e Joubert, J. W. (2016b). Splitting procedures for the mixed capacitated arc routing problem under time restrictions with intermediate facilities. *Operations Research Letters*, 44(5): 569–574.

Willemse, E. J. e Joubert, J. W. (2019). Efficient local search strategies for the mixed capacitated arc routing problems under time restrictions with intermediate facilities. *Computers & Operations Research*, 105:203–225.

Wøhlk, S. e Laporte, G. (2018). A fast heuristic for large-scale capacitated arc routing problems. *Journal of the Operational Research Society*, 69(12):1877–1887.

Wøhlk, S. e Laporte, G. (2019). A districting-based heuristic for the coordinated capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 111:271–284.

Zbib, H. e Laporte, G. (2020). The commodity-split multi-compartment capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 122:104994.

https://proceedings.science/p/212228?lang=pt-br