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

Meta-heurística Híbrida para o Problema de Roteamento Sustentável de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas

Jeverson Ricardo Nery Silva dos Santos, Sérgio Ricardo de Souza
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira - Belo Horizonte - MG — Brasil
neryjeverson@gmail.com, sergio@cefetmg.br

Maria Amélia Lopes Silva, Jardell Fillipe da Silva
Universidade Federal de Viçosa
Rodovia LMG 818, km 06, s/n, Campus Universitário, Florestal - MG, 35690-000 — Brasil
mamelia@ufv.br, jardell.silva@ufv.br

RESUMO

Este trabalho estuda o Problema de Roteamento Sustentável de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (G-VRPSPD). O foco desse problema é otimizar operações logísticas com foco na sustentabilidade ambiental, com a redução no consumo de combustível e de emissões de CO_2. A solução proposta utiliza uma implementação da meta-heurística *General Variable Neighbourhood Search*, tendo, para geração de solução inicial, o uso das heurísticas construtivas Vizinho Mais Próximo adaptado e Algoritmo *Sweep*. Os experimentos mostraram que as abordagens propostas reduzem o consumo de combustível e as emissões de CO_2, comprovando sua eficácia e robustez, levando a soluções que são comparáveis com as existentes na literatura de referência.

PALAVRAS CHAVE. Problema de Roteamento Sustentável de Veículos com Coleta e Entrega Simultânea, Meta-heurísticas, Logística Sustentável, Emissões de CO_2.

Tópicos: MH- Meta-heurística, OC- Otimização Combinatória

ABSTRACT

This work studies the Green Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (G-VRPSPD). The focus of this problem is to optimize logistics operations with a focus on environmental sustainability, reducing fuel consumption, and CO2 emissions. The proposed solution uses an implementation of the General Variable Neighborhood Search metaheuristic, using the adapted Nearest Neighbor constructive heuristic and the Sweep algorithm for initial solution generation. Experiments have shown that the proposed approaches reduce fuel consumption and CO2 emissions, demonstrating their effectiveness and robustness, leading to solutions that are comparable to those found in the literature.

PALAVRAS CHAVE. Green Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, Metaheuristics, Green Logistics, CO_2 Emissions.

Paper topics: MH- Metaheuristics, OC- Combinatorial Optimization

https://proceedings.science/p/212106?lang=pt-br

1. Introdução

Os impactos ambientais do setor de transportes são significativos, especialmente em relação à emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis. Dados recentes indicam que a frota de veículos em certas regiões emite dezenas de milhões de toneladas de CO_2 anualmente. O presente trabalho aborda solução, via meta-heurísticas, do *Problema de Roteamento Sustentável de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (G-VRPSPD)*). Esse problema visa estabelecer rotas que minimizem o consumo de combustível e as emissões associadas, atendendo simultaneamente demandas de coleta e entrega dos clientes. A motivação do estudo está alinhada ao aumento da relevância da logística sustentável, a fim de desenvolver soluções computacionais eficazes para desafios ambientais na cadeia de suprimentos.

2. Descrição do Problema

O G-VRPSPD consiste na definição de rotas para uma frota homogênea de veículos, que partem de um depósito para atender clientes com demandas simultâneas de entrega e coleta. O objetivo do problema é minimizar o consumo de combustível. Conforme Xiao et al. [2012], a relação entre o consumo de combustível e o peso do veículo é inversamente proporcional à distância por unidade de combustível (isto é, com mais peso, o veículo percorre uma menor distância por litro de combustível). A função objetivo adotada neste trabalho é:

$$\min Z = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} c_0 \cdot c_{ij} \left(p_0 x_{ij} + \alpha (U_{ij} + V_{ij}) \right) \tag{1}$$

Essa função foi inicialmente proposta por Olgun et al. [2021], tendo como parcelas o custo unitário (c_0); o custo de deslocamento entre os pontos (c_{ij}); o coeficiente referente ao peso do veículo vazio (p_0); o coeficiente associado ao peso do veículo totalmente carregado (α); as demandas de entrega (V_{ij}) e de coleta (U_{ij}); além da variável binária de decisão x_{ij}, que indica a utilização ou não do arco (i, j) na composição da rota.

Além das restrições de capacidade, o problema impõe atendimento único a cada cliente, limite no número de veículos e equilíbrio entre entrega e coleta. Os veículos partem do depósito apenas com carga de entrega, realizando coletas ao longo da rota, assegurando o equilíbrio do fluxo e a correta definição das variáveis de decisão para garantir a viabilidade das soluções. O custo referente à emissão de CO_2 é estimado considerando a expressão proposta por Huang et al. [2012], que estabelece a relação entre emissão de CO_2 e consumo de combustível na forma $\frac{\text{kg CO}_2}{\text{litro}}$, sendo $CO_2 = 2,68$ por litro de combustível consumido (Diesel).

3. Revisão Bibliográfica

Estudos recentes propõem modelos e heurísticas para variantes sustentáveis do problema de roteamento de veículos, com foco na redução do consumo de combustível e das emissões [Moghdani et al., 2021]. No entanto, há poucas publicações específicas sobre o G-VRPSPD. Dentre elas, destacam-se os trabalhos de Huang et al. [2012], que propuseram um modelo baseado em fluxo de mercadorias, integrando custos econômicos e ambientais; e Olgun et al. [2021], que desenvolveram um modelo voltado à minimização do consumo de combustível, resolvido por um algoritmo hiper-heurístico baseado na meta-heurística *Iterated Local Search* (HH-ILS), com bons resultados experimentais.

4. Metodologia

A proposta metodológica integra dois algoritmos construtivos principais: **Algoritmo do Vizinho Mais Próximo adaptado**: avalia os clientes com base em um score (peso) que pondera distância e carga, buscando um balanceamento eficiente entre coleta e entrega; e o **Algoritmo de**

Tabela 1: Comparativo de Heurísticas

Problema	$\|N_c\|$	$\|M\|$	**Sweep-Algorithm**		**Algoritmo Melhor Escore**			**%Dev**
			fo	**ts**	**fo**	**ts**	**Fator (λ, μ)**	
CMT1X	50	5	1172.52	0.02	1081.67	0.01	0.2, 1.0	-7,75
CMT3X	100	8	2296.97	0.17	2062.28	0.03	0.1, 1.0	-10,22
CMT4X	150	12	3285.12	0.07	2432.82	0.04	0.1, 1.0	-25,94
CMT5X	199	17	4030.93	0.25	3464.02	0.06	0.0, 1.0	-14,06

Varredura: que ordena os clientes pelo ângulo polar em relação ao depósito, agrupando aqueles geograficamente próximos.

Após a aplicação das heurísticas construtivas, as soluções são refinadas por meio do procedimento **Variable Neighborhood Descent (VND)**, que explora diferentes estruturas de vizinhança presentes no *framework* multiagente (AMAM) [Silva et al., 2019], promovendo melhorias locais nas soluções; e o **General Variable Neighborhood Search (GVNS)**, que aplica perturbações controladas sobre as vizinhanças para escapar de ótimos locais. Porém, nesta fase, há uma mescla entre estruturas presentes em outros trabalhos que abordam variantes além do G-VRPSPD. Por fim, os resultados são submetidos ao cálculo para estimativa das emissões e CO_2 e comparados com os resultados obtidos pela hiper-heurística HH-ILS [Olgun et al., 2021].

5. Experimentos Computacionais e Resultados

As implementações foram realizadas em linguagem `C++` e executadas em um processador Intel® Core™ i3-3240 (3,40 GHz), 4 GB de RAM, usando o compilador GCC 12.2.0 (Debian). As instâncias de teste, adaptadas da CVRPLIB, seguiram a metodologia de Olgun et al. [2021]. Foram realizadas 15 execuções por instância. As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos pelas heurísticas construtivas e pela meta-heurística, respectivamente.

As Figuras 1 e 2 mostram o consumo de combustível e as emissões de CO_2 em função da carga. Em ambos os casos, os gráficos da esquerda representam as soluções iniciais (heurísticas) e os da direita as soluções finais após a aplicação da meta-heurística GVNS. Observa-se que a meta-heurística GVNS encontra soluções tendo reduções médias de aproximadamente 30% no consumo de combustível e nas emissões em relação às soluções iniciais.

Tabela 2: Comparativo de Meta-heurísticas

Problema	$\|N_c\|$	$\|M\|$	**HH-ILS**		**VND-VNS (Best Score)**			**VNS-VNS (Sweep)**		
			fo	**ts**	**fo**	**ts**	**%Dev**	**fo**	**ts**	**%Dev**
CMT1X	50	5	745.10	2.20	767.94	86.43	3.06	751.43	17.05	0.85
CMT3X	100	8	1177.70	23.20	1174.64	137.90	-0.26	1175.43	121.30*	-0.19
CMT4X	150	12	1446.85	162.20	1473.59	5359.78	1.85	1467.34	6728.97	1.42
CMT5X	199	17	1803.86	229.60	1862.68	15722.33	3.26	1854.56	14644.67	2.81

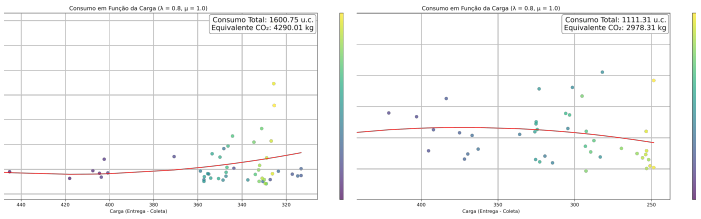


Figura 1: Consumos e Emissões Iniciais e Finais ($\lambda = 0{,}8$, $\mu = 1{,}0$)

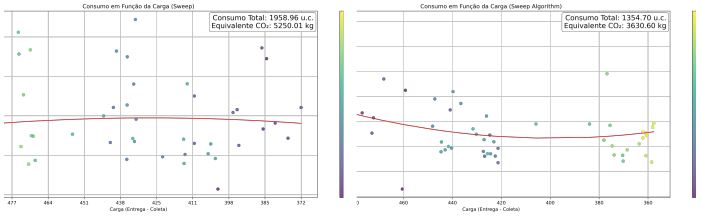


Figura 2: Consumo e Emissões Inicias e Finais (*Sweep Algorithm*)

6. Conclusão

Conclui-se que, embora o trabalho ainda não apresente contribuições diretas ao estado da arte relacionado ao problema e dependa da realização de simulações adicionais para todos os cenários viabilizados pelas heurísticas e meta-heurística implementadas, os resultados preliminares são promissores. Os resultados encontrados mostram reduções significativas (aproximadamente 30%) no consumo, e, proporcionalmente, nas emissões de CO_2.

Agradecimentos

Jeverson Ricardo Nery Silva dos Santos agradece ao Grupo Carrefour pela concessão da Bolsa de Estudos em nível de mestrado e pelo apoio por meio do programa de Permanência. Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, ao CEFET-MG e à Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal, pela oportunidade, pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

Referências

Huang, Y., Shi, C., Zhao, L., e Van Woensel, T. (2012). A study on carbon reduction in the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries. In *2012 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, p. 302–307. IEEE.

Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E., e Benyettou, A. (2021). The green vehicle routing problem: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 279:123691. URL `https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691`.

Olgun, B., Koç, c., e Altıparmak, F. (2021). A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 153:107010.

Silva, M. A. L., de Souza, S. R., Souza, M. J. F., e Bazzan, A. L. C. (2019). A reinforcement learning-based multi-agent framework applied for solving routing and scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 131:148–171.

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., e Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(7): 1419–1431.