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

METAHEURÍSTICA HÍBRIDA PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM TECNOLOGIA V2G

Jimenez, L.F.R.[1], **Santos, C.**[1], **Oliveira, W. A.**[2], **Lyra Filho, C.**[1]
[1]Faculdade de Engenharia Elétrica-UNICAMP
[2]Faculdade de Ciências Aplicadas-UNICAMP
[1]Av. Albert Einstein 400, Campinas-SP
[2]Rua Pedro Zaccaria 1300, Limeira-SP
l229779@dac.unicamp.br, c209430@dac.unicamp.br,
waoliv@unicamp.br, chrlyra@unicamp.br

RESUMO

A integração da tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) em operações logísticas com veículos elétricos amplia as possibilidades de gestão eficiente de energia, permitindo a troca bidirecional de energia com a rede. No entanto, explorar esse potencial exige estratégias de roteamento que considerem simultaneamente restrições operacionais e decisões relacionadas ao aproveitamento adequado da energia. Este trabalho apresenta uma metaheurística híbrida construtiva para resolver o problema de roteamento de veículos elétricos com V2G. O método proposto envolve a construção iterativa de rotas por meio da resolução de subproblemas de programação linear inteira mista e verificação de atendimento dos clientes. Além disso, inclui uma fase de refinamento que aplica busca tabu e reestruturação exata. O modelo matemático utilizado está integrado em um submódulo dentro da metaheurística. Os resultados computacionais, baseados em instâncias da literatura, demonstram que a abordagem é capaz de gerar soluções factíveis e eficientes do ponto de vista do consumo de energia. A metaheurística se mostrou escalável para instâncias dimensionalmente grandes e eficaz na exploração das oportunidades econômicas derivadas da venda de energia em horários de pico.

PALAVRAS CHAVE. Problema de roteamento, veículos elétricos, Vehicle-to-Grid.
L&T – Logística e Transportes, MH – Metaheurísticas

ABSTRACT

The integration of Vehicle-to-Grid (V2G) technology into logistics operations with electric vehicles expands the possibilities for efficient energy management by enabling bidirectional energy exchange with the grid. However, exploiting this potential requires routing strategies that simultaneously consider operational constraints and decisions related to the proper utilization of energy. This paper presents a hybrid constructive metaheuristic to solve the Electric Vehicle Routing Problem with V2G (EVRP-V2G). The proposed method involves the iterative construction of routes through the resolution of mixed-integer linear programming subproblems and client service verification. Additionally, it includes a refinement phase that applies tabu search and exact restructuring. The mathematical model used is integrated as a submodule within the metaheuristic. Computational results, based on instances from the literature, demonstrate that the approach is capable of generating feasible and energy-efficient solutions. The metaheuristic proved scalable for large-dimensional instances and effective in exploiting the economic opportunities derived from energy sales during peak periods.

KEYWORDS. Routing problems. Electric vehicles. Vehicle-to-Grid.
L&T – Logistics and Transport, MH – Metaheuristics

https://proceedings.science/p/212465?lang=pt-br

1. Introdução

A adoção de veículos elétricos (VEs) como alternativa sustentável no transporte de mercadorias tem impulsionado avanços no planejamento logístico, especialmente no que se refere à roteirização e à gestão energética. No contexto do problema de roteamento de veículos (PRV), torna-se essencial adaptar os modelos às limitações dos VEs, como autonomia restrita, tempos elevados de recarga e número limitado de estações Zhang et al. [2019]; Pelletier et al. [2019]. Para enfrentar esses desafios, diversas abordagens têm sido propostas, incorporando recargas parciais Zhang et al. [2019], restrições de capacidade nas estações Froger et al. [2022], janelas de tempo Roberti e Wen [2016] e, mais recentemente, estratégias de venda de energia por meio da tecnologia V2G Lin et al. [2021].

A Figura 1 ilustra um exemplo típico do PRVE. A rede é composta por 10 clientes (C_i), duas estações de recarga (E_i) e um depósito (D). Os veículos partem do depósito com a bateria carregada e devem visitar os clientes respeitando restrições de energia e tempo. A recarga só é possível nas estações, e a descarga (venda de energia) é realizada quando vantajosa, com base no preço da energia. Esse tipo de problema evidencia a complexidade envolvida na tomada de decisão conjunta de roteamento e gestão energética.

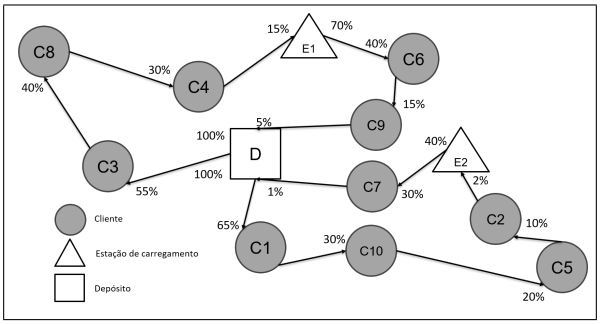


Figura 1: Exemplo ilustrativo de um exemplar do PRVE com três estações de recarga. Fonte: adaptado de Kucukoglu et al. [2021]

Este trabalho propõe uma abordagem híbrida para o PRVE com V2G, considerando restrições operacionais como capacidade dos veículos, janelas de tempo, variação de preços de energia e estratégias flexíveis de recarga e descarga. Para resolver o problema, foi utilizada uma metaheurística híbrida baseada em uma fase construtiva com subproblemas MILP e procedimentos de busca local. A abordagem foi testada em um conjunto representativo de exemplares, divididos em tamanhos pequenos e grandes, com base na quantidade de clientes e estações de carregamento. Os resultados para exemplares pequenos foram comparados com um modelo exato. Já os exemplares grandes, inviáveis para métodos exatos, foram resolvidas exclusivamente pela metaheurística, demonstrando sua escalabilidade e eficiência.

2. Metaheurística Híbrida Proposta

A metaheurística proposta para resolver o PRVE-V2G é estruturada em quatro fases principais: inicialização, construção de rotas, verificação do atendimento e otimização. Cada fase emprega tanto componentes heurísticos quanto subproblemas exatos resolvidos por meio de um MILP, o qual foi detalhado em Jimenez et al. [2023]. A seguir é detalhada cada fase do método proposto.

2.1. Fase de Inicialização

Nesta etapa, o algoritmo prepara os dados para as fases seguintes. Primeiramente, calcula-se uma matriz de viabilidade entre pares de nós considerando restrições de janelas de tempo, capacidade e energia. A matriz identifica quais pares de clientes ou estações podem ser visitados consecutivamente sem violar as restrições do problema.

Além disso, define-se uma versão relaxada do modelo MILP onde a restrição de designação de clientes é modificada de uma igualdade ($x_i = 1$) para uma desigualdade ($x_i \leq 1$), permitindo que o modelo construa soluções parciais. Também, é incorporado na função objetivo uma parcela ponderada adicional para aumentar a chance de incluir novos clientes ainda não atendidos. O peso dessa parcela na função objetivo é denominado *recompensa*. Essa estrutura permite que subproblemas do problema favoreçam soluções que cobrem clientes pendentes, mesmo que não sejam globalmente ótimas.

2.2. Fase de Construção de Rotas

A construção inicial das rotas é feita de forma iterativa. Em cada iteração: i) um subconjunto reduzido de clientes ainda não atendidos é selecionado com base em um critério probabilístico que leva em conta a distância euclidiana ao depósito e um parâmetro de aleatoriedade α, que determina o grau de exploração versus intensificação; ii) para cada subconjunto de clientes, define-se um subproblema incluindo os clientes selecionados, o depósito de origem e destino, e um subconjunto de estações de recarga próximas, selecionadas com base na distância média aos clientes escolhidos; iii) essa subproblema é resolvida com o modelo MILP relaxado. Caso uma solução viável seja encontrada, os clientes atendidos são marcados como atendidos e a rota correspondente é adicionada à solução corrente. Caso contrário, um novo subconjunto de clientes é gerado e o processo se repete. Esse processo continua até que nenhum subconjunto gere uma rota viável ou até que todos os clientes tenham sido incluídos.

2.3. Fase de Verificação de Atendimento

Ao final da fase de construção, pode haver clientes que não foram atendidos. Para garantir viabilidade, inicia-se a fase de verificação, que consiste em tentar cobrir os clientes restantes por meio da recombinação de rotas existentes que se realiza da seguinte maneira: i) selecionam-se duas rotas da solução corrente e combinam-se com um subconjunto dos clientes não atendidos; ii) cria-se um novo subproblema contendo os clientes combinados e estações de recarga próximas, semelhante à construção inicial; iii) o subproblema é resolvida via MILP com a estrutura relaxada e função de recompensa; iv) se uma nova rota viável for obtida, ela substitui as rotas originais e os clientes atendidos são atualizados.

Um mecanismo do algoritmo Busca Tabu é empregado para evitar recombinações repetitivas que não resultem em melhoria. A memória tabu armazena pares de rotas já tentados e não frutíferos. Essa fase se encerra quando todos os clientes forem atendidos. Neste ponto, a recompensa é removida da função objetivo e a restrição de designação é restaurada como igualdade. A solução resultante é factível e completa.

2.4. Fase de Otimização

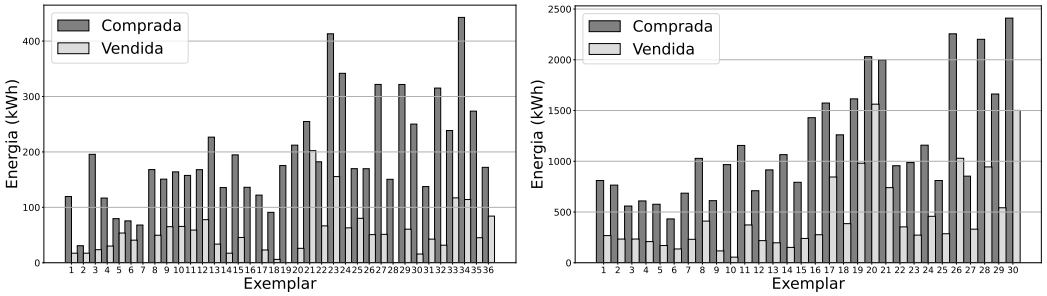
A última etapa busca melhorar a qualidade da solução inicial. Ela opera iterativamente da seguinte forma: i) duas rotas são selecionadas aleatoriamente; ii) aplica-se a heurística 2-opt em cada uma das rotas para reduzir a distância percorrida; iii) se não houver melhoria, os clientes das duas rotas são combinados em um novo subproblema e o modelo MILP é novamente utilizado, desta vez com designação estrita e sem recompensa; iv) se a nova rota apresentar menor custo, ela substitui as duas originais. A otimização prossegue até que não haja melhoria após um número máximo de iterações.

3. Resultados Computacionais

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela aplicação da metaheurística híbrida proposta a um conjunto de exemplares benchmark do EVRP-V2G. O objetivo é avaliar a qualidade, escalabilidade e comportamento energético da abordagem em diferentes cenários. Foram resolvidos 36 exemplares de pequeno porte (com até 15 clientes) e 30 exemplares de grande porte (com 100 clientes e 20 estações).

https://proceedings.science/p/212465?lang=pt-br

A Figura 2 apresenta a energia comprada (em preto) e vendida (em cinza) para os 36 exemplares de pequeno porte e de grande escala.



(a) Exemplares pequenos (b) Exemplares grandes

Figura 2: Energia comprada (preto) e vendida (cinza) nas melhores soluções.

Observa-se uma ampla variação nos volumes de energia negociados, evidenciando a capacidade adaptativa da metaheurística. Nos exemplares pequenos, a energia vendida supera 200 kWh em casos específicos, refletindo uso inteligente de janelas de tempo largas. Nos exemplares grandes, destaca-se o caso do exemplar 30, com mais de 1500 kWh vendidos, confirmando a efetividade da abordagem em explorar o V2G para reduzir custos.

A Figura 3 mostra a evolução da função objetivo média normalizada durante as 20 iterações da fase de otimização, considerando os 30 exemplares grandes. Cada barra representa a média entre os exemplares, com valor inicial normalizado em 1,0. As barras cinza escuro indicam iterações em que a heurística 2-opt foi dominante, enquanto as cinza clara indicam que as melhorias vieram majoritariamente da resolução exata via MILP.

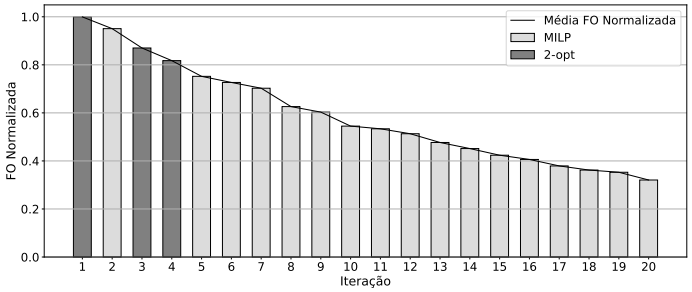


Figura 3: Função objetivo normalizada e método dominante por iteração.

Nota-se que as primeiras iterações são dominadas pela 2-opt, que proporciona ganhos rápidos, enquanto o solver MILP contribui com refinamentos nas etapas finais. Essa complementaridade confirma a vantagem da estrutura híbrida em unir rapidez heurística com profundidade de exploração exata.

4. Conclusão e Trabalhos Futuros

Os resultados computacionais demonstraram a capacidade da heurística em cobrir todos os clientes, explorar oportunidades de venda de energia em horários de pico. Em exemplares pequenos, os resultados obtidos foram comparáveis ou idênticos aos do modelo exato. Em exemplares grandes, a metaheurística foi a única abordagem viável, mostrando-se escalável e adaptativa. Além disso, observou-se que o componente 2-opt atua de forma eficaz nas iterações iniciais, enquanto o uso do solver MILP torna-se relevante nas fases finais de refinamento.

Como trabalhos futuros, pretende-se incorporar a degradação da bateria como fator de decisão e estudar diferentes tipos de função objetivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte do CNPq (processos 309925/2021-5 e 167045/2022-9) e da FAPESP (processos 2022/05803-3 e 2020/09838-0).

Referências

Froger, A., Jabali, O., Mendoza, J. E., e Laporte, G. (2022). The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations. *Transportation Science*, 56(2):460–482.

Jimenez, L. F. R., Santos, C., Oliveira, W. A., e Lyra Filho, C. (2023). Modeling and solving the electric vehicle routing problem with v2g operation planning. In *Anais do LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, São José dos Campos. Galoá. URL `\url{https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2023/trabalhos}`. Acesso em: 09 Maio. 2025.

Kucukoglu, I., Dewil, R., e Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161:107650.

Lin, B., Ghaddar, B., e Nathwani, J. (2021). Electric vehicle routing with charging/discharging under time-variant electricity prices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 130:103285.

Pelletier, S., Jabali, O., e Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126:225–255.

Roberti, R. e Wen, M. (2016). The electric traveling salesman problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89:32–52.

Zhang, X., Yao, J., Liao, Z., e Li, J. (2019). The electric vehicle routing problem with soft time windows and recharging stations in the reverse logistics. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Management Science and Engineering Management*, p. 171–182. Springer.