

Modelagem para o Problema de Roteamento de Veículos Elétricos com Estratégias V2G

Luis F. R. Jimenez¹ Caio dos Santos² Christiano Lyra Filho³

FEEC/UNICAMP, Campinas, SP

Washington A. Oliveira⁴

FCA/UNICAMP, Limeira, SP

A importância da sustentabilidade e da eficiência energética tem impulsionado o uso de veículos elétricos (VEs) no setor de transporte de mercadorias, proporcionando redução de emissões de CO₂ por meio de veículos menos poluentes para a logística urbana e rodoviária [1]. No entanto, a adoção desses veículos também apresenta desafios significativos no planejamento das frotas, especialmente devido à autonomia limitada das baterias e ao tempo de recarga de cada veículo que impactam no gerenciamento do uso da frota. Além disso, fatores como o peso transportado afetam diretamente o consumo de energia. Outro desafio importante é a disponibilidade de estações de carregamento, que nem sempre são suficientes para atender à demanda dos veículos, resultando em filas de espera e impactos operacionais [2].

O problema de roteamento de veículos elétricos (PRVE) busca otimizar as rotas de uma frota de VEs para atender clientes respeitando restrições como janelas de tempo, capacidade de carga e disponibilidade de estações de recarga. Outra variação do problema considera a tecnologia *vehicle-to-grid* (V2G), que permite aos veículos não apenas consumir energia, mas também vender para a rede elétrica em horários estratégicos, levando em conta a variação dos preços ao longo do dia. Além disso, recarga parcial e/ou recarga total podem ser incorporadas na tomada de decisão e estratégias de otimização de custos com base nas tarifas dinâmicas de energia podem ser usadas para alcançar benefícios. Este último problema é denominado PRVE-V2G.

Este trabalho introduz uma nova formulação matemática para o PRVE-V2G, que incorpora três novos aspectos que tornam a modelagem mais realista e aplicável a cenários reais: (i) a vida útil da bateria, restringindo seu uso entre 20% e 80%, com penalizações na função objetivo caso os limites sejam ultrapassados, evitando desgastes prematuros; (ii) o peso do veículo, que influencia diretamente o consumo de energia ao longo da rota, impactando a escolha de trajetos mais eficientes; e (iii) o limite na capacidade do uso das estações de carga por veículos, exigindo um planejamento mais estratégico das paradas para carregamento.

A Figura 1 ilustra a estrutura do problema, representando os veículos partindo do depósito, atendendo os clientes e interagindo com as estações de carregamento sob as restrições estabelecidas. Para cada veículo, é apresentado o nível atualizado de carga da bateria (%) ao chegar a um cliente ou a uma estação de carregamento. No caso das estações de carregamento, o nível de carga da bateria também é exibido na saída do veículo, refletindo a energia adquirida ou vendida. Além disso, observa-se que os limites de operação das baterias são respeitados ao longo do percurso, garantindo que os veículos permaneçam dentro da faixa de 20% a 80% de carga, conforme a restrição imposta no modelo.

O modelo matemático proposto foi validado por meio da resolução de um conjunto formado por 36 exemplares retirados da literatura [3], modificados para incluir os custos dinâmicos da

¹l229779@dac.unicamp.br

²c209430@dac.unicamp.br

³chrlyra@unicamp.br

⁴waoliv@unicamp.br

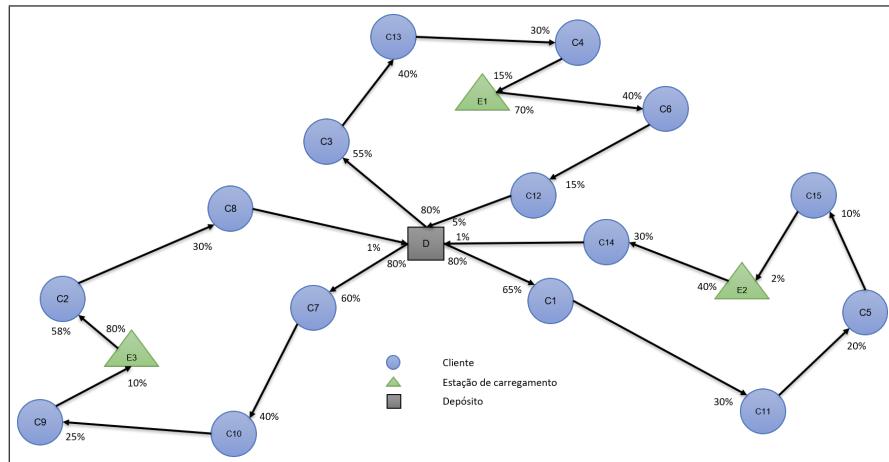


Figura 1: Ilustração de uma solução típica do PRVE-V2G. Fonte: própria.

energia elétrica e novas restrições. A codificação foi feita em linguagem Python e a última versão do CPLEX foi usada para resolver cada exemplar, com tempo computacional limitado em 7200 segundos.

Os resultados computacionais permitem verificar que a estratégia V2G é um diferencial, pois permite a venda de energia dos veículos para rede elétrica em momentos de alta demanda, reduzindo assim os custos operacionais. Além disso, a limitação da bateria resultou em um planejamento mais estratégico das recargas, prevenindo desgastes excessivos e prolongando a vida útil dos equipamentos. O impacto do peso no consumo de energia exigiu a escolha de trajetos mais eficientes, enquanto a restrição na capacidade das estações de recarga impôs um ajuste fino na distribuição dos veículos pelos pontos de carregamento.

Para trabalhos futuros, pretende-se explorar heurísticas e metaheurísticas para lidar com exemplares de maior dimensão, além de investigar a degradação progressiva das baterias ao longo do tempo.

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

- [1] S. Zhang, Y. Gajpal, S. S. Appadoo, and M. M. S. Abdulkader. Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International Journal of Production Economics*, 203:404–413, 2018.
- [2] S. Pelletier, O. Jabali, and G. Laporte. The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126:225–255, 2019.
- [3] M. Schneider, A. Stenger, and D. Goeke. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation science*, 48(4):500–520, 2014.