

## Problemas de Roteamento de Veículos Elétricos Considerando a Degradação da Bateria

Ellen M. B. Cavalheiro<sup>1</sup>, Washington A. de Oliveira<sup>2</sup>  
FCA/UNICAMP, Limeira, SP

O problema de roteamento de veículos (PRV) é um problema combinatório, e no caso geral, consiste no planejamento de visitas aos clientes por meio de um conjunto de rotas de veículos com o objetivo de minimizar o custo total. Cada cliente é visitado uma única vez, e cada rota começa e termina no depósito. A demanda por produtos de cada cliente é atendida e cada rota não ultrapassa sua capacidade. As dificuldades logísticas modernas exigem novos modelos e métodos de resolução para o PRV. Este trabalho considera a frota de veículos elétricos (PRVE) incluindo a análise do ciclo de vida das baterias. O PRVE possui desafios adicionais na determinação de uma solução viável. Por exemplo, a quantidade reduzida de estações de recarga, a operação de recarga da bateria e a baixa autonomia da bateria. A literatura já apresenta estudos para esta variante do PRVE, que descrevem formas de melhorar a vida útil da bateria, incluindo a otimização de estratégias de operação de carga e descarga. Os trabalhos [1] e [3] utilizaram estratégias de carregamento parcial da bateria para estender a vida útil da bateria. Além disso, [1] fez uma revisão sistemática da literatura apontando a necessidade de uma modelagem que considere a degradação da bateria. Assim, a contribuição desta pesquisa envolve a implementação de uma estratégia para evitar a descarga profunda da bateria – a profundidade da descarga refere-se a porcentagem da bateria que foi descarregada em relação ao total da capacidade do armazenamento. Restrições são adicionadas no modelo proposto em [3] para controlar a degradação da bateria, fornecendo o seguinte modelo matemático.

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i \in \mathcal{V}'_0, j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a} \quad \sum_{j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V}, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{F}', \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{V}'_0, i \neq j} x_{ij} - \sum_{i \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j} x_{ji} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{V}', \quad (4)$$

$$p_i + (t_{ij} + s_i)x_{ij} - l_0(1 - x_{ij}) \leq p_j \quad \forall i \in \mathcal{V}_0, \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j, \quad (5)$$

$$p_i + t_{ij}x_{ij} + g(Y_i - y_i) - (l_0 + gQ)(1 - x_{ij}) \leq p_j \quad \forall i \in \mathcal{F}', \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j, \quad (6)$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall j \in \mathcal{V}'_{0,n+1}, i \neq j, \quad (7)$$

$$0 \leq u_j \leq u_i - q_i x_{ij} + qV(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathcal{V}_0, \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, \forall i \neq j, \quad (8)$$

$$0 \leq u_0 \leq qV, \quad (9)$$

$$0 \leq y_j \leq y_i - h d_{ij} x_{ij} + Q(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathcal{V}, \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j, \quad (10)$$

<sup>1</sup>ellenmbc@gmail.com

<sup>2</sup>waoliv@unicamp.br

$$0 \leq y_j \leq Y_i - h d_{ij}x_{ij} + Q(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathcal{F}'_0, \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j, \tag{11}$$

$$y_i \leq Y_i \leq Q \quad \forall i \in \mathcal{F}'_0, \tag{12}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, t_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{V}'_0, \forall j \in \mathcal{V}'_{n+1}, i \neq j. \tag{13}$$

A função objetivo (1) minimiza a distância total percorrida pelos veículos elétricos. A conectividade dos clientes é garantida em (2), e a conectividade das estações de recargas é garantida em (3). (4) é a restrição de conservação do fluxo que impõem que o número de arcos de saída seja igual ao número de arcos de entrada em cada vértice. (5) garante a viabilidade temporal da saída dos arcos dos clientes e do depósito. (6) faz o mesmo para arcos que saem das estações de recargas. (7) estabelece que cada vértice seja visitado dentro de sua janela de tempo. (8) e (9) estabelecem que a demanda de todos os clientes devem ser satisfeitas. (10) e (11) evitam que o nível de carga da bateria seja negativo. (12) determina o estado de carga da bateria após a recarga em uma estação e garante que o estado de carga da bateria não exceda sua capacidade. O domínio das variáveis é dado em (13).

Experimentos computacionais preliminares foram conduzidos sobre um conjunto de dados disponível em [2]. O modelo foi codificado no pacote de programação Gurobipy em Python e exemplares do problema foram resolvidos com o otimizador Gurobi em um computador com Intel Core 17-4790 CPU de 3.60 GHz, 32 GB RAM e sistema operacional Windows. Para evitar a degradação da bateria do veículo, o estado da carga da bateria não pode ultrapassar 15% da carga total durante o percurso. A Tabela 1 compara os resultados de [2] que não considera o limite inferior da carga da bateria com os resultados deste estudo. Os resultados preliminares mostram que considerar a restrição de estado da carga da bateria torna o modelo mais aderente à realidade. Embora os resultados de [2] apresente soluções melhores, o modelo resolvido no *solver* resolve em menor tempo computacional.

Tabela 1: Resultados preliminares

Instância	Estações de Recarga	Resultados em [2]			Resultados no GUROBI		
		Veículos	Resultado	Tempo (s)	Veículos	Resultado	Tempo (s)
c101C5	3	2	257,75	0,31	4	250,03	0,27
c103C5	2	1	175,37	2,73	3	165,73	0,19
c206C5	4	1	242,55	5,38	1	164,34	0,45
r104C5	3	2	136,69	0,47	3	161,81	0,16
r203C5	4	1	179,06	1,12	1	208,18	0,23
rc105C5	4	2	233,77	3,06	3	241,95	0,42
rc108C5	4	2	253,93	3,76	2	258,75	0,56
rc204C5	4	1	176,39	2,17	1	185,55	0,40
rc208C5	3	1	167,98	1,05	1	174,88	0,48

## Agradecimentos

Ao apoio financeiro da Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos (n<sup>o</sup> 53180.025046/2023-21), do CNPq (n<sup>o</sup> 309925/2021-5) e da FAPESP (n<sup>os</sup> 2020/09838-0 e 2022/05803-3).

## Referências

- [1] F. Guo, J. Zhang, Z. Huang e W. Huang. “Simultaneous charging station location-routing problem for electric vehicles: Effect of nonlinear partial charging and battery degradation”. Em: **Energy** 250 (2022). ISSN: 0360-5442.
- [2] M. Schneider, A. Stenger e D. Goeke. “The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations”. Em: **Transportation science** 48.4 (2014).
- [3] Y. Zang, M. Wang e M. Qi. “A column generation tailored to electric vehicle routing problem with nonlinear battery depreciation”. Em: **Computers & Operations Research** 137 (2022). ISSN: 0305-0548.