**ROTEIRIZAÇÃO SUSTENTÁVEL: OTIMIZAÇÃO DE ROTAS COM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Lucas Edmundo Mello Silva (1), Luiz Eduardo Mello Silva (2). Orientador: Prof. Dr. Marcelo Daisuke Yamaki. (1) 8-CCOMP-00334340, (2) 8-CCOMP-228641.

**RESUMO**

Este trabalho aborda a otimização da roteirização de veículos elétricos (EVs) em operações logísticas na região metropolitana de São Paulo, com o objetivo de reduzir custos operacionais e minimizar o impacto ambiental. A escolha dos EVs se justifica pela crescente demanda por soluções de transporte sustentável e pela necessidade de cumprir regulamentações ambientais mais rígidas. O principal objetivo é desenvolver um modelo de programação linear que leve em consideração as restrições de autonomia dos EVs, o tempo de recarga e a localização das estações de recarga, maximizando a eficiência das entregas urbanas. A metodologia inclui a análise da malha urbana, coleta de dados sobre a infraestrutura de recarga e aplicação de modelos de otimização de roteirização. O estudo de caso na região metropolitana de São Paulo demonstrou que o modelo proposto pode promover uma significativa redução nas emissões de CO₂. Conclui-se que a aplicação desse modelo é viável em outras grandes cidades, desde que haja adaptação às condições locais de infraestrutura e demanda logística.

**Palavras-Chave:** Veículos elétricos; otimização de rotas; logística urbana; EVRP; São Paulo.

**ABSTRACT**

This study addresses the optimization of electric vehicle (EV) routing in logistics operations in the metropolitan region of São Paulo, aiming to reduce operational costs and minimize environmental impact. The use of EVs is justified by the growing demand for sustainable transport solutions and the need to comply with stricter environmental regulations. The main objective is to develop a linear programming model that considers the EVs' range limitations, charging time, and the location of charging stations, maximizing the efficiency of urban deliveries. The methodology includes analyzing the urban network, collecting data on charging infrastructure, and applying vehicle routing optimization models. The case study conducted in the metropolitan region of São Paulo demonstrated that the proposed model can significantly lower CO₂ emissions. It is concluded that this model can be applied in other major cities, provided it is adapted to local infrastructure and logistics demand conditions.

**Keywords:** Electric vehicles; route optimization; urban logistics; EVRP; São Paulo.

**1. Introdução**

Nas últimas décadas, a preocupação com as mudanças climáticas tem crescido significativamente, resultando em ações mais rigorosas de governos e empresas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o Relatório de 2021 do IPCC, o setor de transportes contribui com cerca de 24% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, tornando-o um alvo prioritário para estratégias de descarbonização [1]. Nesse contexto, a eletrificação das frotas logísticas tem se mostrado uma solução eficaz para reduzir as emissões e melhorar a eficiência energética. Em 2023, as vendas globais de veículos elétricos atingiram aproximadamente 14 milhões, representando 18% do total de veículos vendidos no mundo e um crescimento de 35% em relação ao ano anterior [2]. Esse aumento reflete a transição em curso, com muitos países incentivando a eletrificação de frotas não apenas para o transporte de passageiros, mas também para operações logísticas. Em 2024, as expectativas indicam que as vendas globais de veículos elétricos podem chegar a 17 milhões, representando mais de um quinto de todos os carros vendidos [3], o que reforça a importância de diferenciar as etapas de produção, venda e emplacamento no ciclo de vida de um veículo. Esses dados refletem realidades distintas no mercado, como demonstrado em 2023, quando a China produziu cerca de 27 milhões de veículos, dos quais aproximadamente 30% eram elétricos, destinados tanto ao mercado interno quanto à exportação [4].

A venda, por sua vez, representa os veículos adquiridos por consumidores e empresas, refletindo diretamente a demanda. No Brasil, as vendas de veículos elétricos cresceram 48% em 2023, totalizando cerca de 76.000 unidades, embora esses veículos ainda enfrentem desafios devido à infraestrutura de recarga limitada [2]. Já o emplacamento indica os veículos efetivamente registrados e em circulação. Em 2023, na União Europeia, cerca de 10% dos veículos emplacados eram elétricos, com o mercado brasileiro em desenvolvimento, evidenciando ainda uma diferença entre vendas e emplacamento devido a questões estruturais e burocráticas [5]. As tendências de produção e adoção também variam significativamente entre tipos de veículos; os veículos de passeio lideram em eletrificação, com incentivos e subsídios focados na transição para veículos de menor impacto ambiental, como observado na Europa, onde cerca de 14% dos veículos registrados em 2023 foram elétricos [3]. Em contraste, os veículos comerciais leves, como furgões, ganham espaço em operações urbanas, mas sua penetração é menor em comparação aos veículos de passeio devido a desafios específicos de autonomia. Por sua vez, os veículos comerciais pesados enfrentam obstáculos ainda maiores, como a necessidade de uma infraestrutura de recarga robusta para longas distâncias, o que limita sua adoção em comparação com veículos mais leves [4].

Países como a Noruega, onde 54% dos veículos de passeio já são elétricos, têm liderado essa transformação. A Alemanha também tem se destacado, com incentivos robustos para a eletrificação de frotas logísticas, reduzindo as emissões no setor de transporte de mercadorias e obtendo ganhos expressivos na eficiência das operações [6]. Além disso, cidades como Amsterdã e Roterdã têm sido pioneiras na implementação de veículos elétricos para entregas urbanas, com resultados promissores. Em Amsterdã, o uso de veículos elétricos (EVs) em operações logísticas reduziu em 31% as emissões de CO₂ no setor, enquanto Roterdã observou uma redução de até 20% nos custos operacionais das empresas logísticas que adotaram EVs [7]. Esses exemplos ilustram o potencial dos veículos elétricos para transformar a logística urbana, principalmente em grandes centros urbanos densamente povoados.

No Brasil, a integração dos EVs nas operações logísticas urbanas enfrenta desafios consideráveis, como a infraestrutura de recarga limitada. Atualmente, o país possui cerca de 2.500 estações de recarga, número insuficiente para suportar a crescente frota de veículos elétricos, que em 2024 alcançou aproximadamente 150.000 unidades, incluindo híbridos e totalmente elétricos [2, 8]. Embora as vendas de EVs no Brasil tenham crescido 48% em 2023 [2], a autonomia limitada e a escassez de estações continuam restringindo o uso de EVs em larga escala, especialmente nas grandes cidades [9].

O foco da pesquisa é otimizar a roteirização de veículos elétricos (EVs) para entregas urbanas na região metropolitana de São Paulo, uma abordagem necessária para atender a metas de sustentabilidade e regulamentações ambientais rigorosas. A implementação de EVs, embora promissora, enfrenta desafios como a autonomia limitada das baterias e a necessidade de pontos de recarga estrategicamente localizados, o que exige um planejamento otimizado das rotas para garantir a eficiência operacional e viabilidade econômica [6].

A proposta deste trabalho é desenvolver um modelo de otimização de roteirização que aborde esses desafios, revisitando o problema de roteirização de veículos sob a ótica das restrições impostas pelos EVs. Embora o problema de roteirização de veículos (VRP – Vehicle Routing Problem) seja amplamente estudado na literatura, a inserção de veículos elétricos traz novas complexidades, como a necessidade de considerar o tempo de recarga e a eficiência energética nas rotas planejadas [10]. A contribuição desta pesquisa é fornecer uma solução inovadora adaptada ao contexto de São Paulo, onde a infraestrutura para EVs e sua adoção nas operações logísticas ainda estão em estágio inicial.

Além de contribuir para a sustentabilidade e a eficiência operacional, este modelo pode fornecer insights práticos para empresas de logística que buscam maximizar o uso de suas frotas elétricas. A otimização das rotas pode levar à redução de custos operacionais, à diminuição dos tempos ociosos e ao aumento da competitividade, fatores críticos em um mercado que demanda entregas rápidas e de baixo impacto ambiental [9]. A pesquisa também tem uma relevância significativa para gestores públicos, oferecendo dados que podem apoiar o desenvolvimento de políticas para a expansão da infraestrutura de recarga. Com base nos resultados, espera-se que seja possível identificar locais estratégicos para novas estações de recarga, maximizando a eficiência das operações logísticas em áreas densamente povoadas e de alta demanda, como São Paulo.

Intelectualmente, este trabalho amplia o entendimento sobre o impacto das restrições operacionais dos EVs nas rotas otimizadas. Ao analisar fatores como a localização dos pontos de recarga, a autonomia dos veículos e as demandas logísticas, o estudo fornece uma base sólida para futuras pesquisas que explorem a aplicabilidade desses modelos em outras cidades e contextos operacionais [11]. A aplicação desse modelo matemático em um estudo de caso na região metropolitana de São Paulo permitirá avaliar seu desempenho sob diferentes cenários operacionais, fornecendo uma base empírica para novas soluções de otimização de rotas para EVs.

Assim, ao avançar o conhecimento na área de logística sustentável, esta pesquisa também atende a uma necessidade prática urgente de modernização das operações logísticas em grandes metrópoles, contribuindo tanto para o setor privado quanto para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável.

**2. Metodologia**

A pesquisa conduzida neste trabalho é de natureza aplicada e descritiva, com o objetivo de otimizar a roteirização de veículos elétricos (EVs) para operações logísticas na região metropolitana de São Paulo. Focando em áreas densamente povoadas, como a Zona Leste, Zona Sul, e a região do ABC Paulista, o estudo busca fornecer uma solução prática para o setor logístico, promovendo a redução de custos operacionais e o impacto ambiental através do uso eficiente de EVs. A pesquisa aplicada tem um caráter prático, diferenciando-se da pesquisa básica por seu enfoque em soluções concretas e diretamente aplicáveis a contextos específicos. Já o caráter descritivo do estudo possibilita uma análise detalhada das variáveis operacionais, como autonomia dos veículos e infraestrutura de recarga disponível, oferecendo um panorama completo dos desafios e potenciais da operação de EVs em centros urbanos.

A metodologia adotada baseia-se em uma abordagem quantitativa, com dados sintéticos fornecidos pela Universidade de São Paulo (USP) e obtidos por meio do Google Dataset Search. Esses dados permitem a simulação de diferentes cenários urbanos e fornecem uma visão abrangente das restrições e variáveis envolvidas na operação de EVs. A etapa inicial de pré-processamento dos dados foi essencial para garantir a consistência e integridade das informações, sendo realizada com o auxílio das bibliotecas Pandas e NumPy em Python. Python é amplamente utilizada em ciência de dados por sua flexibilidade e capacidade de manipular grandes volumes de dados de forma eficiente. Durante o pré-processamento, os dados foram normalizados, valores ausentes foram tratados e formatos padronizados, assegurando que as informações fossem confiáveis para a modelagem subsequente.

O desenvolvimento técnico do modelo seguiu a metodologia Agile, uma abordagem de gerenciamento de projetos baseada em ciclos iterativos e incrementais, focada em entregas contínuas e refinamentos frequentes. A metodologia Agile é especialmente adequada para a pesquisa aplicada, pois permite ajustes rápidos e contínuos no modelo, a partir dos resultados de cada fase de desenvolvimento, garantindo que o projeto se mantenha alinhado às necessidades práticas. Em vez de seguir um caminho linear, o Agile permite refinar o modelo gradualmente, facilitando a adaptação a novos dados ou insights emergentes. Essa característica é crucial para este estudo, pois a necessidade de integrar variáveis complexas, como rotas e restrições de recarga para EVs, exige uma flexibilidade que metodologias tradicionais não proporcionam. Cada iteração oferece a oportunidade de ajustar o modelo com base nos desafios específicos do contexto logístico e nas limitações operacionais dos EVs, resultando em uma solução mais robusta e adaptada às necessidades reais do estudo [12].

O núcleo do modelo desenvolvido foi construído utilizando a programação linear, uma técnica de otimização que busca encontrar a melhor solução possível para um problema ao minimizar ou maximizar uma função objetivo dentro de um conjunto de restrições específicas. No caso deste trabalho, a programação linear foi aplicada para otimizar as rotas dos EVs, com o objetivo de minimizar o tempo de percurso e os custos operacionais, considerando a autonomia limitada das baterias e a localização das estações de recarga. A programação linear é particularmente recomendada para problemas de roteirização logística porque permite estruturar o problema de maneira simplificada e objetiva, facilitando a incorporação de múltiplas restrições, como limites de bateria e distâncias entre pontos, em um único modelo matemático.

Em problemas logísticos e de transporte, a programação linear oferece uma alta capacidade de escalabilidade, essencial para lidar com grandes volumes de dados e variáveis, como rotas complexas e múltiplos pontos de entrega. Essa técnica também assegura que a solução encontrada seja a mais eficiente possível dentro das limitações estabelecidas, o que é fundamental em cenários onde pequenas variações no percurso podem impactar significativamente os custos e a sustentabilidade das operações. A programação linear é amplamente utilizada nesse contexto devido à sua precisão e capacidade de fornecer respostas rápidas, uma vantagem crítica para empresas que dependem de uma tomada de decisão ágil e informada para otimizar suas operações logísticas [13].

O processo de formulação do problema, conhecido como EVRP (Electric Vehicle Routing Problem), foi uma etapa central para a estruturação do modelo de roteirização de EVs. A roteirização, neste contexto, refere-se ao planejamento das rotas de maneira que se minimize o tempo de percurso, custo e consumo de energia, ajustando-se à autonomia limitada dos veículos e à localização das estações de recarga. Essa formulação envolve a tradução de condições reais de operação em variáveis e restrições matemáticas, incorporando aspectos como distâncias percorridas, demanda de entrega e pontos de recarga. O modelo formulado inclui restrições para a autonomia dos veículos e a necessidade de recarga em locais específicos, garantindo que o modelo reflita de maneira realista as operações logísticas urbanas. A formulação do EVRP possibilitou a criação de um modelo detalhado que considera a infraestrutura disponível e as limitações dos EVs, fornecendo uma base sólida para simular e planejar rotas eficientes [14].

Para resolver o modelo, foram utilizados solvers, que são algoritmos especializados na resolução de problemas de otimização complexos. Solvers como os integrados ao Pyomo aplicam métodos matemáticos avançados para encontrar a melhor rota possível, considerando todas as variáveis e restrições definidas no modelo. Esses solvers são essenciais para problemas de roteirização, pois permitem testar diferentes configurações e identificar rotas que otimizam a eficiência operacional, mesmo em cenários de alta demanda ou com infraestrutura de recarga limitada. A flexibilidade e a robustez dos solvers tornam-nos ideais para solucionar o EVRP, permitindo que o modelo responda de forma eficiente a diferentes parâmetros e restrições de operação [15].

A fase de avaliação envolveu a aplicação do modelo em múltiplos cenários simulados, com diferentes configurações de localização das estações de recarga e variações na densidade de pedidos durante horários de pico. Esses testes forneceram uma base empírica para verificar a aplicabilidade do modelo, permitindo ajustes e validações contínuas. As métricas de desempenho utilizadas, como tempo total de percurso, custo operacional e consumo de bateria, foram essenciais para avaliar a eficácia das rotas otimizadas e garantir que o modelo atenda aos objetivos de eficiência e sustentabilidade.

Mesmo com os avanços obtidos, o estudo possui limitações relacionadas ao uso de dados sintéticos, que, embora úteis para simulação, podem não capturar todas as complexidades dos dados reais. Além disso, a ausência de monitoramento em tempo real restringe a adaptabilidade do modelo a condições instantâneas. No entanto, os resultados demonstram a aplicabilidade do modelo como base para estratégias logísticas sustentáveis, oferecendo informações detalhadas para a tomada de decisões tanto por empresas quanto por gestores públicos interessados em reduzir emissões e melhorar a eficiência operacional.

**Referências**

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press; 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 13 out. 2024.

[2] International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. IEA, Paris. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024. Acesso em: 13 out. 2024.

[3] European Environment Agency. Electric vehicles as a proportion of newly registered passenger cars in Europe. 2023. Disponível em: https://www.eea.europa.eu. Acesso em: 13 out. 2024.

[4] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. World New Motor Vehicle Registrations in 2023. Disponível em: https://www.acea.auto. Acesso em: 13 out. 2024.

[5] ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. Vehicles in Use Report 2023. Disponível em: https://www.acea.auto. Acesso em: 13 out. 2024.

[6] Schneider M, Stenger A, Goeke D. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. Transportation Science.

[7] Zhao, J., & Chen, L. (2021). Environmental and economic impacts of electric vehicles in urban logistics. *International Journal of Urban Logistics*, 9(2), 67-81.

[8] Ministério dos Transportes. Frota de Veículos - 2024. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024. Acesso em: 13 out. 2024.

[9] Agência Internacional de Energia (IEA). Global EV Outlook 2023: Políticas e Infraestrutura de Carregamento no Brasil. Paris: IEA; 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023. Acesso em: 13 out. 2024.

[10] Luo Y, Wang P, Zhang M. Optimizing Electric Vehicle Routing: Challenges and Opportunities. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2020;120:102-15.

[11] Nagy G, Salhi S. Vehicle Routing Problem: Innovations and Challenges in Electric Vehicle Applications. Journal of Transportation Systems. 2022;10(4):235-49.

[12] Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., et al. Manifesto for Agile Software Development. Agile Alliance; 2001. Disponível em: https://agilemanifesto.org. Acesso em: 13 out. 2024.

[13] Winston WL, Goldberg JB. Operations Research: Applications and Algorithms. 4ª ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole; 2004.

[14] Schneider M, Stenger A, Goeke D. Electric vehicle routing problem: Formulation and applications. Transportation Science. 2014;48(4):500-20.

[15] Bixby RE, Rothberg E, Rothberg J. Progress in computational mixed integer programming: Solvers and applications in vehicle routing. *Computers & Operations Research*. 2019;111:27-41.