

Aplicação do problema do caixeiro viajante para otimização das contas a receber numa empresa de autopeças

Gislayne de Souza de Lima (UFSCar) *gslima@ufscar.br*

Mariana Ferreira de Carvalho Chaves (UFSCar) *marianachaves@estudante.ufscar.br*

Cinthia Sayuri Shiramizu (UFSCar) *cinthiasshiramizu@gmail.com*

Resumo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um plano de roteirização para a entrega de boletos e contas a receber em uma empresa do setor de autopeças, utilizando uma formulação baseada no Problema do Caixeiro Viajante (PCV). O modelo matemático foi implementado em Python, com o objetivo de minimizar as distâncias percorridas e os tempos de deslocamento, fatores que impactam diretamente a eficiência operacional e os custos logísticos da empresa. Para tanto, foram consideradas três variantes de programação matemática: uma voltada exclusivamente à minimização da distância, outra à minimização do tempo de deslocamento e uma terceira que busca equilibrar ambos os critérios, proporcionando uma solução intermediária. Os resultados obtidos demonstraram reduções expressivas em relação à rota atualmente utilizada, com diminuição de até 69,50% na distância total percorrida, 63,74% no tempo de deslocamento e 69,35% no custo diário de combustível. Esses resultados evidenciam não apenas a eficiência do modelo proposto, mas também seu potencial de impacto econômico. Dessa forma, a aplicação de técnicas de otimização revela-se uma ferramenta estratégica para melhorar o desempenho operacional, otimizar recursos e contribuir positivamente para o ciclo financeiro da organização.

Palavras-chave: *Problema do Caixeiro Viajante, Setor de Autopeças, Otimização Matemática.*

Abstract

This study proposes the development of a routing plan for the delivery of invoices and accounts receivable in a company in the auto parts sector, using a formulation based on the Traveling Salesman Problem (TSP). The mathematical model was implemented in Python, aiming to minimize both the distances traveled and the travel times, factors that directly impact the company's operational efficiency and logistical costs. To this end, three variants of mathematical programming were considered: one focused exclusively on distance

minimization, another on minimizing travel time, and a third seeking to balance both criteria, providing an intermediate solution. The results showed significant reductions compared to the currently used route, with decreases of up to 69.50% in total distance traveled, 63.74% in travel time, and 69.35% in daily fuel costs. These findings demonstrate not only the efficiency of the proposed model but also its potential economic impact. Thus, the application of optimization techniques proves to be a strategic tool for improving operational performance, optimizing resources, and positively contributing to the organization's financial cycle.

Keywords: *Traveling Salesman Problem, Auto Parts Sector, Mathematical Optimization.*

1. Introdução

A dinâmica competitiva do mercado contemporâneo impõe às organizações o aperfeiçoamento contínuo de suas operações logísticas, especialmente no que se refere à redução de custos e à elevação dos níveis de serviço. Em cenários de margens estreitas e alta exigência dos consumidores, decisões de transporte e distribuição influenciam diretamente o desempenho financeiro, a confiabilidade operacional e a satisfação dos clientes (Alanzi, 2025; Mor; Speranza, 2020). Assim, a incorporação de métodos quantitativos ao planejamento torna-se elemento central da estratégia empresarial (Hossen *et al.*, 2025).

Estudos indicam que ganhos significativos emergem quando a distribuição é estruturada por modelos analíticos capazes de racionalizar distâncias, tempos e recursos. Conforme Ballou (2006), a eficiência logística depende do alinhamento entre roteirização, consolidação de cargas e programação de serviços. A falta dessa coordenação gera desperdícios, retrabalhos e ampliação dos custos operacionais (Miranda; Soliani; De Freitas, 2021).

Nesse contexto, destacam-se os modelos da Pesquisa Operacional. Segundo Hillier e Lieberman (2013), a modelagem matemática representa sistemas reais de modo estruturado, oferecendo suporte objetivo à minimização de custos e à melhoria do atendimento. Na distribuição física, essa contribuição materializa-se principalmente nos problemas de roteamento de veículos, voltados ao uso mais eficiente da frota (Mor; Speranza, 2020).

O planejamento de rotas é, portanto, um desafio central das operações logísticas. Percursos inadequados afetam consumo de combustível, manutenção, cumprimento de prazos e qualidade do serviço (Miranda; Soliani; Freitas, 2021; Aghaabdollahian; Javadi; Aazami, 2026). Soma-se a isso a elevada complexidade combinatória desses problemas, que demanda formulações robustas e ferramentas computacionais especializadas (Saller; Koehler; Karrenbauer, 2025).

Entre as estruturas clássicas, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) destaca-se como base de múltiplas extensões (Pop, 2024). O modelo determina um ciclo de menor custo que visita todos os pontos uma única vez, retornando à origem. Embora simplificado, fornece fundamentos relevantes para situações em que um agente deve cumprir uma sequência definida de atendimentos (Ono, 2020). Avanços recentes incluem a incorporação de técnicas computacionais modernas e aprendizado de máquina para ampliar a capacidade de resolução (Alanzi, 2025).

A importância da roteirização é ainda mais evidente no mercado de reposição automotiva, no qual rapidez, cobertura territorial e controle de custos são fatores críticos frente à concorrência de redes oficiais e plataformas digitais (Asc Software, 2025). Apesar disso, muitas organizações ainda definem rotas de forma empírica, baseadas na experiência dos condutores, o que pode resultar em trajetos maiores que o necessário e uso inadequado do tempo de trabalho. A identificação de gargalos nessas operações é condição essencial para a melhoria contínua (Miranda; Soliani; De Freitas, 2021).

A adoção de técnicas de Pesquisa Operacional mostra-se, assim, fundamental para qualificar decisões e mensurar os benefícios da otimização. Modelos de programação inteira mista, associados a solucionadores computacionais, têm se mostrado eficazes mesmo em problemas reais (Hossen *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, este estudo propõe desenvolver um plano de roteirização para a entrega de boletos e contas a receber em uma empresa de autopeças, utilizando uma formulação baseada no PCV. O modelo foi implementado em linguagem Python, com o objetivo de minimizar distâncias e tempos de deslocamento, produzindo efeitos positivos sobre a eficiência operacional e o ciclo financeiro.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica; a Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos; a Seção 4 discute os resultados e discussões; e a Seção 5 reúne as considerações finais.

2. Referencial Teórico

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV), internacionalmente conhecido como *Travelling Salesman Problem* (TSP), figura entre os problemas mais investigados na matemática computacional e na pesquisa operacional. Sua notoriedade decorre do contraste entre a simplicidade de enunciação e a elevada complexidade combinatória associada à

obtenção de soluções ótimas, aspecto que tem motivado amplo desenvolvimento de métodos exatos e heurísticos (Rico-Garcia *et al.*, 2021).

O problema consiste em determinar um percurso de custo mínimo no qual um agente parte de um ponto de origem, visita um conjunto de localidades exatamente uma vez e retorna ao ponto inicial. Esse arcabouço é fundamental para aplicações logísticas e de transporte, servindo como base conceitual para diversos problemas de roteirização (Hossen *et al.*, 2025; Alanzi, 2025; Osaba *et al.*, 2020). Conforme destacado por Silva (2022), formulações precursoras do PCV podem ser associadas aos estudos de William Rowan Hamilton (1856), cujo problema recreativo antecipava a necessidade de percorrer todos os vértices de uma estrutura retornando ao ponto de partida sem repetições.

Na literatura contemporânea, o PCV é reconhecido como um problema clássico de determinação de um ciclo hamiltoniano mínimo. Mor e Speranza (2020) observam que sua estrutura deu origem a uma série de extensões que hoje compõem o campo da roteirização de veículos. Miranda, Soliani e De Freitas (2021) reforçam que o objetivo central permanece a minimização da distância total percorrida, condição essencial para o aumento da eficiência operacional.

Do ponto de vista da modelagem, o PCV é tradicionalmente formulado por meio de programação linear inteira binária, em que variáveis indicam a presença ou ausência de arcos na solução (Mor; Speranza, 2020; Alanzi, 2025). Entre as formulações mais difundidas encontra-se aquela proposta por Miller; Tucker e Zemlin (1960), conhecida como formulação de *Miller-Tucker-Zemlin* (MTZ), amplamente empregada devido à sua capacidade de prevenir sub-rotas.

Seja a distância $d_{i,j}$ um parâmetro inteiro não-negativo que indica a distância entre as cidades i e j , u_i ($i = 1, \dots, n$) variáveis que recebem números reais arbitrários e x_{ij} uma variável binária que recebe valor 1 se o caixeiro viajante realiza o trajeto da cidade i para a cidade j e 0 caso contrário.

A função-objetivo (1) minimiza a distância total percorrida no percurso. As restrições (2) asseguram que cada cidade seja visitada exatamente uma vez, impondo que cada nó receba exatamente uma aresta de entrada. As restrições (3) garantem que, após cada visita, haja exatamente uma aresta de saída correspondente, assegurando a continuidade do percurso. A restrição (4) corresponde ao mecanismo clássico de eliminação de sub-rotas proposto por Miller, Tucker e Zemlin (MTZ), impedindo a formação de ciclos desconectados e garantindo a conectividade global da solução. As restrições (5) estabelecem os limites das variáveis auxiliares u_i , responsáveis pelo ordenamento relativo das cidades na rota. Por fim, as restrições

(6) definem o domínio das variáveis de decisão, impondo natureza binária às variáveis x_{ij} . O modelo de programação linear inteira mista (MILP), pode ser definido como segue:

$$\text{Minimizar: } \sum_{0 \leq i \neq j \leq n} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i \neq j, i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$1 \leq u_i \leq n - 1 \quad (5)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad (6)$$

A relevância prática do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é amplamente demonstrada em aplicações empíricas contemporâneas. Estudos recentes têm aplicado o PCV a contextos logísticos reais, evidenciando ganhos em eficiência e redução de custos operacionais em problemas de entrega de pacotes urbanos (Anwer; Yousuf; Ali, 2025). Em estudo semelhante, Silva *et al.* (2023) analisaram a distribuição de produtos em uma empresa de confecção de roupas infantis, comparando métodos exatos e heurísticos, com diminuição significativa do percurso quando confrontado ao planejamento empírico adotado pela organização.

No setor alimentício, Miranda, Soliani e De Freitas (2021) avaliaram a distribuição de uma padaria com carteira fixa de clientes, demonstrando que a aplicação do PCV, por meio de ferramentas computacionais, proporcionou redução substancial da quilometragem total. Resultados convergentes foram relatados por Shirabayashi *et al.* (2020), que utilizaram a heurística de *k-means* para o planejamento das rotas de coleta de recicláveis em Mandaguari-PR, obtendo diminuição relevante do custo mensal de deslocamento. Paralelamente, avanços recentes evidenciam o papel de heurísticas e algoritmos implementados em ambientes computacionais de alto desempenho, capazes de produzir soluções de qualidade para instâncias de grande porte (Pop, 2024; Hossen *et al.*, 2025).

Em investigações que exploram métodos híbridos para resolução de problemas de roteamento reais, o PCV e variantes foram implementados considerando restrições operacionais

realistas, incluindo frotas heterogêneas e prioridades de entrega (Osaba; Villar-Rodríguez; Asla, 2024). Além disso, frameworks de otimização baseados no PCV têm sido utilizados para gerar rotas de *last-mile delivery* de alta qualidade, validando seu uso em desafios práticos de logística de grandes empresas (Sun; Arslan, 2025).

Observa-se, portanto, que a aplicação de modelos derivados do PCV constitui instrumento decisivo para o aumento da eficiência operacional em diferentes segmentos econômicos. A literatura demonstra de forma consistente que a utilização de técnicas de otimização na roteirização contribui para a redução de distâncias, tempos e custos, além de oferecer suporte analítico à tomada de decisão em sistemas logísticos complexos.

3. Metodologia

Quanto à abordagem, a presente pesquisa caracteriza-se como quantitativa, uma vez que se fundamenta na utilização de métodos numéricos e análises estatísticas para a compreensão do fenômeno estudado (De Lunetta; Guerra, 2023).

Quanto aos objetivos, o estudo classifica-se como exploratório, pois busca proporcionar maior familiaridade com o problema investigado, contribuindo para o aprimoramento de hipóteses e a compreensão inicial do contexto analisado (Ferrer; Dias, 2023).

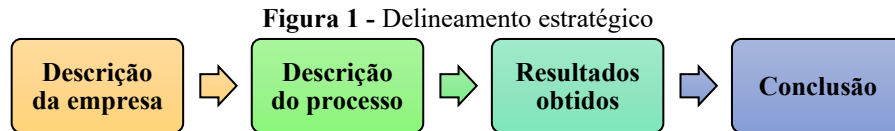
No que se refere aos procedimentos técnicos, a pesquisa é composta por duas etapas complementares: (i) pesquisa bibliográfica e (ii) estudo de caso. A pesquisa bibliográfica foi conduzida a partir da análise sistemática de periódicos científicos, livros e bases de dados, com o objetivo de fundamentar teoricamente o problema e embasar a modelagem proposta (De Lunetta et al., 2023).

O estudo de caso foi realizado em uma empresa do setor de autopeças, sendo adotado como estratégia de investigação empírica, utilizando múltiplas fontes de evidência, como registros documentais e coleta de dados primários, para analisar os processos logísticos em seu contexto real (Gil, 2017). A partir dessa análise, buscou-se identificar oportunidades de melhoria e propor soluções baseadas em técnicas de otimização, visando ganhos de eficiência operacional e redução de custos.

Os parâmetros do modelo matemático foram definidos com base na distância e no tempo de viagem entre os pontos de entrega. Os endereços foram extraídos dos registros internos da empresa, compreendendo uma base de 20 endereços fixos de clientes. Para o levantamento das distâncias (km) e dos tempos de percurso (minutos), utilizou-se a ferramenta *Google Maps*. Devido à natureza assimétrica das vias urbanas (fluxo unidirecional), as distâncias entre os

pontos não são necessariamente recíprocas, resultando em uma coleta de 400 pontos de dados para cada parâmetro.

O modelo matemático apresentado na Seção 2 foi implementado na linguagem *Python* e reproduzido em um computador com configurações AMD Ryzen 5 4500 6-Core Processor, com 16 GB de memória RAM e sistema operacional *Windows 11*. Como procedimento metodológico, elaborou-se um delineamento estratégico, apresentado na Figura 1.



Fonte: Autoras (2026).

Na primeira etapa do estudo, realizou-se a descrição da empresa; em seguida, definiu-se o processo selecionado para aplicação do modelo; posteriormente, juntamente com os funcionários e o gestor, identificou-se o principal problema da organização; e, por fim, o estudo foi concluído com a análise e o ajuste dos resultados, com o objetivo de otimizar a distância e o tempo das rotas, isto é, fornecer o melhor trajeto possível com o menor custo.

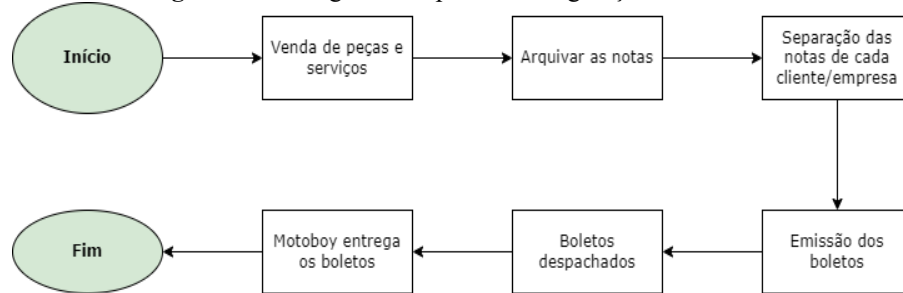
4. Resultados e Discussão

Este estudo foi realizado em uma empresa de autopeças localizada na cidade de Goioerê - Paraná, na qual possui como principal atividade a comercialização de varejo de peças e acessórios novos para veículos automotores de linha leve e pesada. De forma geral, a empresa estudada contém os seguintes departamentos: contas a pagar, contas a receber, departamento de vendas, departamento de compras, departamento de almoxarifado e departamento de prestação de serviços.

Com isso, para o presente artigo foi escolhido o departamento de contas a receber, em virtude das entregas de boletos aos clientes. A Figura 2 apresenta o processo da emissão e entrega dos boletos da empresa. O processo de geração dos boletos, inicia-se pela venda de peças e acessórios para os clientes, sendo os serviços prestados, tanto na empresa quanto por telefone, durante todo o mês. Na sequência, são emitidas as notas referentes ao produto ou serviço adquirido gerando faturamento nas contas a receber do consumidor, deixando-as arquivadas em envelopes na ordem alfabética, logo, são separadas no início de cada mês para conferência. Após a separação, os boletos são emitidos, e finalmente são despachados para o *motoboy*, sem uma elaboração de rotas para as entregas aos seus respectivos clientes, ou seja, a

entrega é realizada de acordo com as ordens alfabéticas que os boletos são feitos, não priorizando as localizações das empresas.

Figura 2 - Fluxograma do processo de geração dos boletos



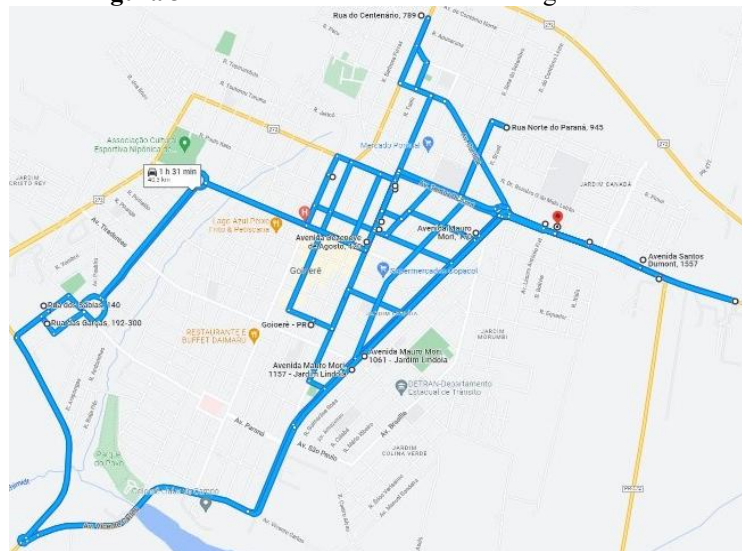
Fonte: Autoras (2026).

A empresa realiza entregas de boletos para 20 endereços, a Figura 3 apresenta a rota realizada pelo entregador. Observa-se a necessidade de elaborar um planejamento de roteirização para reduzir os custos desnecessários, visto que o mesmo caminho é percorrido mais de uma vez em rotas diferentes.

O caminho total percorrido pelo entregador, segundo o planejamento estabelecido pela empresa, é de 40,3 km em 1h31 min sugeridos pelo *Google Maps*. Ao consultar as informações de rotas com a empresa para elaboração da rota atual, verificou-se que o *motoboy* utiliza aproximadamente 2h30 min para realização das entregas, ou seja, uma hora a mais do que o sugerido. Os fatores de adição de tempo consistem no trânsito e no tempo de atendimento dos estabelecimentos, que compreende a atividade de estacionar a moto, entrar nos locais para realizar a entrega, voltar até a moto e sair para a próxima entrega.

De posse das informações levantadas pelo *Google Maps*, foi possível implementar o problema do caixeiro viajante com restrições de sub-rotas de Miller, Tucker e Zemlin (1960), conforme apresentado nas Equações 1 a 5. O problema foi abordado por duas variantes: no Modelo 1, a função objetivo considera a minimização da distância total percorrida, em quilômetros; no Modelo 2, considerou-se a minimização do tempo total de percurso, em minutos.

Após sua implementação e posterior reprodução, a solução ótima em relação à distância total (Modelo 1) foi igual a 12,29 km rodados, sendo o tempo de processamento igual a 0,01092 segundos. A rota obtida foi: 0 - 19 - 4 - 14 - 1 - 10 - 13 - 16 - 5 - 9 - 8 - 12 - 17 - 7 - 2 - 15 - 6 - 11 - 18 - 3 - 0. A rota apresentou uma redução significativa de 69,50% comparada com a rota estabelecida pela empresa, que é de 40,3 km.

Figura 3 - Rotas ordem alfabética da entrega de boletos


Fonte: Autoras (2026).

Considerando o consumo médio da motocicleta da empresa, observa-se que, para cada litro de combustível, é possível percorrer aproximadamente 40,49 km. Levando-se em conta que, no período analisado, o valor do combustível era de R\$7,29 por litro, constata-se que a execução da rota vigente (em ordem alfabética) implica um custo de aproximadamente R\$7,21. De acordo com a solução retornada pelo código, o custo total da entrega é de R\$2,21, representando uma redução de cerca de 69,35% em relação ao custo da rota vigente.

Considerando o tempo total de deslocamento como função objetivo (Modelo 2), encontrou-se uma solução ótima de 33 minutos, com tempo de execução de 0,01241 segundos. Foram identificadas cinco rotas (R) distintas que apresentam o mesmo valor ótimo da função objetivo, caracterizando múltiplas soluções ótimas para o problema. As soluções correspondentes são:

- R_1 : 0 - 11 - 6 - 18 - 19 - 4 - 2 - 15 - 12 - 7 - 17 - 10 - 16 - 5 - 9 - 8 - 13 - 1 - 14 - 3 - 0;
- R_2 : 0 - 19 - 4 - 2 - 15 - 12 - 7 - 17 - 10 - 16 - 5 - 9 - 8 - 13 - 1 - 14 - 3 - 6 - 11 - 18 - 0;
- R_3 : 0 - 6 - 11 - 3 - 18 - 19 - 4 - 2 - 15 - 12 - 7 - 17 - 10 - 13 - 16 - 5 - 9 - 8 - 1 - 14 - 0;
- R_4 : 0 - 11 - 18 - 6 - 3 - 19 - 4 - 5 - 9 - 8 - 2 - 15 - 12 - 7 - 17 - 10 - 13 - 16 - 1 - 14 - 0;
- R_5 : 0 - 18 - 11 - 6 - 3 - 19 - 4 - 2 - 15 - 12 - 7 - 17 - 10 - 16 - 5 - 9 - 8 - 13 - 1 - 14 - 0.

O tempo de deslocamento obtido gerou uma redução de 63,74% em comparação a rota vigente que foi de 91 minutos. Considerando ainda o acréscimo médio de 60 minutos decorrente do tempo de atendimento e das condições de trânsito, verifica-se que a rota otimizada resulta em um tempo total estimado de 93 minutos (1h33min). Esse valor é significativamente inferior ao tempo total da rota vigente, que atinge 2h31min.

Ao final, foram obtidas seis rotas distintas a partir dos Modelos 1 e 2. Para fins de comparação das soluções, avaliou-se o deslocamento total e o tempo de viagem de cada uma das rotas. A Tabela 1 apresenta esses resultados, sendo a rota 0 aquela obtida pelo Modelo 1 e as demais adquiridas com o Modelo 2. Percebe-se que embora a distância total percorrida pela Rota 0 seja menor do que a das demais, com média de 2,29 km a menos, essa rota apresenta maior tempo total de deslocamento, com acréscimo de aproximadamente 3 minutos. Essa diferença pode ser explicada pelas características da malha viária, tais como limites de velocidade, número de interseções, presença de semáforos e condições de tráfego, que impactam diretamente a velocidade média ao longo do percurso.

Tabela 1 - Deslocamento e tempo total das rotas obtidas com os modelos 1 e 2

Rota	Distância total (km)	Tempo total (min)
Rota 0	12,29	36
Rota 1	15,19	33
Rota 2	14,7	33
Rota 3	14,4	33
Rota 4	13,9	33
Rota 5	14,7	33

Fonte: Autoras (2026)

Em vista das diferenças entre as soluções obtidas pelos modelos anteriores, propôs-se um terceiro modelo, cujo objetivo é minimizar simultaneamente o tempo de deslocamento e a distância total percorrida. A partir de sua solução, obteve-se a Rota 6, com tempo de processamento igual a 0,01016 segundos, definida como: 0 - 18 - 6 - 11 - 3 - 19 - 4 - 14 - 1 - 10 - 13 - 16 - 5 - 9 - 8 - 12 - 17 - 7 - 2 - 15 - 0. Essa rota apresenta um total de 12,39 km percorridos em 34 minutos, representando um equilíbrio entre as soluções que minimizam exclusivamente o tempo e aquelas que priorizam apenas a distância, ao ponderar ambos os critérios de desempenho. Essa nova solução apresenta um aumento de 0,10 km em relação à Rota 0 (Modelo 1) e um acréscimo de 1 minuto em relação às rotas obtidas com o Modelo 2.

5. Considerações Finais

Diante de um cenário marcado pela intensificação da concorrência e pela crescente exigência por eficiência operacional, as organizações têm buscado métodos e técnicas capazes de aprimorar o planejamento estratégico e elevar a qualidade de seus serviços. Nesse contexto,

a melhoria dos processos logísticos constitui um elemento essencial para o desempenho organizacional.

O presente estudo teve como objetivo analisar a rota de entrega de boletos de uma empresa do setor de autopeças, localizada no interior do Paraná, com vistas à proposição de um plano de roteirização mais eficiente. Para tanto, realizou-se o mapeamento das coordenadas dos endereços por meio da ferramenta Google Maps, e o problema foi modelado com base no Problema do Caixeiro Viajante (PCV), sendo posteriormente implementado em linguagem Python.

Os resultados obtidos evidenciam ganhos expressivos em termos operacionais e econômicos. O modelo voltado à minimização da distância (Modelo 1) apresentou uma solução ótima de 12,29 km, representando uma redução de 69,50% em relação à rota atualmente utilizada. No que se refere ao tempo de deslocamento, o Modelo 2 reduziu o tempo total de 2h31min para 1h33min, correspondendo a uma redução de 63,74%. Adicionalmente, observou-se uma diminuição significativa no custo diário de combustível, de R\$7,21 para R\$2,21, o que representa uma economia aproximada de 69,35%.

Ademais, a proposição de um modelo multiobjetivo (Modelo 3) possibilitou a obtenção de uma solução intermediária, capaz de equilibrar simultaneamente a minimização da distância e do tempo de deslocamento. Tal abordagem evidencia o potencial da aplicação de técnicas de otimização como ferramenta de apoio à tomada de decisão em sistemas logísticos.

Dessa forma, os resultados reforçam que a adoção de modelos de roteirização contribui significativamente para a redução de custos operacionais, melhoria da eficiência e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, consolidando-se como uma estratégia relevante para organizações que atuam em ambientes competitivos.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a incorporação de novas variáveis e restrições ao modelo, tais como janelas de tempo, condições dinâmicas de tráfego e múltiplos veículos, visando ampliar a aderência à realidade operacional. Adicionalmente, a aplicação de métodos heurísticos e metaheurísticos, como algoritmos genéticos e colônia de formigas, pode contribuir para a resolução de instâncias de maior escala. Por fim, recomenda-se a realização de estudos que avaliem os impactos econômicos e ambientais das rotas otimizadas, considerando indicadores de custo e emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS



AGHAABDOLLAHIAN, B.; JAVADI, B.; AAZAMI, A. An overview of vehicle routing problems: A comprehensive classification and description of types. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 36, p. 101808, 2026.

ALANZI, E.; MENAI, M. E. B. Solving the traveling salesman problem with machine learning: a review of recent advances and challenges. **Artificial Intelligence Review**, v. 58, n. 9, p. 267, 2025.

ANWER, I.; YOUSUF, M. I.; ALI, H. Application of the Travelling Salesman Problem in optimizing logistic routes. **Creativity, Innovation and Entrepreneurship**, v. 166, p. 144-154, 2025.

ASC SOFTWARE. Logistics software for auto industry efficiency. *ASC Blog*, 2025. Disponível em: <https://ascsoftware.com/blog/logistics-software-enhances-efficiency-auto-industry/>. Acesso em: 14 nov 2025.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: Logística empresarial**. 5 ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.

DE LUNETTA, A.; GUERRA, R.; DE VARGAS MATOS, D.; DA COSTA, M.; ROZENDO, J. F.; DE MELO, N. J. G. Procedimentos metodológicos de classificação das pesquisas científicas. **EDUCERE-Revista da Educação da UNIPAR**, v. 23, n. 1, p. 303-311, 2023.

DE LUNETTA, A.; GUERRA, R. Metodologia da pesquisa científica e acadêmica. **Revista OWL (OWL Journal)-Revista Interdisciplinar de Ensino e Educação**, v. 1, n. 2, p. 149-159, 2023.

FERRER, W. M. H.; DIAS, J. A. **Manual prático de metodologia da pesquisa científica: noções básicas**. Marília: Unimar, 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HAMILTON, W. R. Memorandum respecting a new System of Roots of Unity. **Philosophical Magazine**, v. 12, p. 446, 1856.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HOSSEN, M. R.; KOUSHIK, H. J.; UDDIN, M. F.; RAHMAN, M. A.; HYE, M. A. Optimal algorithm of the traveling salesman problem. **International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization**, 2025.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer programming formulation of traveling salesman problems. **Journal of the ACM (JACM)**, v. 7, n. 4, p. 326-329, 1960.

MIRANDA, A. L.; SOLIANI, R. D.; DE FREITAS, C. G. Otimização de rotas de entregas: um estudo de caso no setor de alimentos utilizando o Problema do Caixeiro Viajante (PCV). **Revista de Ciências da Amazônia**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2021.

MOR, A.; SPERANZA, M. G. Models and algorithms for the Traveling Salesman Problem with Time Windows and related problems. **European Journal of Operational Research**, v. 283, n. 3, p. 803-818, 2020.

ONO, D.; RINCÓN, J.; THOMAS, A. A Criteria-Based Approach to the Traveling Salesman Problem (TSP). **Western Decision Science Journal**, 2020.

OSABA, E.; YANG, X.-S.; DEL SER, J. Traveling salesman problem: a perspective review of recent research and new results with bio-inspired metaheuristics. **Nature-inspired computation and swarm intelligence**, p. 135-164, 2020.

POP, P. C. A comprehensive survey on the multiple traveling salesman problem: applications, approaches and taxonomy. **Computer Science Review**, v. 40, 2024.

RICO-GARCIA, H.; SANCHEZ-ROMENO, J. L. JIMENO-MORENILLA, A.; MIGALLON- GOMIS, H. A Parallel Metaheuristic Approach to Reduce Vehicle Travel Time for Smart Cities Sustainability. **Springer Proceedings in Complexity**. Suíça, p. 37-49. 16 de janeiro de 2021.



SALLER, S.; KOEHLER, J.; KARRENBAUER, A. A survey on approximability of traveling salesman problems. **Annals of Operations Research**, 2025.

SILVA, J.; SILVA, J. P. F.; SHIRABAYASHI, J. V.; DIAS, S. N. S. Estudo de um problema de rotas de uma empresa de confecção de roupas infantis. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 10, p. 27553-27567, 2023.

SHIRABAYASHI, J. V.; MEIRA, A. H.; SILVA, J. P. F.; SHIRABAYASHI, W. V. I. Um estudo sobre a coleta de resíduos recicláveis via técnicas de pesquisa operacional. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 4, 2020.

SUN, H. J. N.; ARSLAN, O. A contextual framework for learning routing experiences in last-mile delivery. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 194, p. 103172, 2025.

OSABA, E.; VILLAR-RODRIGUEZ, E.; ASLA, A. Solving a real-world package delivery routing problem using quantum annealers. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 24791, 2024.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, F.; LUCIO, M. P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5 ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 3a ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.