

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BAMBUÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Bruna Fernandes Figueiredo Brum

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ENTREGA COM USO
DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO E
DADOS GEOGRÁFICOS REAIS**

BambuÍ

2026

BRUNA FERNANDES FIGUEIREDO BRUM

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ENTREGA COM USO
DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO E
DADOS GEOGRÁFICOS REAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Engenharia de
Produção do Instituto Federal de Minas Gerais
- *Campus* Bambuí como requisito parcial para a
obtenção do grau de bacharela em Engenharia
de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Bruna Aparecida
Rezende Campos

Bambuí

2026

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Bambuí*

B893o Brum, Bruna Fernandes Figueiredo.

Otimização de rotas de entrega com uso do algoritmo do vizinho mais próximo e dados geográficos reais [manuscrito] / Bruna Fernandes Figueiredo Brum – 2026.
25 f. : il. ; color.

Orientadora: Bruna Aparecida Rezende Campos.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Bambuí*.

1. Roteirização. 2. Heurísticas. 3. Simulação. 4. Geoprocessamento. 5. Eficiência operacional. I. Campos, Bruna Aparecida Rezende. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Bambuí*. III. Título.

CDD 658.788

Catálogo: João Batista Rodrigues - CRB-6/2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Bambuí
Diretoria de Ensino

Departamento de Engenharia e Computação

Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

Bruna Fernandes Figueiredo Brum

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ENTREGA COM USO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO E DADOS GEOGRÁFICOS REAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Produção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Bambuí para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovado em 03/06/2026 pela banca examinadora:

Bambuí, 03 de junho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Aparecida Rezende Campos, Professora**, em 03/06/2026, às 14:21, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Alberto Soares Oliveira, Professor EBTT**, em 03/06/2026, às 14:22, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Herman da Silva, Professor**, em 03/06/2026, às 14:22, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Augusto Soares, Professor**, em 03/06/2026, às 14:22, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2758495** e o código CRC **1C086A52**.

23209.001007/2026-55	2758495v1
----------------------	-----------

*Dedico este trabalho àqueles que
estiveram comigo nas trincheiras da vida,
compartilhando desafios, sonhos e conquistas.
À minha família, por todo amor, incentivo e
suporte ao longo desta caminhada. Ao meu
noivo, por estar ao meu lado nos momentos
mais difíceis, pela paciência, companheirismo
e por nunca me deixar desistir dos meus
objetivos. E, de forma especial, ao meu pai,
que, mesmo ausente fisicamente, permanece
vivo em meu coração, inspirando meus passos
e minhas conquistas. Esta conquista é nossa!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para superar os desafios e concluir esta importante etapa da minha vida.

À minha mãe, por todo amor, dedicação e incentivo ao longo da minha trajetória. Obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos e por me ensinar, por meio do exemplo, a importância da perseverança diante das dificuldades.

Ao meu pai, em memória, que foi um dos grandes incentivadores da minha educação e dos meus sonhos. Embora não esteja presente fisicamente para celebrar este momento, sua lembrança, seus ensinamentos e seu amor permanecem vivos em meu coração e me acompanham em cada conquista.

Ao meu noivo, pelo companheirismo, paciência e incentivo durante esta jornada. Obrigada por compartilhar meus sonhos, me apoiar nos momentos de incerteza e caminhar ao meu lado.

À minha família e aos meus amigos, pelo carinho, compreensão e apoio constantes, que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

À professora Bruna Aparecida Rezende Campos, minha orientadora, pela dedicação, orientação e valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Bruno Alberto Soares Oliveira, coorientador deste estudo, pelas sugestões e conhecimentos compartilhados ao longo da pesquisa.

Aos membros da banca avaliadora, pelas observações e sugestões que contribuíram para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí e a todos os professores e servidores que fizeram parte da minha formação acadêmica, pelos conhecimentos transmitidos e pela contribuição para meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a concretização deste sonho.

RESUMO

A crescente demanda por eficiência em processos logísticos tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas computacionais voltadas à otimização de rotas de entrega, especialmente em contextos em que tempo e custo são fatores críticos. Este trabalho visou ao desenvolvimento e validação de um sistema web de apoio à decisão para roteirização, com foco na aplicabilidade em pequenas e médias empresas. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quali-quantitativa e natureza experimental, estruturada como prova de conceito. O sistema foi desenvolvido em Python, utilizando o framework Flask e banco de dados SQLite, integrado a serviços baseados em dados geográficos reais, como OpenStreetMap e Open Source Routing Machine. Para definição das rotas, empregaram-se métodos heurísticos, com destaque para o algoritmo do vizinho mais próximo, além da comparação com soluções automatizadas. A validação ocorreu por meio de simulações com seis entregas, considerando três cenários: ordem de chegada, distância euclidiana e malha viária real. Os resultados indicaram redução de 18,75% na distância total percorrida em relação ao cenário não otimizado, além de maior precisão na modelagem com uso de dados reais. Conclui-se que a abordagem proposta evidencia viabilidade prática e potencial de aplicação.

Palavras-chave: Roteirização. Heurísticas. Simulação. Geoprocessamento. Eficiência operacional.

ABSTRACT

The growing demand for efficiency in logistics processes has driven the development of computational tools aimed at optimizing delivery routes, especially in contexts where time and cost are critical factors. This study aims to develop and validate a web-based decision support system for routing, focusing on its applicability in small and medium-sized enterprises. This is an applied research study with a qualitative-quantitative approach and an experimental nature, structured as a proof of concept. The system was developed in Python, using the Flask framework and an SQLite database, integrated with services based on real geographic data, such as OpenStreetMap and Open Source Routing Machine. Heuristic methods were employed for route definition, with emphasis on the Nearest Neighbor algorithm, along with comparisons to automated solutions. Validation was carried out through simulations involving six deliveries, considering three scenarios: order of arrival, Euclidean distance, and real road network. The results indicated a reduction of approximately 18.75% in the total distance traveled compared to the non-optimized scenario, as well as greater accuracy in modeling when using real data. It is concluded that the proposed approach demonstrates practical feasibility and application potential.

Keywords: Dairy cattle. Ketosis., β -hydroxybutyrate e C-reactive protein.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interface do Roteirizador com TSP.....	14
Figura 2 – Representação Visual da Rota no Sistema.....	15
Figura 3 – Relatório de Rota Otimizada.....	17
Figura 4 – Rota por Ordem de Chegada com Uso do Google Maps	19
Figura 5 – Rota Gerada pela Heurística Baseada em Distância Euclidiana.....	21
Figura 6 – Cálculo das Distâncias dos Trechos da Rota Euclidiana	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 METODOLOGIA.....	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
3.1 Análise da Rota sem Otimização.....	19
3.2 Estimativa de Distância em Linha Reta com Heurística de Proximidade.....	20
3.3 Roteirização Otimizada com Dados Reais e Discussão dos Resultados.....	22
4 CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência nos processos logísticos tem impulsionado o desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à otimização de rotas de entrega. Em um cenário no qual o tempo e o custo de deslocamento impactam diretamente a competitividade das organizações, a utilização de sistemas capazes de planejar trajetos mais eficientes torna-se um diferencial estratégico. Além disso, a gestão eficiente do transporte é considerada um dos principais fatores para a redução de custos logísticos e melhoria do nível de serviço ao cliente (BALLOU, 2006).

Embora grandes empresas disponham de sistemas avançados de roteirização, muitas pequenas e médias organizações ainda enfrentam dificuldades para acessar essas tecnologias, seja pelo alto custo de aquisição, seja pela complexidade de implementação. Nesse contexto, o desenvolvimento de soluções computacionais de baixo custo, baseadas em tecnologias acessíveis e de código aberto, configura-se como uma alternativa viável para ampliar o acesso a ferramentas de apoio à gestão logística. Estudos recentes destacam que a otimização de entregas de última milha tem se beneficiado de abordagens orientadas por dados, contribuindo para maior eficiência operacional e melhor tomada de decisão (CHU *et al.*, 2023). Apesar desses avanços e da ampla literatura sobre o Problema do Caixeiro Viajante e sistemas de roteirização, muitas abordagens ainda se concentram em modelos teóricos ou em soluções proprietárias, havendo uma lacuna na integração entre métodos heurísticos de baixo custo e dados geográficos reais em aplicações acessíveis a pequenas e médias empresas.

A determinação da melhor rota entre múltiplos pontos pode ser modelada por meio do Problema do Caixeiro Viajante (Traveling Salesman Problem – TSP), amplamente estudado na área de otimização combinatória. O TSP consiste em encontrar o menor percurso que visita um conjunto de localidades exatamente uma vez e retorna ao ponto de origem, sendo classificado como NP-difícil, o que implica elevada complexidade computacional e limita a aplicação de métodos exatos em instâncias de maior escala (CORMEN *et al.*, 2009).

Além da definição da sequência de visitas, o cálculo de distâncias em aplicações reais não pode se restringir a modelos geométricos simplificados, como a distância euclidiana. Em ambientes urbanos, é necessário considerar a estrutura da malha viária, incluindo ruas, interseções e restrições de circulação, de modo a representar, mais

fielmente, as condições reais de deslocamento (DE BERG *et al.*, 2008). Nesse contexto, o uso de bases de dados geográficas colaborativas, como o OpenStreetMap (OPENSTREETMAP, 2026), tem ampliado a disponibilidade de informações espaciais para aplicações de roteirização, possibilitando o desenvolvimento de soluções mais precisas e acessíveis.

A representação de redes viárias é frequentemente realizada por meio de grafos, nos quais interseções são modeladas como vértices, e os trechos de vias, como arestas associadas a custos, como distância ou tempo de deslocamento. A partir dessa modelagem, algoritmos de menor caminho podem ser empregados para identificar percursos de menor custo entre diferentes pontos da rede. Entre os mais conhecidos, está o algoritmo de Dijkstra, que identifica o caminho mínimo entre dois vértices em um grafo ponderado, sendo amplamente utilizado em sistemas de navegação e roteirização (DIJKSTRA, 1959; CORMEN *et al.*, 2009). Esses algoritmos constituem a base de diversos serviços de roteamento apoiados em dados geográficos reais, possibilitando a obtenção de trajetos mais aderentes às condições de circulação urbana.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema web para otimização de rotas de entrega, utilizando a linguagem Python e o *framework* Flask, integrado a serviços de roteamento baseados em dados geográficos reais. O sistema proposto visa organizar a sequência de entregas de forma eficiente, calcular a distância total percorrida e fornecer suporte à tomada de decisão no processo logístico. Além disso, busca oferecer uma solução acessível, com potencial de aplicação em pequenas e médias empresas, contribuindo para a redução das distâncias percorridas, dos custos operacionais e do tempo necessário à realização das entregas, favorecendo a eficiência operacional.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, uma vez que tem como objetivo gerar conhecimentos voltados à solução de problemas específicos, com aplicação prática imediata (GIL, 2008). Quanto à abordagem, a pesquisa é classificada como qualitativa e quantitativa, pois envolve tanto a interpretação dos resultados obtidos quanto a análise de dados numéricos relacionados às distâncias e rotas geradas pelo sistema (LAKATOS; MARCONI, 2010).

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa experimental, pois envolve o desenvolvimento e a validação de um sistema computacional em ambiente controlado, com o objetivo de avaliar seu desempenho e aplicabilidade (GIL, 2008). Além disso, o estudo configura-se como uma prova de conceito ao demonstrar a viabilidade da utilização de tecnologias acessíveis para a otimização de rotas logísticas.

O sistema de roteirização empregado neste trabalho foi desenvolvido pelos próprios autores utilizando a linguagem de programação Python, em conjunto com o framework Flask, devido à sua leveza e flexibilidade na construção de aplicações web. Para o armazenamento dos dados, empregou-se o banco de dados SQLite, adequado a aplicações de pequeno e médio porte e alinhado à proposta do sistema. Com vistas à reprodutibilidade da pesquisa, o código-fonte encontra-se disponibilizado em repositório público, permitindo a verificação e replicação dos resultados obtidos (GABRIEL, 2026).

A arquitetura do sistema é composta por três camadas principais: interface do usuário, processamento lógico e armazenamento de dados. A interface do usuário, conforme ilustrado na Figura 1, é responsável pela interação com o sistema, permitindo o cadastro e a remoção de endereços de entrega, bem como a visualização dos resultados gerados.

Figura 3 – Relatório de Rota Otimizada

Relatório de Rota Otimizada**Ponto inicial:**

Empresa

Lat: -20.0162

Lon: -45.9764

Distância total da rota: 6.5 km

Ordem	Endereço	Latitude	Longitude
1	Empresa	-20.0162	-45.9764
2	Rua Bahia, 161, Nossa Senhora de Fátima	-20.016315	-45.9716995
3	Rua Tupis, 210, Açudes	-20.0208132	-45.9753658
4	Rua Jonas Gomes Teixeira, 292, Nações	-20.020562	-45.9868019
5	Rua Juca Nunes, 149, Vista Alegre	-20.0224838	-45.9767423
6	Rua Dr. Dilermando Alves da Cunha, 253, Centro	-20.0147307	-45.9786355
7	Rua Campo Belo, 84, Rola Moça	-20.0127309	-45.9705786
8	Empresa	-20.0162	-45.9764

Imprimir

FONTE: Elaborado pelos autores (2026).

A validação do sistema foi realizada por meio de simulações controladas, utilizando um conjunto de dados fictícios composto por seis entregas, caracterizando uma prova de conceito. A variável de análise considerada foi a distância total percorrida, expressa em quilômetros, por constituir um indicador diretamente relacionado ao consumo de recursos e ao tempo necessário para a realização das entregas.

Inicialmente, as entregas foram consideradas na ordem de chegada, sendo a rota gerada com o auxílio do Google Maps (GOOGLE, 2026), utilizada como referência prática. Em seguida, aplicou-se a abordagem heurística baseada na minimização da distância euclidiana. Por fim, foram geradas rotas considerando a malha viária real por meio do serviço OSRM, incorporando restrições como vias de circulação e sentidos de tráfego. Adicionalmente, utilizou-se o serviço de otimização do OSRM para fins comparativos. Essa estrutura experimental permitiu avaliar a eficiência da heurística proposta e sua aplicabilidade em cenários mais próximos das condições reais de operação, com base na redução percentual da distância total percorrida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos efetuados neste estudo foram conduzidos com base na malha viária da cidade de Bambuí, Minas Gerais, adotada como cenário de estudo por representar um contexto urbano de pequeno porte compatível com a realidade de pequenas e médias empresas. Durante o desenvolvimento do sistema de roteirização, diferentes abordagens foram exploradas com o objetivo de identificar a estratégia mais adequada para o cálculo de distâncias e definição das rotas de entrega. Inicialmente, adotou-se uma abordagem simplificada baseada no cálculo da distância em linha reta entre os pontos, devido à sua facilidade de implementação e baixo custo computacional. Entretanto, essa metodologia mostrou-se limitada por não considerar as restrições impostas pela malha viária real, motivando a incorporação de serviços baseados em dados geográficos reais por meio da integração com o OSRM.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema, considerou-se uma rota fictícia composta por seis entregas, na qual os pontos inicial e final correspondem à empresa. A escolha desse número de entregas foi fundamentada na realidade operacional observada em estabelecimentos de *delivery* de pequeno porte, comuns no município de Bambuí, em que os ciclos de distribuição, frequentemente, contemplam um conjunto reduzido de pedidos. Dessa forma, buscou-se representar uma situação próxima às condições reais de operação, mantendo a simplicidade necessária para a condução controlada do experimento.

Os resultados foram organizados em três cenários distintos: (i) rota definida sem otimização, baseada na ordem de chegada dos pedidos; (ii) rota estimada por meio de distâncias em linha reta associadas a uma heurística de proximidade; e (iii) rota otimizada considerando a malha viária real e técnicas de otimização. Essa estrutura permitiu comparar práticas operacionais usuais, modelos simplificados e a solução proposta.

Para garantir a comparabilidade dos resultados, os três cenários foram avaliados utilizando-se o mesmo conjunto de endereços de entrega. Os pontos considerados foram: Rua Tupis, Rua Dr. Dilermando Alves da Cunha, Rua Campo Belo, Rua Bahia, Rua Jonas Gomes Teixeira e Rua Juca Nunes, cadastrados inicialmente na mesma ordem em todas as análises. Essa configuração foi utilizada tanto no Google Maps quanto nas versões do sistema baseadas em distância euclidiana e em malha viária real por meio do OSRM. Dessa forma, as diferenças observadas entre os cenários decorrem

3.2 Estimativa de Distância em Linha Reta com Heurística de Proximidade

No segundo cenário, foi adotada uma abordagem intermediária na qual se buscou incorporar um critério de organização da rota utilizando um modelo simplificado para o cálculo das distâncias. Diferentemente do cenário anterior, em que a sequência das entregas foi definida pela ordem de chegada, nesta etapa, foi utilizada uma heurística baseada no critério do ponto mais próximo.

Nesse método, a rota é construída de forma sequencial, partindo do ponto de origem e selecionando, a cada etapa, o próximo ponto de entrega mais próximo ainda não visitado. Essa estratégia reduz deslocamentos desnecessários, embora não garanta a obtenção da solução ótima global.

Para o cálculo das distâncias, foi utilizada uma aproximação baseada nas coordenadas geográficas. A distância entre dois pontos foi estimada por meio de uma adaptação da distância euclidiana em coordenadas geográficas, com correção da componente longitudinal pelo cosseno da latitude média, conforme apresentado na Equação (1).

$$d \approx 111 \cdot \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\cos(\varphi) \cdot \Delta\lambda)^2} \quad (1)$$

Onde:

d = distância aproximada entre dois pontos (em quilômetros)

$\Delta\varphi$ = diferença de latitude entre os pontos (em graus)

$\Delta\lambda$ = diferença de longitude entre os pontos (em graus)

φ = latitude média entre os pontos (em graus)

O fator 111 corresponde à conversão aproximada de graus para quilômetros, considerando que 1 grau de latitude equivale, em média, a 111 km na superfície terrestre. Essa abordagem permite uma estimativa simplificada da distância, sendo adequada para aplicações de baixa complexidade computacional, embora não considere as variações da curvatura terrestre e as restrições da malha viária.

A rota obtida por meio da heurística baseada na distância euclidiana está exposta na Figura 5. Observa-se que a estratégia do vizinho mais próximo reorganiza a

sequência de visitas, com o objetivo de reduzir os deslocamentos totais em relação ao cenário sem otimização.

Figura 5 – Rota Gerada pela Heurística Baseada em Distância Euclidiana

Relatório de Rota Otimizada

Ponto inicial:

Empresa

Lat: -20.0162

Lon: -45.9764

Ordem	Endereço	Latitude	Longitude
1	Rua Dr. Dilermando Alves da Cunha, 253, Centro	-20.0147307	-45.9786355
2	Rua Tupis, 210, Açudes	-20.0208132	-45.9753658
3	Rua Juca Nunes, 149, Vista Alegre	-20.0224838	-45.9767423
4	Rua Bahia, 161, Nossa Senhora de Fátima	-20.016315	-45.9716995
5	Rua Campo Belo, 84, Rola Moça	-20.0127309	-45.9705786
6	Rua Jonas Gomes Teixeira, 292, Nações	-20.020562	-45.9868019
7	Empresa	-20.0162	-45.9764

Imprimir

FONTE: Elaborado pelos autores (2026).

As distâncias estimadas entre os pontos consecutivos da rota apresentada na Figura 5 são mostradas na Figura 6, sendo obtidas a partir da aplicação da Equação (1) às coordenadas geográficas dos endereços considerados.

Figura 6 – Cálculo das Distâncias dos Trechos da Rota Euclidiana

Trecho	Distância
Empresa → Dilermando	0,285 km
Dilermando → Tupis	0,756 km
Tupis → Juca Nunes	0,235 km
Juca Nunes → Bahia	0,863 km
Bahia → Campo Belo	0,415 km
Campo Belo → Jonas Gomes	1,902 km
Jonas Gomes → Empresa	1,188 km
Total	5,644 km ≈ 5,64 km

FONTE: Elaborado pelos autores (2026).

A aplicação dessa abordagem resultou em uma rota com distância total aproximada de 5,64 km, representando uma diminuição significativa em relação ao cenário sem otimização. Esse valor foi obtido pela soma das distâncias estimadas entre os pontos consecutivos da rota gerada pelo algoritmo do vizinho mais próximo, utilizando a aproximação baseada em coordenadas geográficas apresentada na Equação (1). O resultado evidencia a contribuição da heurística na organização do percurso, demonstrando que mesmo estratégias simples podem reduzir deslocamentos desnecessários quando comparadas à execução baseada apenas na ordem de chegada dos pedidos.

Apesar da melhoria observada, a abordagem apresenta limitações relevantes, uma vez que o uso da distância em linha reta desconsidera a malha viária e pode levar à escolha de trajetos que, embora próximos geometricamente, não representam os caminhos mais eficientes na prática. Dessa forma, embora a heurística contribua para a redução do percurso, a precisão do resultado permanece condicionada à simplificação adotada no cálculo das distâncias.

Esse resultado evidencia que a eficiência da roteirização depende não apenas da estratégia de ordenação dos pontos, mas também da forma como as distâncias são modeladas, reforçando a necessidade de integração com dados reais. Nesse contexto, a literatura recente destaca que abordagens heurísticas continuam sendo amplamente utilizadas em problemas de roteirização devido ao seu baixo custo computacional e à capacidade de produzir soluções de boa qualidade em tempo reduzido (COSTA *et al.*, 2021).

3.3 Roteirização Otimizada com Dados Reais e Discussão dos Resultados

No terceiro cenário, foi aplicada a versão mais completa do sistema, na qual a otimização da rota passa a considerar a malha viária real por meio da integração com o OSRM e dados do OpenStreetMap. Essa abordagem permite representar, de forma mais fiel, as condições de deslocamento urbano, uma vez que considera elementos como traçado das vias, interseções e sentidos de circulação.

Diferentemente do cenário anterior, a otimização passa a ser orientada por distâncias reais, considerando não apenas a proximidade geométrica entre os pontos, mas também a viabilidade prática dos trajetos. A roteirização analisada pode ser modelada como uma instância do Problema do Caixeiro Viajante (TSP), sendo tratada por meio da

heurística do vizinho mais próximo e dos recursos de otimização disponibilizados pelo OSRM. Segundo Cormen *et al.* (2009), esse tipo de problema apresenta elevada complexidade computacional, o que reforça a adoção de abordagens heurísticas em aplicações práticas de roteirização.

Como resultado, obteve-se uma rota com extensão total de 6,5 km, apresentada no relatório exibido na Figura 3. Embora esse valor seja superior ao obtido no cenário baseado em distância euclidiana (5,64 km), a consideração da malha viária permitiu uma representação mais realista dos deslocamentos. Assim, mesmo apresentando uma distância maior, a rota obtida tende a fornecer estimativas mais confiáveis de percurso e tempo de execução, tornando-se mais adequada para aplicações práticas.

Ao comparar a rota otimizada (6,5 km) com o cenário sem otimização (8,0 km), constata-se uma redução de 18,75% na distância total percorrida, equivalente a 1,5 km. Apesar de o experimento ter sido conduzido com apenas seis pontos de entrega, a redução observada indica potencial para gerar impactos operacionais positivos.

Em operações de *delivery*, a diminuição do percurso tende a reduzir o tempo necessário para a realização das entregas, possibilitando melhor aproveitamento da capacidade operacional do entregador e potencial aumento do número de atendimentos por ciclo. Além desses benefícios, a utilização de rotas previamente planejadas contribui para maior previsibilidade das operações, permitindo estimativas mais consistentes dos tempos de deslocamento e favorecendo o planejamento das atividades logísticas. Como consequência, reduz-se a dependência de decisões tomadas durante a execução das entregas, promovendo maior padronização do processo. Dessa forma, os resultados indicam que os benefícios da otimização de rotas podem ir além da economia de combustível, abrangendo, também, ganhos de produtividade, maior previsibilidade operacional e aprimoramento do planejamento logístico.

Como consequência, também podem ser obtidos benefícios econômicos associados à redução do consumo de combustível e do desgaste da frota. Considerando um consumo médio de 10 km/L e custo de combustível de R\$ 6,00 por litro, a redução observada de 1,5 km corresponderia a uma economia aproximada de R\$ 0,90 por ciclo de entrega. Embora esse valor seja modesto no cenário experimental adotado, seu impacto tende a se tornar mais expressivo em operações com maior volume de entregas e múltiplos ciclos diários. Nesse contexto, pequenas reduções de distância acumuladas ao longo do tempo podem resultar em economias significativas de combustível, menor desgaste dos

veículos e redução dos custos operacionais, ampliando os benefícios da otimização de rotas em aplicações reais.

Os resultados também demonstraram a importância da modelagem adequada das distâncias em problemas de roteirização. A comparação entre os cenários baseados em distância euclidiana e malha viária real evidenciou que abordagens fundamentadas apenas na proximidade geométrica podem subestimar as distâncias efetivamente percorridas, destacando a necessidade do uso de dados geográficos aderentes às condições reais de operação.

Dessa forma, os resultados revelaram que a integração entre algoritmos de otimização e dados reais da malha viária constitui um aspecto fundamental para a obtenção de rotas mais aderentes às condições reais de operação. Esse achado está alinhado com estudos recentes que destacam a contribuição de abordagens orientadas por dados para o aprimoramento de sistemas de roteirização em contextos urbanos e de última milha (CHU *et al.*, 2023).

Além disso, os resultados evidenciaram que soluções baseadas em tecnologias acessíveis podem contribuir para ganhos de eficiência operacional, especialmente em pequenas e médias empresas, contribuindo para a redução de deslocamentos desnecessários, melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e maior agilidade na execução das entregas.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema web de otimização de rotas de entrega, com o propósito de demonstrar a aplicação prática de conceitos de otimização, logística e desenvolvimento de sistemas no contexto da Engenharia de Produção.

A proposta evidenciou a viabilidade do uso de tecnologias acessíveis na construção de ferramentas de apoio à decisão para operações logísticas. Nesse contexto, o sistema desenvolvido mostrou-se capaz de fornecer informações relevantes para o planejamento das entregas, auxiliando gestores e operadores na definição de rotas mais eficientes e contribuindo para decisões mais fundamentadas no processo logístico.

Os resultados obtidos indicam que a utilização de técnicas de roteirização pode gerar melhorias significativas no desempenho operacional. A análise comparativa entre os cenários demonstrou que a reorganização das entregas por meio de heurísticas proporciona ganhos relevantes em relação à execução baseada apenas na ordem de chegada dos pedidos. Além disso, a incorporação de dados reais da malha viária, por meio da integração com o OSRM e o OpenStreetMap, possibilitou a obtenção de rotas mais precisas e aderentes às condições reais de deslocamento.

A redução de 18,75% na distância total percorrida, mesmo em um cenário simplificado com seis pontos de entrega, evidencia o potencial da solução proposta para aprimorar o desempenho das operações logísticas. Embora os valores absolutos observados sejam limitados pela escala do experimento, os resultados indicam que, em aplicações com maior volume de entregas, os benefícios podem ser ampliados, refletindo-se na redução dos tempos de deslocamento, melhor aproveitamento dos recursos operacionais, aumento da produtividade e diminuição dos custos logísticos.

Do ponto de vista metodológico, o estudo demonstrou a importância da modelagem adequada das distâncias. Embora a abordagem euclidiana tenha se mostrado útil como aproximação inicial, suas limitações frente às condições reais de deslocamento reforçam a necessidade da utilização de modelos baseados em redes viárias em aplicações práticas. Esse resultado está em consonância com pesquisas recentes que evidenciam a contribuição das abordagens heurísticas e orientadas por dados para a obtenção de soluções eficientes em problemas de roteirização (COSTA *et al.*, 2021; CHU *et al.*, 2023).

Ademais, destaca-se como contribuição do trabalho a integração entre métodos heurísticos e dados geográficos reais em um ambiente computacional acessível,

evidenciando uma alternativa viável para pequenas e médias empresas que buscam aprimorar seus processos de roteirização sem a necessidade de soluções proprietárias de elevado custo. Dessa forma, o estudo contribui para ampliar o acesso a ferramentas de apoio à decisão logística em organizações com recursos tecnológicos mais limitados.

Por fim, o sistema desenvolvido cumpre seu papel como prova de conceito, demonstrando a integração entre teoria e prática e contribuindo para a aplicação de conceitos de otimização logística em um contexto realista e acessível. Além da redução das distâncias percorridas, a solução proposta apresentou potencial para apoiar o planejamento operacional, aumentar a previsibilidade das entregas e contribuir para processos logísticos mais eficientes, especialmente em operações de pequeno e médio porte.

Como trabalhos futuros, sugerem-se a ampliação dos testes com dados reais, a inclusão de múltiplos veículos e restrições operacionais, como janelas de tempo e capacidade de carga, e também a aplicação de algoritmos mais robustos, visando aprimorar a qualidade das soluções e ampliar o potencial de aplicação da ferramenta em contextos reais.

REFERÊNCIAS

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 2006.

CHU, H. *et al.* Data-driven optimization for last-mile delivery. **Complex & Intelligent Systems**, v. 9, p. 2271–2284, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00293-1>
Acesso em: 29 abr. 2026.

CORMEN, T. H. *et al.* **Introduction to algorithms**. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 2009.

COSTA, P. da *et al.* Learning 2-opt heuristics for routing problems via deep reinforcement learning. **SN Computer Science**, v. 2, art. 388, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00779-2>
Acesso em: 29 abr. 2026.

DE BERG, M. *et al.* **Computational geometry: algorithms and applications**. 3. ed. Berlin: Springer, 2008.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269–271, 1959.

GABRIEL, G. **Roteirizador** [repositório de código]. GitHub, 2026. Disponível em: <https://github.com/gabrielhgcm-star/roteirizador>. Acesso em: 29 abr. 2026.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
GOOGLE. Google Maps. Disponível em: <https://maps.google.com>. Acesso em: 29 abr. 2026.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

NOMINATIM. **OpenStreetMap Nominatim**. Disponível em: <https://nominatim.openstreetmap.org>. Acesso em: 29 abr. 2026.

OPENSTREETMAP. **OpenStreetMap**. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>. Acesso em: 29 abr. 2026.

OSRM. **Open Source Routing Machine**. Disponível em: <http://project-osrm.org>. Acesso em: 29 abr. 2026.