

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Emerson Aparecido Martins. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC MC

emersonfinal@hotmail.com

Guilherme Lima Antebi. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC MC

guiantebi@gmail.com

Rafael de Almeida. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC MC

rafael.almeida.oficial04@gmail.com

Fretz Siervez Junior. Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC MC

Fretz.junior3@fatec.sp.gov.br

RESUMO

O crescimento exponencial do e-commerce intensificou os desafios logísticos da "última milha", a etapa final da entrega, caracterizada por alta complexidade, custos elevados e impacto direto na satisfação do cliente e na sustentabilidade. Neste contexto, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma solução robusta para a otimização de rotas. O presente trabalho objetiva avaliar e comparar o desempenho de duas meta-heurísticas bio-inspiradas: Algoritmos Genéticos (GA) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO). Foi desenvolvida uma simulação aplicada a um conjunto de 100 pontos de entrega aleatórios, executando ambos os algoritmos sob condições computacionais e parâmetros equivalentes (1000 iterações/gerações) para minimizar a distância total percorrida. Os resultados demonstraram a eficácia de ambos os métodos em otimizar as rotas iniciais. Contudo, a análise comparativa revelou uma superioridade do ACO, que alcançou uma *redução percentual da distância de 17,9%, superando os **14,9%* obtidos pelo GA. Além disso, o ACO apresentou uma convergência mais rápida, estabilizando a solução por volta da iteração 200, enquanto o GA necessitou de aproximadamente 300 gerações. Conclui-se que, para o cenário simulado, o modelo cooperativo do ACO se mostrou mais robusto e eficiente na resolução do problema de roteirização.

Palavras-chave: Última Milha; Inteligência Artificial; E-commerce

Data de recebimento: 21/11/2025

Data do aceite de publicação: 30/12/2025

Data da publicação: 30/12/2025

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN LAST-MILE DELIVERY OPTIMIZATION FOR E-COMMERCE

ABSTRACT

The exponential growth of e-commerce has intensified the logistical challenges of the "last mile," the final stage of delivery, which is characterized by high complexity, significant costs, and a direct impact on customer satisfaction and sustainability. In this context, Artificial Intelligence (AI) emerges as a robust solution for route optimization. This paper aims to evaluate and compare the performance of two bio-inspired metaheuristics: Genetic Algorithms (GA) and Ant Colony Optimization (ACO). A simulation was developed and applied to a set of 100 random delivery points, running both algorithms under equivalent computational conditions and parameters (1000 iterations/generations) to minimize the total distance traveled. The results demonstrated the effectiveness of both methods in optimizing the initial routes. However, the comparative analysis revealed the superiority of ACO, which achieved a *percentage distance reduction of 17.9%, surpassing the **14.9%* obtained by GA. Furthermore, ACO exhibited faster convergence, stabilizing the solution around iteration 200, whereas GA required approximately 300 generations. It is concluded that, for the simulated scenario, the cooperative model of ACO proved to be more robust and efficient in solving the routing problem.

Keywords: Last-Mile Delivery; Artificial Intelligence; E-commerce

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do e-commerce intensificou o desafio logístico da “última milha”, etapa final da entrega que concentra parcela significativa do custo total e forte impacto na percepção de qualidade do serviço pelo cliente final (SILVA; AMARAL; FONTES, 2023). Essa fase enfrenta problemas recorrentes de congestionamentos urbanos, endereços imprecisos, janelas de entrega rígidas e alta variabilidade de demanda, o que torna a operação complexa, onerosa e ambientalmente sensível (GHANEM et al., 2025). Além do custo e da eficiência operacional, a sustentabilidade também é um ponto crítico, dado o aumento nas emissões de gases poluentes decorrentes do transporte nessa fase, motivando o estudo de soluções mais verdes para a distribuição urbana (POURMOHAMMADREZA et al., 2025).

Estudos apontam que soluções alternativas de entrega, como pontos de retirada, lockers e estações de encomendas, vêm sendo adotadas para mitigar falhas de entrega e reduzir deslocamentos redundantes nas cidades (POURMOHAMMADREZA et al., 2025). Medidas de logística sustentável para empresas de courier, express e parcel (CEP) indicam que a combinação de veículos de baixa emissão, pontos de coleta e consolidação de cargas pode reduzir custos e emissões simultaneamente (GHANEM et al., 2025; KOTLARS; SKRIBANS, 2025). Nesse cenário, a Inteligência Artificial (IA) surge como tecnologia habilitadora para conciliar objetivos econômicos, nível de serviço e impactos ambientais em operações de última milha (HOFMANN; RÜSCH, 2017; OLIVEIRA, 2024).

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

A utilização de IA em logística de última milha permite integrar dados históricos e em tempo real sobre tráfego, clima, demanda e comportamento de clientes, gerando planos de rotas mais curtos, robustos e adaptativos (EZMIGNA; ALGHAMDI, 2024; TIWARI et al., 2023). Abordagens baseadas em aprendizado de máquina podem ser usadas como heurísticas eficientes em problemas combinatórios complexos de roteirização, atingindo qualidade de solução adequada em tempos compatíveis com exigências operacionais (BRUNI et al., 2023). Além disso, ferramentas de IA aplicadas à última milha no e-commerce contribuem para reduzir tempos de entrega, falhas de serviço e variabilidade do desempenho, aumentando a satisfação do consumidor (EZMIGNA; ALGHAMDI, 2024).

Nesse contexto, torna-se relevante investigar como algoritmos de IA, em particular meta-heurísticas bio-inspiradas como Algoritmos Genéticos (GA) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO), podem ser aplicados para otimizar rotas de última milha no e-commerce (GOLDBERG, 1989; DORIGO; STÜTZLE, 2004). O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar o desempenho de GA e ACO em um cenário simulado com 100 pontos de entrega, buscando entender em que medida essas abordagens conseguem reduzir a distância total percorrida e melhorar o desempenho da operação em termos de eficiência e potencial impacto ambiental (MARTINS et al., 2025).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A otimização de rotas na logística de última milha é geralmente modelada como um Problema de Roteirização de Veículos (Vehicle Routing Problem – VRP), que por sua vez generaliza o clássico Problema do Caixeiro Viajante (Travelling Salesman Problem – TSP) (LAPORTE, 1992). O VRP é reconhecido como um problema NP-difícil, o que torna inviável, na prática, a utilização de métodos exatos em instâncias de grande porte típicas de operações de e-commerce, sobretudo quando há múltiplas restrições e objetivos (PANGARIBUAN, 2025; CRIADO; LAPORTE, 2018). Em função disso, a literatura tem se concentrado em heurísticas e meta-heurísticas capazes de encontrar soluções de boa qualidade em tempos computacionais aceitáveis (PANGARIBUAN, 2025).

Revisões recentes sobre o VRP destacam que métodos baseados em meta-heurísticas, como Algoritmos Genéticos, ACO, busca tabu e busca em vizinhança variável, são largamente adotados para tratar variantes com janelas de tempo, múltiplos depósitos e restrições de capacidade (PANGARIBUAN, 2025; CRIADO; LAPORTE, 2018). Ao mesmo tempo, estudos voltados à logística sustentável mostram que as variantes de VRP para última milha incorporam cada vez mais objetivos ambientais, como redução de emissões de CO₂ e ruído (POURMOHAMMADREZA et al., 2025; REN et al., 2023).

No contexto específico da última milha, a adoção de locais alternativos de entrega, como lockers e pontos de coleta, é apontada como forma de melhorar a eficiência e a sustentabilidade da operação, ao reduzir tentativas de entrega fracassadas e distâncias percorridas (POURMOHAMMADREZA et al., 2025). Medidas de logística para provedores de serviços CEP indicam que a combinação de veículos elétricos, bicicletas de carga e pontos de coleta permite ganhos significativos em custos e emissões em cidades de pequeno e médio porte (GHANEM et al., 2025). Revisões sobre soluções inovadoras em última milha reforçam a importância da automação e da robotização, incluindo drones, robôs de entrega e estações inteligentes de encomendas (SLOBINAC, 2023; KOTLARS; SKRIBANS, 2025).

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Dentro desse cenário, a Inteligência Artificial surge como um novo paradigma para superar as limitações de métodos estáticos de planejamento de rotas (HOFMANN; RÜSCH, 2017). Abordagens baseadas em aprendizado de máquina para a última milha e logística de terceiros mostram que modelos de ML podem apoiar a tomada de decisão em problemas estocásticos com grande número de variáveis binárias e incertezas na demanda (BRUNI et al., 2023). Ferramentas de IA aplicadas à última milha permitem ajustes quase em tempo real a partir de dados de rastreamento, histórico de atrasos e preferências de clientes, aumentando a flexibilidade e a confiabilidade do serviço (EZMIGNA; ALGHAMDI, 2024).

Entre as meta-heurísticas aplicadas a problemas de roteirização, os Algoritmos Genéticos ocupam posição de destaque desde os trabalhos clássicos de Goldberg (GOLDBERG, 1989). Em aplicações recentes, GA são frequentemente combinados com estratégias de elitismo, operadores de cruzamento especializados e busca local, o que melhora a velocidade de convergência e a qualidade final das rotas em cenários de última milha (CRIANIC; LAPORTE, 2018; MARTINS et al., 2025). Já a Otimização por Colônia de Formigas, formalizada por Dorigo e Stützle, utiliza o comportamento coletivo de formigas artificiais que depositam e evaporam feromônio em rotas candidatas, reforçando caminhos promissores e abandonando soluções menos eficientes (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

Versões aprimoradas da ACO para o VRP com coleta e entrega fracionadas demonstram que ajustes nos parâmetros de feromônio e na integração com busca local podem gerar soluções significativamente melhores em termos de custo e emissões (REN et al., 2023). Outros trabalhos apontam para o uso de meta-heurísticas híbridas, combinando ACO, GA e busca em vizinhança variável, com resultados promissores em problemas de roteirização com múltiplos objetivos e restrições complexas (CRIADO; LAPORTE, 2018; KALAYCI; CAN, 2021). Em síntese, observa-se uma clara tendência de migração de métodos puramente heurísticos para abordagens dinâmicas e inteligentes baseadas em IA, com ênfase nas operações de última milha em e-commerce, onde a capacidade de aprendizado, adaptação e previsão se traduz em ganhos de eficiência, sustentabilidade e satisfação do cliente (POURMOHAMMADREZA et al., 2025; BRUNI et al., 2023).

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem exploratória e aplicada, com foco em investigar e demonstrar a eficácia de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) — especificamente o Algoritmo Genético (GA) e a Otimização por Colônia de Formigas (ACO) — na otimização de rotas de última milha no contexto do e-commerce.

A pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais, contemplando revisão bibliográfica, modelagem conceitual, desenvolvimento experimental e análise comparativa dos resultados obtidos.

3.1 Tipo e Abordagem da Pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa e quantitativa.

O caráter qualitativo se manifesta na análise conceitual e interpretativa da literatura científica sobre algoritmos de otimização e logística de última milha.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Já o aspecto quantitativo é evidenciado na aplicação prática dos algoritmos GA e ACO em cenários simulados, com coleta e análise de métricas de desempenho, tais como distância total percorrida, tempo médio de entrega e custo logístico estimado

3.2 Procedimentos Metodológicos

A metodologia foi dividida em quatro fases principais: revisão bibliográfica, modelagem do problema, implementação e experimentação, e análise dos resultados.

3.2.1 Revisão Bibliográfica

Foi conduzida uma revisão sistemática de artigos, dissertações e publicações científicas recentes, com ênfase em estudos sobre:

Otimização de rotas de transporte e distribuição,

Algoritmos genéticos e heurísticas evolutivas,

Otimização por colônia de formigas (ACO),

Aplicações de IA e aprendizado de máquina em logística de última milha e sistemas de e-commerce.

Essa etapa fundamentou o embasamento teórico e orientou a modelagem conceitual do problema.

3.2.2 Modelagem do Problema

O problema foi formalizado como uma instância do Problema de Roteirização de Veículos (VRP), com foco na minimização da distância total percorrida por um único veículo.

3.2.3 Implementação e Experimentação

Nesta fase, foram implementados e comparados dois algoritmos de IA:

Algoritmo Genético (GA), inspirado na teoria da evolução e seleção natural.

Otimização por Colônia de Formigas (ACO), inspirada no comportamento coletivo de formigas em busca de alimento.

Ambos foram desenvolvidos em Python 3.12, utilizando bibliotecas NumPy e Matplotlib, e executados em ambiente controlado (Intel Core i7, 16 GB RAM).

a) Configuração dos experimentos

Número de pontos (endereços): 100.

População (GA) / Colônia (ACO): 2000 indivíduos/formigas.

Número de gerações/iterações: 1000.

Taxa de mutação (GA): 0.2.

Elitismo (GA): 2 indivíduos.

Parâmetros do ACO: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.5$, $Q = 100$.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

sendo:

α = peso do feromônio.

β = peso da heurística.

ρ = Taxa de evaporação de feromônio.

Q = Quantidade de feromônio depositado.

b) Cenário simulado

Os pontos foram gerados aleatoriamente dentro de um espaço bidimensional, representando endereços urbanos de entrega.

Cada ponto é definido por coordenadas (x,y), e a distância entre dois pontos.

i e j é calculada pela fórmula:

$$d(P_i, P_j) = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

c) Avaliação

Os algoritmos foram avaliados pela função de aptidão (fitness), que mede a distância total da rota.

Os resultados foram monitorados a cada iteração, gerando gráficos de convergência e mapas visuais das rotas inicial e otimizada.

3.2.4 Análise dos Resultados

Os resultados experimentais foram analisados por meio de técnicas estatísticas descritivas, comparando a eficiência e a estabilidade de cada algoritmo.

Foram observados:

O grau de convergência (redução progressiva da distância total);

A velocidade de aprendizado (quantas iterações até estabilização);

O equilíbrio entre exploração e intensificação da busca;

O impacto da aleatoriedade sobre o desempenho final.

Além da comparação direta entre GA e ACO, a análise discutiu:

A capacidade adaptativa das soluções em cenários dinâmicos (como inserção de novos pedidos ou mudanças de tráfego);

Os impactos operacionais e sustentáveis da aplicação de IA em logística urbana;

As possibilidades de integração com sistemas de rastreamento em tempo real (IoT).

3.3 Materiais e Ferramentas

Linguagem: Python 3.12

Bibliotecas: NumPy, Pandas, Scikit-learn, DEAP (para GA), Matplotlib

Ambiente: Processador Intel Core i7, 16 GB RAM

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

3.4 Limitações do Estudo

O estudo foi realizado em ambiente simulado, com dados sintéticos.

Variáveis externas de difícil controle — como condições meteorológicas, comportamento humano de motoristas e restrições viárias temporárias — não foram consideradas.

Para pesquisas futuras, recomenda-se:

Aplicar os algoritmos em cenários reais com dados de tráfego em tempo real;

Integrar o modelo com sistemas IoT e redes neurais para ajuste dinâmico de rotas;

Ampliar a abordagem para o VRP com múltiplos veículos e restrições de capacidade.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

4.1. Visão Geral dos Experimentos

Foram conduzidos dois experimentos independentes, correspondentes à aplicação do Algoritmo Genético (GA) e da Otimização por Colônia de Formigas (ACO) sobre o mesmo conjunto de 100 pontos simulados, representando endereços urbanos de entrega.

Ambos os algoritmos foram executados sob as mesmas condições computacionais (Intel Core i7, 16 GB RAM) e parâmetros equivalentes de iteração, permitindo uma análise comparativa direta da eficiência e estabilidade de convergência.

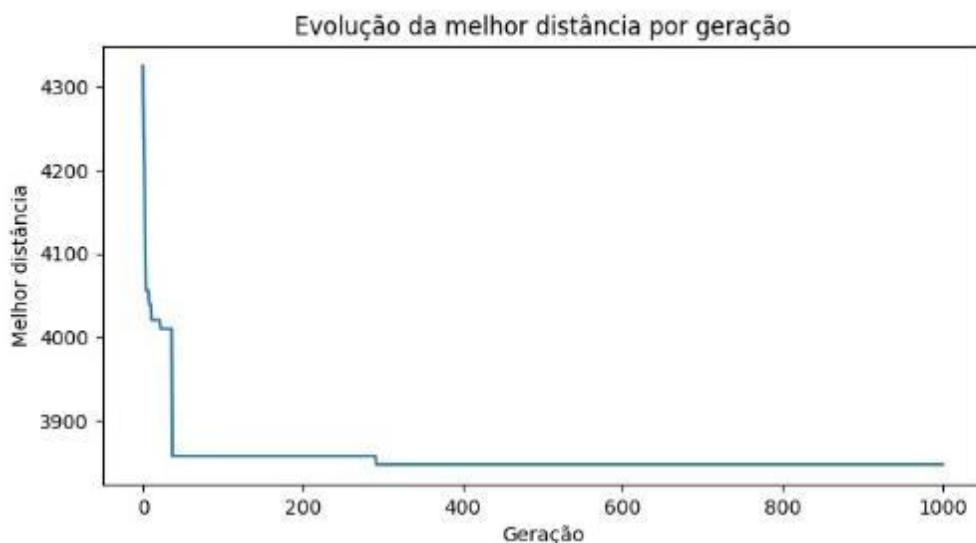
O objetivo principal dos experimentos foi minimizar a distância total percorrida pelo veículo, avaliando a capacidade de cada algoritmo em gerar rotas mais curtas e organizadas a partir de um cenário inicial totalmente aleatório.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

4.2. Resultados do Algoritmo Genético (GA)

4.2.1. Convergência da Solução

O comportamento do GA é ilustrado no gráfico “Evolução da melhor distância por geração”.



Fonte: Autores, 2025

A curva demonstra uma redução acentuada da distância total nas primeiras 200 gerações, seguida por um período de estabilização gradual, evidenciando o processo típico de convergência de um algoritmo evolutivo.

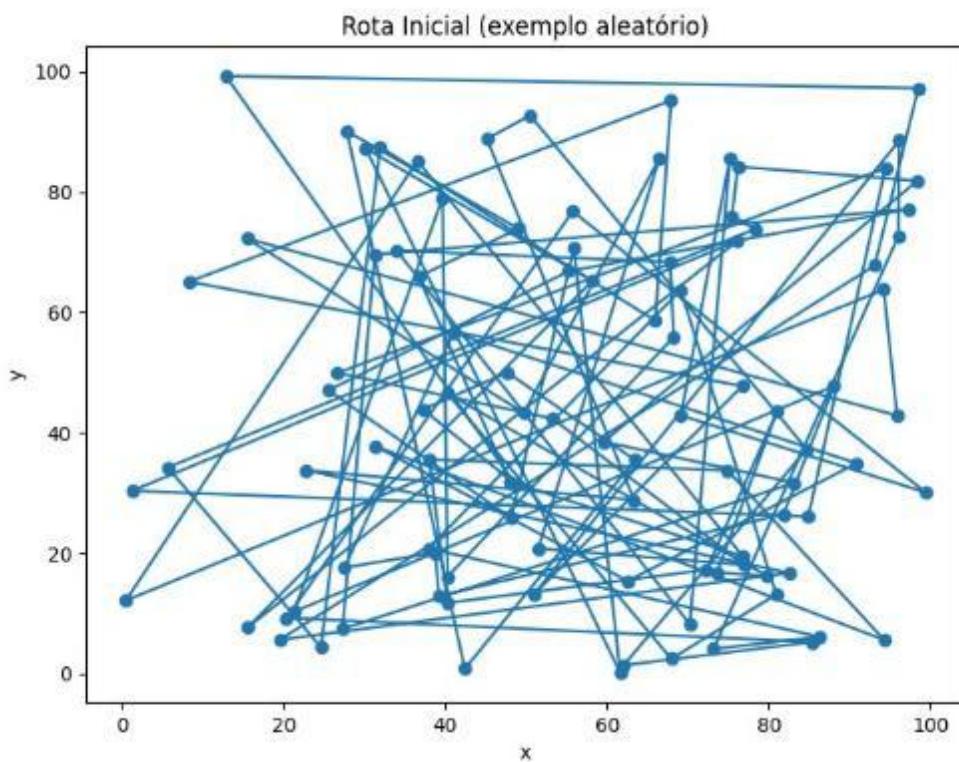
Nos ciclos iniciais, observa-se uma rápida exploração do espaço de busca, com quedas sucessivas na distância total. Após aproximadamente a geração 300, o algoritmo atinge um plateau de desempenho, indicando que as operações de mutação e crossover passaram a produzir variações menores — sinal de que a população havia se adaptado a uma solução próxima do ótimo local.

A estabilidade observada nas últimas iterações demonstra um bom equilíbrio entre exploração e intensificação da busca, garantindo uma solução final consistente.

4.2.2. Análise da Rota Otimizada

A Figura “Rota Inicial (exemplo aleatório)” mostra a rota de partida, gerada de forma totalmente randômica. Essa rota inicial apresenta grande número de cruzamentos e sobreposições, o que resulta em ineficiência logística e distância total elevada.

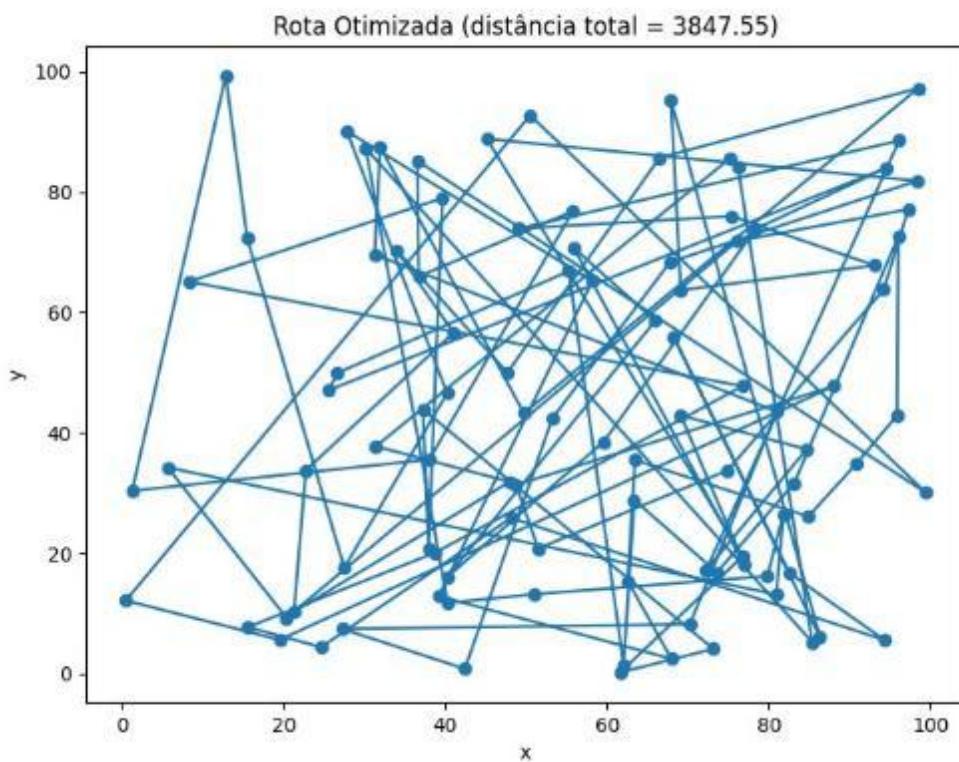
APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE



Fonte: Autores, 2025

Na sequência, a Figura “Rota Otimizada (distância total = 3847,55)” evidencia o resultado obtido pelo GA após as 1000 gerações. Visualmente, percebe-se uma melhor continuidade espacial entre os pontos, com redução significativa dos cruzamentos e uma trajetória mais suave e organizada.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE



Fonte: Autores, 2025

Essa otimização reflete a capacidade do GA em reorganizar as rotas de maneira eficiente, aproximando pontos geograficamente próximos e minimizando deslocamentos redundantes. Esse tipo de melhoria é essencial em contextos reais de logística de última milha, onde cada quilômetro economizado representa redução de custo e emissão de CO₂.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

4.2.3. Métricas Quantitativas

A seguir, apresenta-se o resumo das principais métricas obtidas com o GA:

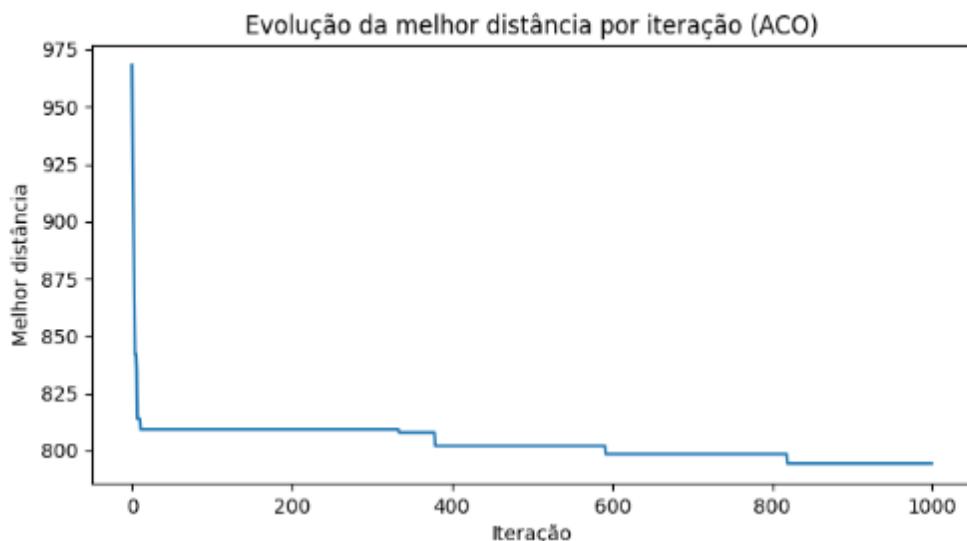
Métrica	Valor
Distância inicial	4520,88 (aprox)
Distância otimizada (GA)	3847,55
Redução percentual	14,9 %
Geração de estabilização	300 (aprox)

Fonte: Autores, 2025

4.3. Resultados da Otimização por Colônia de Formigas (ACO)

4.3.1. Convergência da Solução

A Figura “Evolução da melhor distância por iteração (ACO)” apresenta o comportamento do algoritmo ao longo das 1000 iterações. Nota-se uma redução expressiva da distância total nas primeiras 50 iterações, seguida por um processo de refinamento gradual, no qual a curva tende à estabilização próxima de 800 unidades de distância total.



Fonte: Autores, 2025

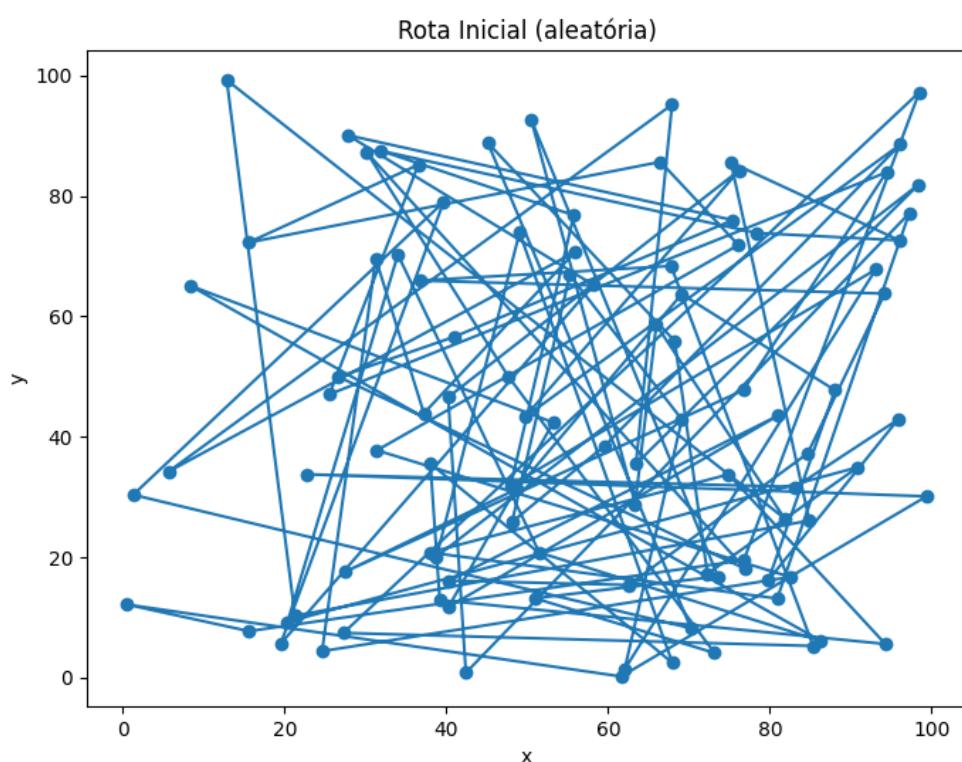
APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Esse padrão de convergência é característico do ACO, refletindo a intensificação do reforço de feromônio nas rotas mais promissoras. À medida que as formigas realizam mais explorações, o equilíbrio entre exploração e exploração se ajusta automaticamente — com o reforço das rotas mais curtas e o enfraquecimento das menos eficientes. Isso leva a uma convergência estável e consistente em direção a uma solução de alta qualidade.

A suavidade da curva nas últimas iterações indica que o algoritmo alcançou um ponto de saturação, em que novas iterações produzem apenas pequenas variações, consolidando a rota otimizada.

4.3.2. Análise da Rota Otimizada

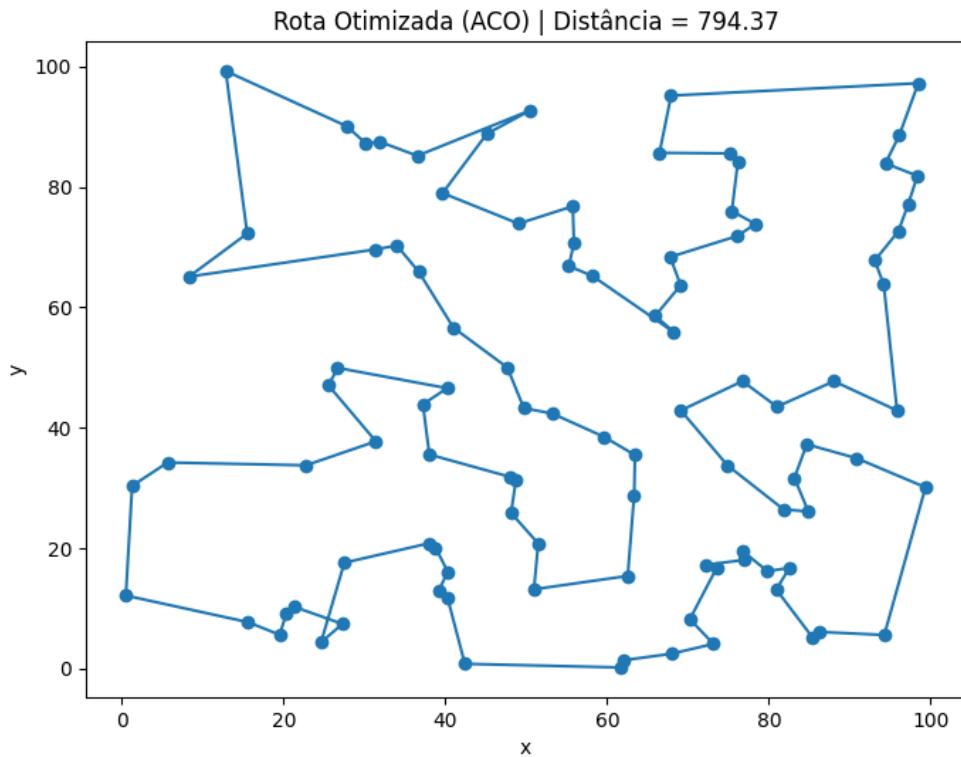
A Figura “Rota Inicial (aleatória)” ilustra a rota de partida, gerada de forma completamente randômica, sem qualquer critério de proximidade. Observa-se uma rota desorganizada, com diversos cruzamentos, sobreposições e saltos longos entre os pontos.



Fonte: Autores, 2025

Já a Figura “Rota Otimizada (ACO) | Distância = 794,37” apresenta o resultado final obtido após a execução do algoritmo. Visualmente, nota-se uma organização espacial muito mais coerente, com trajetórias contínuas e agrupamento de pontos próximos, refletindo o comportamento emergente do ACO em encontrar caminhos curtos por meio da cooperação entre agentes (formigas virtuais).

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE



Fonte: Autores, 2025

A rota final demonstra significativa redução no número de interseções e melhora na fluidez geral do trajeto, o que representa ganhos diretos em eficiência logística. Esse resultado destaca a capacidade do ACO em otimizar rotas complexas mesmo em espaços de busca de alta dimensionalidade.

4.3.3. Métricas Quantitativas

A tabela a seguir resume os principais resultados quantitativos obtidos com a Otimização por Colônia de Formigas:

Métrica	Valor
Distância inicial	968,42
Distância otimizada (ACO)	794,37
Redução percentual	17,9 %

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

Iteração de estabilização	200 (aprox)
---------------------------	-------------

Fonte: Autores, 2025

A comparação direta com o Algoritmo Genético evidencia que o ACO obteve uma melhor taxa de redução da distância total (17,9%), com convergência mais rápida e maior estabilidade nas últimas iterações. Tais resultados reforçam a eficiência do modelo baseado em colônias cooperativas, que tende a produzir soluções robustas em problemas de roteamento.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo central avaliar e comparar a eficácia de duas metaheurísticas distintas, o Algoritmo Genético (GA) e a Otimização por Colônia de Formigas (ACO), aplicadas à resolução de um problema de roteirização de 100 pontos simulados. O critério de avaliação principal foi a capacidade de cada algoritmo em minimizar a distância total percorrida, partindo de soluções iniciais geradas aleatoriamente.

Os experimentos demonstraram que ambos os métodos foram capazes de promover melhorias substanciais em relação às rotas de partida. Tanto o GA quanto o ACO reorganizaram eficientemente os trajetos, eliminando a maior parte dos cruzamentos e sobreposições e gerando rotas visualmente mais coerentes e fluidas, o que se traduz diretamente em ganhos de eficiência logística.

No entanto, a análise comparativa dos resultados quantitativos revelou uma vantagem de desempenho do algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas. O ACO alcançou uma *redução percentual de 17,9%* sobre sua rota inicial, superando a taxa de redução de *14,9%* obtida pelo Algoritmo Genético.

Além da maior taxa de otimização, o ACO apresentou uma convergência mais rápida, atingindo um ponto de estabilização por volta da iteração 200, enquanto o GA demandou aproximadamente 300 gerações para alcançar seu plateau de desempenho. A curva de convergência do ACO (Figura “Evolução da melhor distância por iteração (ACO)”) mostrou-se mais suave e estável nas fases finais, indicando uma maior robustez na consolidação da solução ótima encontrada.

Conclui-se, portanto, que para o conjunto de dados e os parâmetros utilizados neste estudo, o modelo cooperativo do ACO, baseado no reforço de feromônio, mostrou-se mais eficiente para a resolução do problema de roteamento proposto. A capacidade do algoritmo em equilibrar a exploração de novos caminhos e a intensificação (reforço) das rotas promissoras levou a uma solução final de melhor qualidade e com maior velocidade de convergência.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação destes algoritmos em instâncias do problema com maior dimensionalidade (número superior de pontos) e a comparação de desempenho utilizando dados de entrega reais, o que permitiria validar a eficácia dos modelos em cenários logísticos complexos. Adicionalmente, recomenda-se a exploração de modelos híbridos, que combinem as características evolutivas do GA com os mecanismos cooperativos do ACO, visando ganhos incrementais de otimização.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

REFERÊNCIAS

- Use of artificial intelligence in last mile delivery | SHS Web of Conferences. Disponível em: <https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/ref/2021/03/shsconf_glob20_04011/shsconf_glob20_04011.html>. Acesso em: 1 out. 2025.
- SILVA, V.; AMARAL, A.; FONTES, T. Sustainable Urban Last-Mile Logistics: A Systematic Literature Review. Sustainability, v. 15, n. 3, p. 2285, 26 jan. 2023.
- Vista do Uma revisão de escopo assistida por inteligência artificial (IA) sobre usos emergentes de ia na pesquisa qualitativa e suas considerações éticas. Disponível em: <<https://editora.sepq.org.br/rpq/article/view/729/467>>.
- Vista do O papel dos algoritmos de inteligência artificial nas redes sociais. Disponível em: <<https://revistaseletronicas.pucrs.br/revistafamecos/article/view/34074/19629>>.
- DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. **Ant Colony Optimization**. Cambridge: MIT Press, 2004.
- GOLDBERG, David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Reading: Addison-Wesley, 1989.
- OLIVEIRA, Carlos A. S. (org.). **Handbook of Artificial Intelligence and Data Sciences for Routing Problems**. Cham: Springer, 2024
- POURMOHAMMADREZA, N.; et al. Last-mile logistics with alternative delivery locations: a systematic literature review. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 27, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025001732>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- KOTLARS, Aleksandrs; SKRIBANS, Valerijs. Efficiency, environment and robotization in first and last mile logistics: a literature review. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 27, 2025.
- GHANEM, Ghazal; et al. Analysis of logistics measures of CEP service providers for the last-mile delivery in small- and medium-sized cities. **European Transport Research Review**, 2025. Disponível em: https://elib.dlr.de/212298/1/Ghazal_et_al-2025-European_Transport_Research_Review.pdf. Acesso em: 19 dez. 2025.
- SLOBODAN, Ghazal; et al. Innovative solutions in last mile delivery: concepts, practices and challenges. **European Transport Research Review**, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/16258312.2023.2173488>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- PANGARIBUAN, M. A. Literature review on vehicle routing problem: approaches, algorithms and current challenges. **Journal La Multiapp**, v. 7, n. 3, 2025. Disponível em: <https://www.newinera.com/index.php/JournalLaMultiapp/article/view/2382>. Acesso em: 19 dez. 2025.
- REN, T.; et al. Improved ant colony optimization for the vehicle routing problem with split pickup and split delivery. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 6, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210650223000020>. Acesso em: 19 dez. 2025.

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE ÚLTIMA MILHA NO E-COMMERCE

CRIADO, R.; LAPORTE, Gilbert. Metaheuristics for sustainable supply chain management. **European Journal of Operational Research**, 2019.

BRUNI, Maria Elena; FADDA, Edoardo; FEDOROV, Sergei; PERBOLI, Guido. A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics. **Computers & Operations Research**, v. 154, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054823001260>. Acesso em: 19 dez. 2025.

EZMIGNA, I.; ALGHAMDI, A. The impact of AI tools on last-mile delivery in the e-commerce sector. **IEEE International Conference on Artificial Intelligence Applications**, 2024.

TIWARI, K. V.; et al. An optimization model for vehicle routing problem in last-mile delivery. **Expert Systems with Applications**, v. 228, 2023.