

# Pareamento Ponto-a-Rota para Otimização da Última Milha em Sistemas Institucionais de Compartilhamento Veicular

Fabiana Tieko Kamo<sup>1</sup>, Rebeca Larissa Silva Gaia<sup>1</sup>, Mateus Tymburibá<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Departamento de Computação (DECOM)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Av. Amazonas, 7675 – 30510-000 – Belo Horizonte – MG – Brazil

fabiana.kamo@hotmail.com, reb.gaia@gmail.com, mateustymbu@cefetmg.br

**Abstract.** *Ride-sharing systems face a trade-off between efficiency and matching quality. Point-to-Point (P2P) approaches ignore en-route pickups, causing high detour costs. This work presents Caronnect, a Point-to-Route (P2R) matching system for institutional niches. The algorithm analyzes the driver's arterial trajectory to identify optimal meeting points. Experimental evaluation with 10,000 requests showed that Caronnect increased matching success by 7.7% and reduced walking distance by 12% compared to P2P, overcoming the geometric limitations of origin-based methods. Regarding scalability, the system maintained a linear behaviour and a sub-second response time (51.89ms for 1,000 drivers).*

**Resumo.** *Sistemas de carona enfrentam um dilema entre eficiência e qualidade do pareamento. Abordagens Ponto-a-Ponto (P2P) ignoram embarques ao longo da rota, gerando desvios excessivos. Este trabalho apresenta o Caronnect, um sistema Ponto-a-Rota (P2R) para o nicho institucional. O algoritmo analisa a trajetória arterial do motorista para identificar pontos de encontro ideais. A avaliação experimental com 10.000 requisições demonstrou que o Caronnect elevou a taxa de sucesso em 7,7% e reduziu a caminhada do passageiro em 12% frente ao P2P, superando as limitações geométricas de modelos baseados apenas na origem. Quanto à escalabilidade, o sistema manteve comportamento linear e resposta em tempo real (51,89ms para 1.000 motoristas).*

## 1. Introdução

A arquitetura de mobilidade nos grandes centros urbanos brasileiros enfrenta uma saturação sistêmica, ilustrada pelo aumento de 32,02% na frota registrada de automóveis na última década (de 47,9 milhões em 2014 para 63,3 milhões em 2024) [IBGE 2024]. Esse volume massivo de veículos excede sobremaneira a capacidade de escoamento da malha viária, resultando no agravamento dos congestionamentos. Embora a literatura de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) proponha soluções altamente sofisticadas para o monitoramento contínuo e para o roteamento veicular cooperativo adaptativo, destinado a mitigar engarrafamentos [Souza et al. 2016], ferramentas focadas exclusivamente na eficiência vetorial lidam com o efeito emergente e não com a raiz da demanda. Tornam-se imprescindíveis, portanto, intervenções combinadas visando maximizar as taxas de ocupação, como no caso do transporte compartilhado.

Essa constatação alinha-se ao paradigma da Computação Urbana, definida por Zheng et al. [Zheng et al. 2014] como a integração de tecnologias de sensoriamento,

gestão e análise de dados para solucionar desafios das grandes cidades, visando a melhoria da qualidade de vida urbana. Dentre os mecanismos concebidos nesse paradigma, os sistemas de compartilhamento dinâmico de viagens (*Dynamic Ride-Sharing* - DRS) destacam-se pelo seu potencial em reduzir ativamente o número de veículos em circulação. No entanto, a implementação desses sistemas em larga escala esbarra no problema crônico da “última milha” (a distância que o passageiro precisa caminhar até o embarque). Estratégias contemporâneas cientes de contexto enfatizam a necessidade de aprimorar a convergência dos serviços multimodais urbanos respeitando as restrições ergonômicas de movimentação do cidadão [Brito et al. 2024]. Porém, algoritmos genéricos baseados exclusivamente na aproximação de Ponto-a-Ponto (P2P) frequentemente desconsideram a direcionalidade intrínseca das artérias urbanas densas, o que resulta na proposição de rotas improdutivas, exigindo que motoristas executem desvios infrutíferos e que passageiros ampliem o esforço físico de caminhada. A ineficiência de modelos estáticos foi evidenciada precocemente por Ma et al. [Ma et al. 2013], que comprovou que o pareamento dinâmico baseado na trajetória completa (e não apenas nas origens e destinos) é capaz de aumentar significativamente a taxa de ocupação dos veículos.

Com o intuito de explorar essa capacidade, focar em nichos institucionais desponta como uma estratégia promissora. Estudos seminais sobre padrões de mobilidade humana demonstram que deslocamentos em rotinas pendulares (como ir ao trabalho ou à universidade) possuem um alto grau de previsibilidade, superior a 90% [Song et al. 2010]. O sistema Caronnect explora essa regularidade intrínseca ao focar na convergência institucional. Diferente de plataformas de roteamento de topologia difusa (Muitos-para-Muitos), o ambiente institucional configura uma topologia convergente (Muitos-para-Um). O aproveitamento matemático dessa regularidade permite simplificar a análise vetorial, direcionando os recursos de processamento para a viabilização de um pareamento geométrico refinado de Ponto-a-Rota (P2R), priorizando a fluidez ininterrupta do trajeto do condutor. Além disso, a restrição a cenários de destino institucional viabiliza a concepção de ferramentas limitadas ao público interno de uma organização. Nesse contexto, a utilização de mecanismos pré-existentes de autenticação corporativa ou acadêmica eleva inerentemente o nível de segurança e a confiança mútua entre os usuários que compartilham o veículo.

O objetivo deste trabalho é propor e avaliar um algoritmo P2R que mitigue o problema da última milha. Para validar a eficácia da abordagem, conduziu-se uma avaliação experimental comparativa utilizando um conjunto de dados sintético com 10.000 requisições e 1.000 rotas. A análise sugere que a estratégia Ponto-a-Rota supera limitações geométricas tradicionais: o Caronnect proporcionou um ganho de 7,7% na efetivação de pareamentos e reduziu em 12% a distância média de caminhada. Além disso, os testes de escalabilidade (QP2) confirmaram a viabilidade operacional do sistema, que manteve um tempo médio de execução de 51,89 ms para uma base de 1.000 condutores. Esses indicadores confirmam que a análise da trajetória arterial amplia a ocupação veicular mantendo um desempenho computacional compatível com as exigências de tempo real.

## 2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta uma revisão da literatura pertinente à otimização de rotas e ao compartilhamento dinâmico de veículos.

## 2.1. Otimização Algorítmica e Complexidade

Uma vertente significativa da pesquisa em roteamento foca no desenvolvimento de algoritmos computacionalmente intensivos para encontrar a rota ótima. Diversas técnicas de heurística e inteligência artificial são aplicadas na modelagem do roteamento veicular, incluindo algoritmos de colônia de formigas [Liao et al. 2019], algoritmos genéticos [Bunjkar et al. 2015] e heurísticas híbridas ( $A^*$ ) [Das et al. 2020]. Embora possuam inegável poder de resolução para problemas de otimização de múltiplos critérios, essas soluções demandam uma alta complexidade computacional, o que frequentemente as inviabiliza para sistemas leves focados em validação geométrica intraurbana de resposta rápida.

Plataformas de compartilhamento veicular em larga escala historicamente enfrentam estrangulamentos severos de escalabilidade. Isso exige a inserção de heurísticas avançadas de filtragem de localidade espacial e de restrições geométricas agressivas para garantir que o pareamento dinâmico de veículos ocorra em tempo hábil, sem sacrificar a infraestrutura dos servidores [Tosoni et al. 2022]. O *Caronnect* endereça esse desafio de maneira prática, ancorando a verificação de pareabilidade às imediações do fluxo arterial já preestabelecido pelo condutor principal. Dessa forma, garante-se um tempo de resposta na ordem de frações de segundo, poupando a arquitetura do ônus provocado por processos de buscas globais exaustivas.

## 2.2. Abordagens de Pareamento Espacial e Topologia Dinâmica

A arquitetura de pareamento em sistemas modernos de DRS tem sido intensamente estudada através da formulação de modelos focados em topologia difusa (cenários Muitos-para-Muitos). Nessa modalidade de logística urbana, a similaridade simultânea entre as múltiplas origens e os múltiplos destinos dos condutores e passageiros é o fator que baliza a inferência da viabilidade da carona. Todavia, a aplicação de modelos estritamente difusos em malhas viárias intramunicipais com elevada densidade introduz um problema crônico atrelado à latência e à imprevisibilidade orgânica do trânsito. Modelar quantitativamente a distribuição fluida e as variações súbitas da demanda geoespacial de serviços de compartilhamento veicular constitui, hoje, um desafio clássico da infraestrutura metropolitana e da teoria de alocação estocástica de recursos [Alencar et al. 2021].

Ao contornar esse dilema e limitar a aplicabilidade algorítmica do *Caronnect* ao domínio estrito do escoamento institucional convergente, o espaço de busca e a complexidade de roteamento são drasticamente reduzidos. Em plataformas baseadas em origens estáticas (P2P), pequenas correções de percurso solicitadas durante a viagem para viabilizar o embarque de um passageiro costumam resultar em custos logísticos temporalmente proibitivos devido à inflexibilidade do tráfego urbano intenso. Em contrapartida, a metodologia Ponto-a-Rota (P2R) se fundamenta na abstração primária de que o trajeto de deslocamento do condutor atua como um vetor direcional contínuo e rígido. Assim, toda a análise computacional é transferida para a verificação de interseção geoespacial da origem do solicitante em relação a qualquer segmento desta linha vetorial pré-calculada.

## 2.3. Segurança, Privacidade e Confiança em Sistemas Veiculares

A adoção orgânica de plataformas de compartilhamento veicular em Cidades Inteligentes esbarra, invariavelmente, em preocupações quanto à privacidade de localização

e à segurança física dos usuários. A publicação e o compartilhamento dinâmico de dados de mobilidade em malhas urbanas, mesmo quando técnicas primárias de anonimização são aplicadas, podem expor os usuários a vulnerabilidades de rastreamento de rotinas. Estudos recentes na área da Computação Urbana evidenciam a necessidade imperativa de um balanço cauteloso entre a extração de utilidade desses dados para a otimização de sistemas de roteamento e a preservação do sigilo do cidadão [Mattos et al. 2024].

Paralelamente, com o intuito de contornar a ausência de confiança mútua em ambientes abertos de locomoção, abordagens contemporâneas têm proposto a incorporação de arquiteturas descentralizadas, como *blockchain*, para assegurar a transparência estrutural, a preservação da privacidade e a segurança dos usuários de *ride-sharing* [Badr et al. 2021]. Embora promissoras do ponto de vista criptográfico, a implantação de redes baseadas em protocolos de consenso distribuído adiciona, inevitavelmente, uma sobrecarga de processamento e eleva a latência na comunicação cliente-servidor. O *Caronnect* neutraliza de forma elegante esse gargalo operacional ao ancorar a sua camada basilar de confiança diretamente na infraestrutura de autenticação institucional pré-existente das organizações. Ao restringir computacionalmente as possibilidades de pareamento apenas entre indivíduos ativamente vinculados a uma mesma instituição (seja um campus universitário ou um polo corporativo), o sistema provê a segurança mútua por meio de um mecanismo clássico de confiança transitiva. Essa escolha de arquitetura dispensa a sobrecarga imposta por sistemas densos de reputação pública ou arquiteturas descentralizadas pesadas, preservando simultaneamente a integridade dos indivíduos e a eficiência em tempo real da heurística.

### 3. Referencial Teórico e Tecnologias

Para assegurar o correto funcionamento geoespacial do sistema proposto, mantendo o foco na leveza arquitetural, o *Caronnect* apoia-se em modelagens matemáticas clássicas e em provedores de infraestrutura consolidados na nuvem.

#### 3.1. Fórmula de Haversine

A Fórmula de Haversine [Sinnott 1984] atua como um pilar essencial para o cálculo rápido e preciso de distâncias geodésicas (em linha reta) considerando a curvatura do globo terrestre. Ela é a base matemática adotada pelo algoritmo para iterar sobre os vetores de coordenadas e determinar a viabilidade espacial instantânea do pareamento. Esse processamento autônomo elimina a necessidade de incorrer em chamadas excessivas e custosas a APIs externas de roteamento durante a intensa fase de busca interna. A formulação matemática do cálculo geodésico é dada pelas Equações 1, 2 e 3:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta long}{2}\right) \quad (1)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \quad (2)$$

$$d = R \cdot c \quad (3)$$

Onde  $lat_1$  e  $lat_2$  compreendem as coordenadas de latitude na origem e no alvo, expressas estritamente em radianos. Os termos  $\Delta lat$  e  $\Delta long$  representam as diferenças nominais entre as latitudes e longitudes, e  $R$  equivale ao raio esférico médio da Terra, aproximado em 6.371 quilômetros.

### 3.2. Serviços Base

A arquitetura computacional da solução foi integralmente construída sob a plataforma Node.js, adotando a tipagem estrita do TypeScript para garantir o tratamento seguro e totalmente assíncrono do alto volume de requisições de pareamento. Essa estrutura lógica opera em sintonia com o banco de dados NoSQL Amazon DynamoDB, selecionado para viabilizar a persistência de alta performance e a recuperação ágil das rotas (matrizes) que compõem o escopo espacial do sistema. Como provedor e espinha dorsal geográfica da ferramenta, adotou-se a API de serviços web do Mapbox [Mapbox 2026]. Ela é consumida primariamente na etapa de geocodificação (a tradução vital de endereços em coordenadas utilizáveis) e para a extração da matriz que representa a rota arterial do motorista (*LineString*). É justamente essa matriz contínua de coordenadas retornada pela API que nutre e viabiliza a execução sequencial da heurística Ponto-a-Rota.

## 4. Desenvolvimento e Metodologia

A presente seção destrincha a metodologia técnica empregada para o desenvolvimento da plataforma e as diretrizes do seu modelo de simulação.

### 4.1. O Algoritmo Caronnect (Ponto-a-Rota)

O fluxo de execução origina-se no momento do cadastro estático da rota submetida pelo condutor, cujo destino corresponde invariavelmente às coordenadas geográficas de uma instituição. Nesse momento, a API de mapeamento processa o pedido e retorna um vetor denso e completo composto por dezenas ou centenas de pares de coordenadas, compreendendo toda a via arterial mapeada (*LineString*), conforme ilustrado na Figura 1.

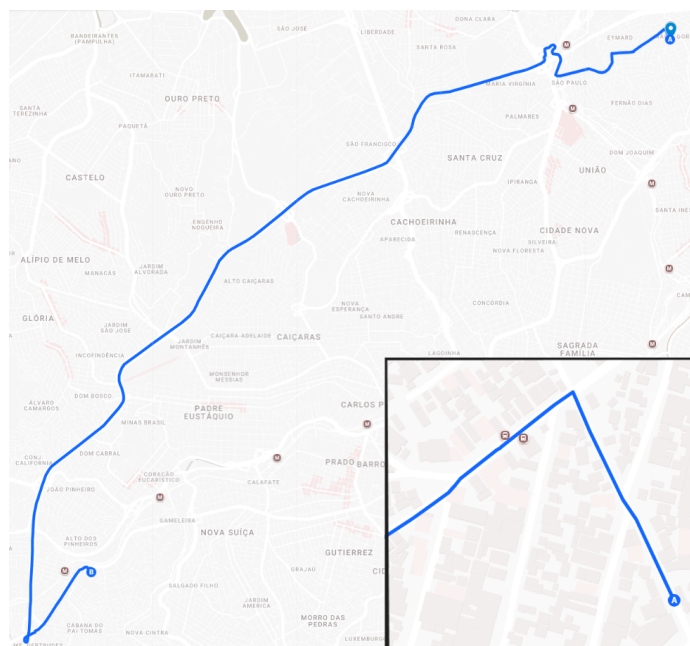


Figura 1. Rota completa do motorista (*LineString*) retornada pela API do Mapbox. O quadro menor, no canto inferior direito, apresenta uma visão ampliada do início do trajeto, correspondente à área no canto superior direito da imagem principal.

Ao optar pela persistência imediata e centralizada desse vetor espacial no banco de dados, a arquitetura evita a necessidade de recálculos de direções durante a fase de interação de busca do usuário passageiro. Sempre que um passageiro emite uma requisição de busca pelo aplicativo, o sistema executa inicialmente uma triagem temporal e quantitativa preliminar nas instâncias do banco de dados, eliminando prontamente veículos cuja lotação esteja esgotada ou cujos horários diverjam do pleiteado. O montante de caronas candidatas remanescentes é submetido, então, ao escrutínio espacial da heurística P2R descrita no Algoritmo 1.

---

**Algorithm 1** Heurística de Interceptação Ponto-a-Rota (P2R)

---

```

1: Entrada: Origem Passageiro ( $P$ ), Rota Motorista ( $R$ ), Raio Tolerância ( $r$ )
2: Saída: Coordenada de Encontro Ótimo ou Falso
3:  $distMin \leftarrow \infty$ 
4:  $pontoOtimo \leftarrow null$ 
5:  $distAnterior \leftarrow \infty$ 
6: for cada coordenada  $c$  pertencente ao vetor  $R$  do
7:    $d \leftarrow \text{Haversine}(c, P)$ 
8:   if  $d < r$  e  $d < distMin$  then
9:      $distMin \leftarrow d$ 
10:     $pontoOtimo \leftarrow c$ 
11:   end if
12:   if  $d > distAnterior$  e  $d > r$  then
13:     break ▷ Poda heurística: vetor divergente em afastamento
14:   end if
15:    $distAnterior \leftarrow d$ 
16: end for
17: if  $pontoOtimo \neq null$  then
18:   return  $pontoOtimo$ 
19: else
20:   return Falso
21: end if

```

---

O laço iterativo processa de maneira sequencial o conjunto vetorial de coordenadas que representa a rota do condutor, aferindo a proximidade de Haversine de cada segmento em relação à coordenada de requisição do Caronnect. Uma otimização lógica crucial de parada antecipada reduz o espaço de busca: assim que o diferencial das distâncias calculadas sinaliza um aumento sequencial e sistemático (evidenciando matematicamente que a frente do vetor principal começou a se afastar em definitivo do usuário alvo), o custo de oportunidade é considerado inviável e a iteração é abruptamente abortada, reduzindo o custo computacional para percorrer a matriz de coordenadas.

Se, durante a varredura linear, uma coordenada pertencente à topologia da rota for validada dentro do limiar espacial estabelecido, a carona em questão é confirmada pelo sistema. Com isso, instrui-se na interface do cliente uma rota de aproximação viável unicamente para o passageiro, eximindo o motorista de incorrer em penalizações logísticas de desvio de rotas ou de adentrar vielas fora do escopo do tráfego arterial, de acordo com o delineado visualmente na Figura 2.



Figura 2. Visualização P2R. Encontro na via arterial a 56 metros da origem do passageiro.

#### 4.2. Algoritmos de Base de Comparação

Visando avaliar o custo-benefício computacional do *Caronnect*, a solução P2R foi comparada em laboratório contra três algoritmos, aplicados compulsoriamente sobre a mesma população do conjunto de dados:

- **Vizinho Mais Próximo (P2P):** Principal heurística observada na literatura de busca ponto-a-ponto tradicional [Haghpanah et al. 2020, Baudru and Bersini 2024] (Figura 3). O sistema foca exclusivamente na menor distância entre o marco de partida do condutor e a origem assinalada pelo solicitante da carona, ignorando o percurso da viagem.



Figura 3. Rota P2P (Vizinho Mais Próximo). A distância de 378 metros conecta exclusivamente as origens.

- **Busca por Bairro:** Opera como um filtro semântico, validando a similaridade espacial unicamente através da correspondência textual sobre os dados cadastrais (strings de bairro e município). Essa abordagem de pareamento é adotada por ferramentas de compartilhamento institucional, como o aplicativo corporativo Bynd [Bynd 2024] e as iniciativas universitárias Caronaê da UFRJ [Rocha et al. 2014] e Unicaronas [UniCaronas 2007].
- **Aleatório (Análise de razoabilidade):** Instrumento metodológico concebido para atestar a não obviedade do experimento e da solução proposta. O algoritmo elege ao acaso um condutor ativo no horário desejado e submete a validação da distância entre a origem de ambos contra o limite tolerado.

### 4.3. Desenho Experimental e Estruturação do Conjunto de Dados

A análise quantitativa e o método de validação do experimento obedeceram a duas premissas centrais de investigação. **Questão de Pesquisa 1 (QP1):** Qual é o grau de eficácia e o percentual de sucesso aferidos empiricamente pela heurística P2R do *Caronnect* frente aos modelos focados apenas em pareamento de origens (P2P) na atenuação da problemática da última milha? **Questão de Pesquisa 2 (QP2):** Como o processamento geométrico estendido de vetores, adotado na estratégia Ponto-a-Rota, pune o tempo de resposta geral e escala diante do crescimento progressivo da base de usuários?

Para estabelecer condições de experimentação que garantam reprodutibilidade restrita, foi consolidada uma base de testes sintética compreendendo 1.000 perfis únicos de deslocamento de condutores com destino ao endereço institucional, combinados com uma matriz avulsa de 10.000 solicitações ativas de pareamento de passageiros. O conjunto orgânico de 1.000 motoristas foi arquitetado não por mera randomização, mas pela curadoria de 100 pontos de origens-semente que correspondem aos polos habitacionais reais mais concentrados da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Partindo desses eixos, funções de mutação posicional projetaram ramificações das localizações dos usuários dentro de uma circunferência controlada de raio restrito a 1 quilômetro, replicando virtualmente o fenômeno real de densidade residencial localizada.

De forma análoga, a matriz das 10.000 chamadas instantâneas exigidas pelo grupo de passageiros pautou-se nos recortes urbanos indicados na Figura 4.

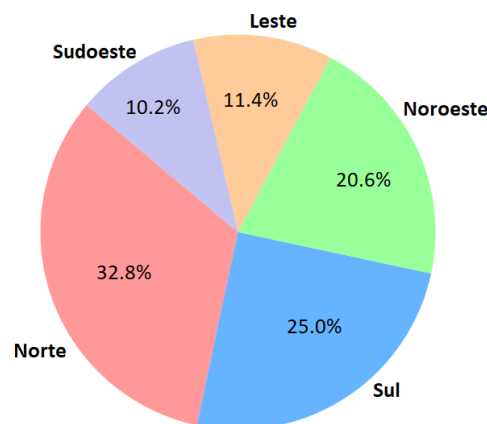


Figura 4. Proporção de requisições geradas na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Uma função de probabilidade de alocação se encarregou de disseminar requisições em cinco áreas típicas da RMBH: Norte, Sul, Leste, Noroeste e Sudoeste. Um mecanismo geolocalizador de checagem cruzada assegurou que todos os 10.000 pontos criados estivessem localizados em vias asfaltadas reconhecidas pelo mapeamento via satélite, excluindo da base de testes quaisquer marcadores topologicamente inúteis.

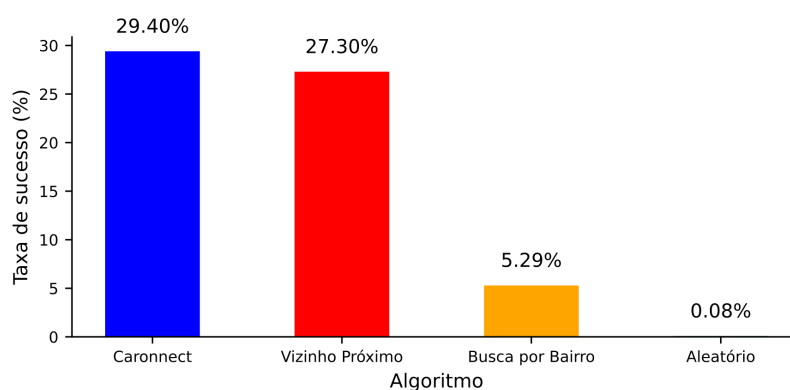
O raio de busca (limite da distância percorrida pelo pedestre) foi configurado para 600 metros, tanto para a heurística P2R proposta quanto para os algoritmos comparativos. A adoção desse parâmetro fundamenta-se na literatura de planejamento urbano e mobilidade, que estabelece distâncias entre 400 e 800 metros, equivalentes a um tempo de 5 a 10 minutos de caminhada, como o limiar aceitável de deslocamento de pedestres até pontos de embarque [Daniels and Mulley 2013].

## 5. Resultados e Discussão

Nesta seção, analisou-se os dados obtidos para responder às duas perguntas de pesquisa: a eficácia do algoritmo na redução da última milha (QP1) e o seu desempenho frente a escalas maiores (QP2).

### 5.1. Eficácia do Pareamento e Qualidade da Experiência

Para responder à primeira questão de pesquisa (QP1), a avaliação confirmou as vantagens práticas de analisar a rota integral do motorista. A Figura 5 detalha a taxa de conversão de cada algoritmo. O sistema *Caronnect* (P2R) alcançou 29,4% de sucesso, consolidando 2.940 opções de caronas. Já o método tradicional do Vizinho Mais Próximo (P2P) obteve 27,3% (2.730 caronas). Esse ganho relativo de 7,7% no volume total de pareamentos demonstra que a estratégia P2R consegue capitalizar oportunidades de embarque estruturalmente invisíveis aos métodos baseados estritamente em origem. Em larga escala, esse incremento traduz-se diretamente em uma maior retirada de veículos das vias, cumprindo o propósito de redução de tráfego.

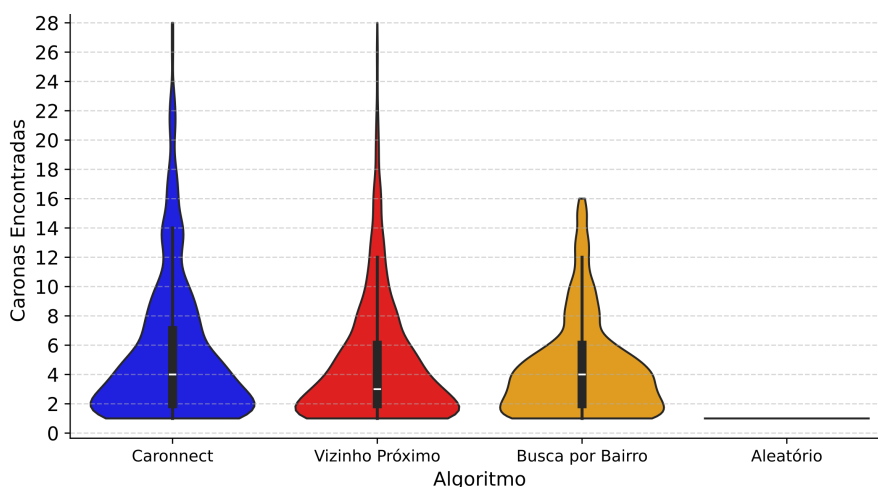


**Figura 5. Taxa de sucesso percentual. O Caronnect lidera com 2.940 pareamentos.**

O método de Busca por Bairro apresentou um desempenho deficiente, com apenas 5,29% de sucesso. Essa ineficiência decorre de sua limitação administrativa: por comparar apenas a nomenclatura dos bairros, a heurística falha em conectar usuários localizados em ruas muito próximas, mas separadas por fronteiras de zoneamento. O algoritmo Aleatório encontrou caronas em apenas 0,08% dos testes, confirmando a complexidade

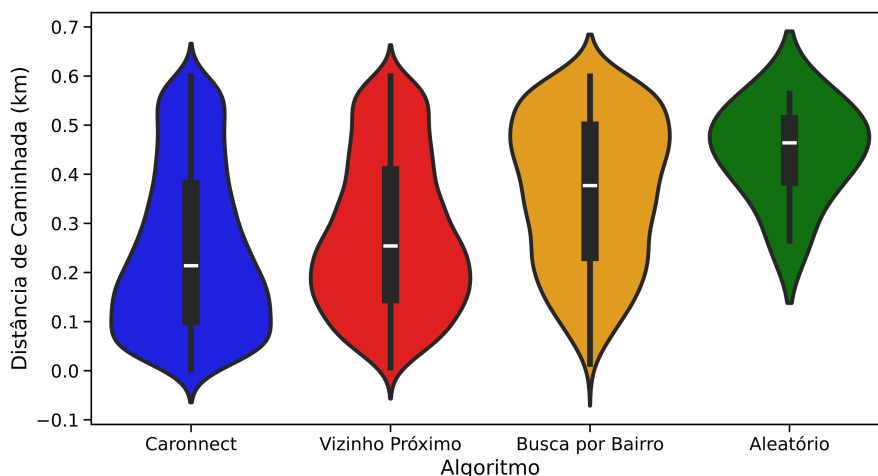
do problema de roteamento e atestando que a chance de um motorista e um passageiro coincidirem em um raio de 600 metros por mero acaso é estatisticamente nula.

Além de gerar um volume absoluto maior de caronas, a modelagem geométrica do *Caronnect* aprimorou a experiência do usuário ao oferecer uma maior densidade de opções. Diferente dos sistemas P2P, que comumente retornam apenas o candidato mais próximo, a busca contínua ao longo de toda a rota permitiu que o sistema identificasse múltiplas alternativas para a mesma requisição (Figura 6), alcançando mais de 20 opções simultâneas em diversos casos. Do ponto de vista de sistemas de informação, ter esse leque de alternativas confere maior *tolerância a falhas* (resiliência) à aplicação, assegurando que o passageiro ainda possua meios de deslocamento viáveis mesmo em caso de cancelamentos por parte de um ou mais condutores.



**Figura 6. Densidade de opções geradas por requisição. O *Caronnect* fornece maior leque de alternativas, aumentando a resiliência do sistema.**

Em relação ao conforto do passageiro e à viabilidade física (Figura 7), o algoritmo P2R diminuiu bastante a distância de caminhada até o embarque, atacando o problema da última milha.



**Figura 7. Distância de caminhada. O *Caronnect* desloca a mediana para valores mais convenientes.**

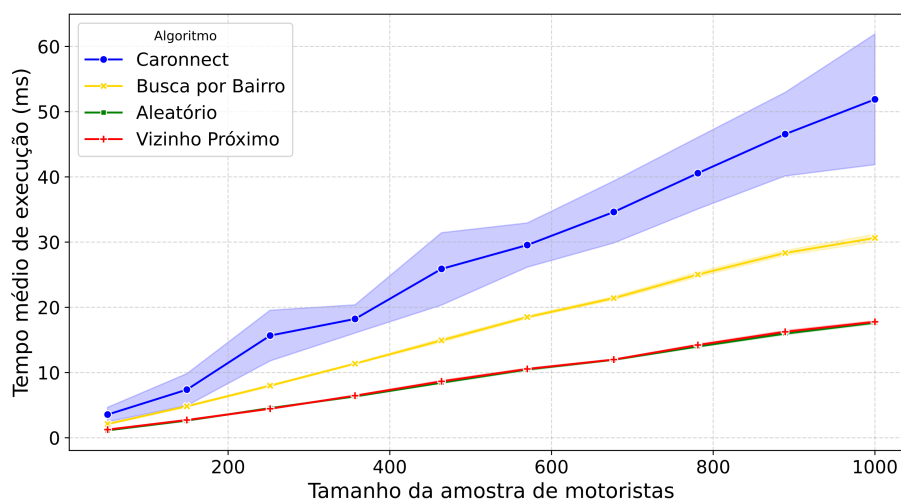
No Caronnect, a distância que o passageiro necessita percorrer até o ponto de interseção ótimo na rota do motorista apresentou uma média de 250 metros. Isso representa uma redução efetiva de 12% no percurso a pé em comparação ao algoritmo Vizinho Mais Próximo, que exige caminhadas médias de 280 metros. Mitigar a exigência de esforço físico é um fator ergonômico decisivo para atrair, reter e engajar usuários em plataformas colaborativas de mobilidade diária.

## 5.2. Desempenho Algorítmico e Escalabilidade

Ao investigar a escalabilidade da solução (QP2), a Tabela 1 e a Figura 8 evidenciam que a validação geométrica iterativa inerente ao modelo P2R demanda maior carga computacional do que cálculos diretos entre origens.

**Tabela 1. Tempo Médio de Execução (ms) e Erro Padrão**

Algoritmo	N=200	N=600	N=1000
Caronnect	13,71 ( $\pm 3,33$ )	30,92 ( $\pm 5,94$ )	51,89 ( $\pm 10,02$ )
Busca por Bairro	6,48 ( $\pm 0,11$ )	19,22 ( $\pm 0,28$ )	30,64 ( $\pm 0,58$ )
Vizinho Próximo	3,56 ( $\pm 0,07$ )	10,70 ( $\pm 0,11$ )	17,78 ( $\pm 0,17$ )

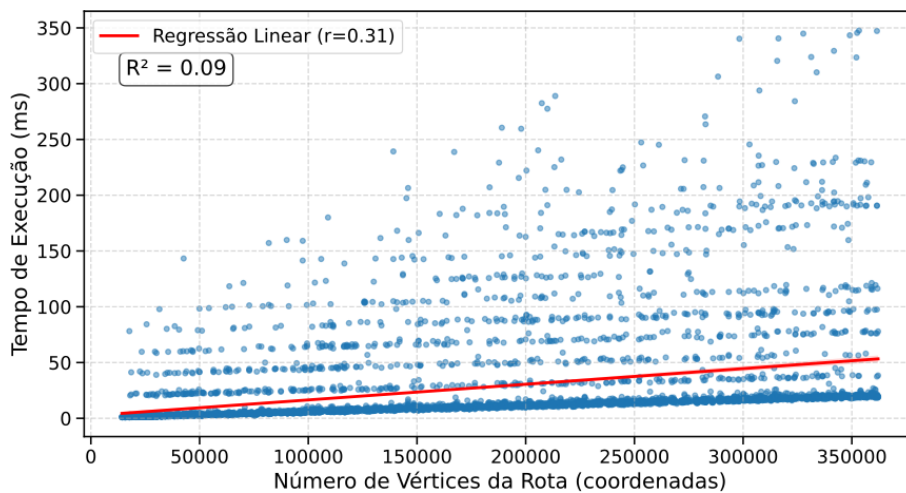


**Figura 8. Tempo de execução em função do tamanho da amostra (N).**

Em um cenário com 1.000 condutores disponíveis (N=1000), o *Caronnect* exigiu, em média, 51,89 milissegundos (ms) para concluir a triagem, ao passo que a heurística do Vizinho Mais Próximo finalizou a mesma tarefa em 17,78 ms. Contudo, é fundamental pontuar que, sob a métrica de Interação Humano-Computador, uma resposta de 50 milissegundos é processada pelo usuário final de forma instantânea. Logo, o custo computacional adicional é amplamente absorvido em *back-end*, entregando rotas geometricamente superiores sem infligir degradação perceptível à usabilidade. Esse comportamento satisfaz os requisitos de tempo real demandados por Sistemas Inteligentes de Transporte [Villas et al. 2014].

A Figura 9 expõe o gráfico de dispersão correlacionando a complexidade topológica do trajeto (número de coordenadas que compõem o *LineString*) e o tempo de

processamento exigido. A análise estatística confirmou uma correlação positiva moderada e significativa ( $r \approx 0,31$  e  $p < 0,0001$ ). Em termos práticos, essa correlação indica que rotas maiores e mais complexas demandam naturalmente mais tempo de processamento. No entanto, é crucial ponderar que esse custo computacional isolado (medido em milissegundos) atua como um excelente *trade-off* logístico: o algoritmo sobrecarrega intencionalmente a capacidade de processamento do servidor de forma a poupar o tempo e esforço físico de deslocamento do usuário. Ao fazê-lo, previne desvios veiculares infrutíferos que custariam minutos valiosos no trânsito real, maximizando a viabilidade da carona corporativa.



**Figura 9. Dispersão refletindo a eficácia do mecanismo de parada antecipada do algoritmo P2R.**

Sob a ótica estatística, o coeficiente de determinação ( $R^2 \approx 0,09$ ) revela que o tamanho bruto da rota explica menos de 10% da variação no tempo de resposta do sistema. Em análises de complexidade de algoritmos de busca espacial, um baixo valor de  $R^2$  para essa relação específica é um forte indicador qualitativo de eficiência. Se o algoritmo realizasse uma varredura linear exaustiva (uma abordagem de força bruta), o tempo de busca cresceria de forma proporcional ao número de coordenadas, o que resultaria em um  $R^2$  próximo a 1 e estrangularia a aplicação em trajetos metropolitanos longos. A baixa dependência temporal observada, portanto, atesta o êxito da técnica de parada antecipada embutida na heurística do *Caronnect*.

## 6. Conclusões

A transição de modelos genéricos de compartilhamento veicular Ponto-a-Ponto (P2P) para métodos cientes da geometria contínua do trajeto é um passo fundamental no domínio das Cidades Inteligentes. Os experimentos atestam que a abordagem Ponto-a-Rota (P2R) implementada no *Caronnect* oferece um equilíbrio entre precisão geoespacial e viabilidade operacional, atuando diretamente no alívio do problema da última milha, conforme resumido na Tabela 2.

Embora mais custoso computacionalmente devido à varredura de vetores geolocalizados densos, as métricas de tempo de resposta confirmam que a heurística de otimização de parada antecipada mantém a latência sob controle. A sobrecarga temporal

Tabela 2. Eficácia Comparativa de Pareamento

Métrica	Caronnect (P2R)	Vizinho Próximo (P2P)	Diferença Relativa
Taxa de Sucesso (%)	29,4%	27,3%	+2,1%
Distância Média de Caminhada (m)	250m	280m	-12%
Tempo Médio de Execução (N=1000)	51,89ms	17,78ms	+191,8%
Cobertura Espacial	Rota Completa	Apenas Origem	-

resultante, situada na ordem de frações de segundo, é amplamente superada pelo incremento de 7,7% na capacidade de efetivação de pareamentos e pela expressiva redução de 12% no esforço físico de caminhada exigido do usuário final. Dessa forma, a aplicação das técnicas demonstradas em nichos de convergência institucional revela-se uma estratégia tecnológica altamente promissora para elevar as taxas de ocupação veicular intraurbana de forma segura e eficiente.

### Declaração de Uso de IA

Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram a ferramenta Gemini (Google) com o propósito exclusivo de revisar a gramática, aprimorar a clareza e refinar o estilo de escrita do texto. Após o uso da ferramenta, os autores revisaram cuidadosamente o documento e assumem total e integral responsabilidade pelo conteúdo final submetido.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo apoio institucional para a condução e a publicação desta pesquisa.

### Referências

- Alencar, V. A., Pessamilio, L. R., Rooke, F., Bernardino, H. S., and Vieira, A. B. (2021). Forecasting the carsharing service demand using uni and multivariable models. *Journal of Internet Services and Applications*, 12(1):1–15.
- Badr, M. M., Baza, M., Abdelfattah, S., Mahmoud, M., and Alasmary, W. (2021). Blockchain-based ride-sharing system with accurate matching and privacy-preservation. In *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, pages 1–8.
- Baudru, J. and Bersini, H. (2024). The comparative analysis of car-pooling algorithms for ride-sharing systems. In *Proceedings of the FARI AI Institute Workshop*. FARI - AI Institute for the Common Good, Brussels.
- Brito, M., Santos, C., Martins, B. S., and Rosário, D. (2024). Context-aware multi-modal route selection service for urban computing scenarios. *Ad Hoc Networks*, 156:103407.
- Bunjkar, S. P. et al. (2015). A carpool system using genetic algorithm. *International Journal of Computer Science and Technology*, 6(2):53–56.
- Bynd (2024). Bynd caronas - Mobilidade Corporativa. <https://bynd.com.br/>. Acesso em: jan. 2025.

- Daniels, R. and Mulley, C. (2013). Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport supply. *Journal of Transport and Land Use*, 6(2):5–20.
- Das, A. et al. (2020). A hybrid multi-objective carpool route optimization technique using genetic algorithm and A\* algorithm. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(10):1–12.
- Haghpanah, M. A. et al. (2020). A heuristic nearest neighbor algorithm for peer-to-peer ridesharing. *arXiv preprint arXiv:2012.05046*.
- IBGE (2024). Frota de veículos - Brasil. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: jan. 2025.
- Liao, Y. et al. (2019). A multi-objective ACO to solve the daily carpool problem. *International Journal of Information Technology and Web Engineering (IJITWE)*, 14(1):1–22.
- Ma, S., Zheng, Y., and Wolfson, O. (2013). T-share: A large-scale dynamic taxi ridesharing service. In *Proceedings of the 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE)*, pages 410–421. IEEE.
- Mapbox (2026). Mapbox Navigation SDK and Directions API Documentation. <https://docs.mapbox.com/>. Acesso em: abr. 2026.
- Mattos, E. P. d., Domingues, A. C. S. A., Silva, F. A., and Loureiro, A. A. F. (2024). Protect your data and I’ll rank its utility: A framework for utility analysis of anonymized mobility data for smart city applications. *Ad Hoc Networks*, 162:103554.
- Rocha, I. A. et al. (2014). Caronaê UFRJ - Unificando e ampliando as caronas na Cidade Universitária/UFRJ. In *Anais do X Encontro Nacional de Engenharia e Desenvolvimento Social (ENEDS)*.
- Sinnott, R. W. (1984). Virtues of the haversine. *Sky and Telescope*, 68(2):158.
- Song, C., Qu, Z., Blumm, N., and Barabási, A.-L. (2010). Limits of predictability in human mobility. *Science*, 327(5968):1018–1021.
- Souza, A. M., Yokoyama, R. S., Maia, G., Loureiro, A. A. F., and Villas, L. A. (2016). Real-time path planning to prevent traffic jam through an intelligent transportation system. In *Proceedings of the 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, pages 1–6. IEEE.
- Tosoni, F., Ferragina, P., Marino, A., Resta, G., and Santi, P. (2022). Locality filtering for efficient ride sharing platforms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7):7785–7804.
- UniCaronas (2007). UniCaronas - Sistema de Caronas Universitárias. <https://unicaronas.com.br/>. Acesso em: jan. 2025.
- Villas, L. A., Boukerche, A., Guidoni, D. L., De Oliveira, H. A. B. F., De Araujo, R. B., and Loureiro, A. A. F. (2014). A spatial correlation aware algorithm to perform efficient data collection in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 12:69–85.
- Zheng, Y., Capra, L., Wolfson, O., and Yang, H. (2014). Urban computing: concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 5(3):1–55.