

# Simulador de Mobilidade Urbana para Controle Inteligente de Tráfego e Semáforos

Arthur Santos Godinho<sup>1</sup>, Francisco de Assis Barros Nunes Junior<sup>1</sup>

<sup>11</sup>ICEV  
Teresina – PI – Brasil

arthur.godinho@somosicev.com, francisco.nunes@somosicev.com

**Abstract.** *This work presents the development of a graph-based urban traffic simulator focused on optimizing vehicle flow and reducing congestion through intelligent traffic light control. The urban mesh was modeled as a graph, where intersections are represented by vertices and streets by edges. Generated vehicles have their routes calculated by Dijkstra's algorithm and interact with traffic lights controlled by different heuristics. Finally, statistical analysis compares the performance of strategies, evaluating metrics such as travel time and energy consumption. The simulator was tested using real street data from the Morada do Sol neighborhood in Teresina, Piauí, demonstrating the superiority of adaptive heuristics over fixed-cycle approaches.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador de tráfego urbano baseado em grafos, com foco na otimização do fluxo de veículos e na redução de congestionamentos por meio do controle inteligente de semáforos. A malha urbana foi modelada como um grafo, onde interseções são representadas por vértices e ruas por arestas. Os veículos gerados têm suas rotas calculadas pelo algoritmo de Dijkstra e interagem com semáforos controlados por diferentes heurísticas. Ao final, a análise estatística compara o desempenho das estratégias, avaliando métricas como tempo de viagem e consumo energético. O simulador foi testado utilizando dados reais de ruas do bairro Morada do Sol em Teresina, Piauí, demonstrando a superioridade das heurísticas adaptativas sobre abordagens de ciclo fixo.*

## 1. Introdução

O crescimento urbano desordenado é uma das principais causas de congestionamentos nas grandes cidades, resultando em aumento significativo do tempo de viagem, maior consumo de combustível e elevação dos níveis de poluição atmosférica. A gestão eficiente do tráfego, especialmente em cruzamentos semaforizados, tornou-se fundamental para mitigar esses problemas e melhorar a qualidade de vida urbana.

Estratégias tradicionais de controle de semáforos baseadas em tempos fixos não conseguem se adaptar às variações dinâmicas do fluxo de tráfego ao longo do dia. Por outro lado, estratégias de controle que se adaptam dinamicamente às condições do tráfego apresentam um potencial significativo para melhorar a mobilidade urbana, reduzindo congestionamentos e otimizando o uso da infraestrutura viária existente.

Este trabalho propõe um simulador de mobilidade urbana capaz de modelar e analisar o comportamento do tráfego sob diferentes políticas de controle de semáforos. O objetivo principal é demonstrar quantitativamente, por meio de simulação computacional, a superioridade de uma heurística adaptativa sobre uma abordagem de ciclo fixo, utilizando métricas como tempo médio de viagem, tempo de espera em interseções e consumo energético dos veículos.

O simulador foi desenvolvido utilizando conceitos avançados de estruturas de dados e algoritmos, aplicando teoria de grafos para representar a malha viária urbana. Como cenário de estudo, foi utilizado o mapa real do bairro Morada do Sol em Teresina, Piauí, obtido através de dados do OpenStreetMap, proporcionando maior realismo às simulações realizadas.

## **2. Metodologia**

O simulador foi desenvolvido na linguagem Java, aplicando conceitos fundamentais de estruturas de dados e algoritmos para modelar adequadamente a complexidade da dinâmica do trânsito urbano. A arquitetura do sistema foi projetada de forma modular, permitindo a fácil extensão e modificação dos componentes principais.

### **2.1. Modelagem da Cidade como um Grafo**

A malha viária foi representada por um grafo direcionado  $G = (V, E)$ , implementado na classe `Grafo`, onde  $V$  representa o conjunto de interseções e  $E$  o conjunto de ruas que conectam essas interseções. Cada interseção (vértice) foi modelada pela classe `Intersecao` e cada rua (aresta) pela classe `Rua`.

Os dados geográficos foram extraídos do OpenStreetMap, utilizando especificamente o mapa do bairro Morada do Sol em Teresina-PI como cenário de estudo. Esta escolha proporcionou um ambiente realista para as simulações, incluindo características típicas de um bairro residencial brasileiro, com ruas de diferentes larguras e padrões de tráfego variados.

As arestas do grafo possuem pesos que representam tanto a distância física quanto o tempo estimado de percurso, permitindo diferentes critérios de otimização de rotas. Adicionalmente, cada aresta mantém informações sobre capacidade máxima de veículos e velocidade limite, características essenciais para uma simulação realista.

### **2.2. Simulação de Veículos e Rotas**

Os veículos são entidades ativas na simulação, implementados pela classe `Veiculo`. Cada veículo possui atributos específicos como origem, destino, velocidade máxima, consumo energético e posição atual na malha viária. A geração de veículos segue um padrão estocástico, com origens e destinos selecionados aleatoriamente entre as interseções disponíveis.

A rota ótima para cada veículo é calculada utilizando o algoritmo de Dijkstra, implementado na classe `Dijkstra`. Este algoritmo clássico de caminho mínimo foi escolhido por sua eficiência e garantia de encontrar a rota de menor custo entre dois pontos do grafo. O custo pode ser definido como distância, tempo de viagem ou uma combinação de ambos.

Durante o percurso, cada veículo atualiza continuamente sua posição e monitora o consumo de energia, baseado em um modelo que considera acelerações, desacelerações e paradas. Os veículos respeitam as regras de trânsito, parando em semáforos vermelhos e aguardando sua vez nas interseções congestionadas.

### 2.3. Controle de Semáforos e Heurísticas

O núcleo da análise comparativa reside no controle inteligente dos semáforos. Foram implementadas duas estratégias principais para avaliar diferentes abordagens de gerenciamento de tráfego:

**Heurística de Ciclo Fixo (HeuristicaCicloFixo):** Esta abordagem tradicional utiliza tempos de sinal verde e vermelho constantes e pré-definidos, sem considerar o fluxo atual de veículos. Os tempos são configurados com base em estudos de tráfego históricos, mas não se adaptam às variações dinâmicas da demanda.

**Heurística Adaptativa (HeuristicaAdaptativa):** Esta estratégia inteligente ajusta dinamicamente o tempo do sinal verde com base no número de veículos que aguardam em cada via da interseção. O algoritmo monitora continuamente as filas de veículos e prioriza as vias com maior demanda, reduzindo significativamente o tempo de espera ocioso e otimizando o fluxo geral.

A heurística adaptativa utiliza um algoritmo de decisão que considera não apenas o número de veículos em espera, mas também o tempo que cada veículo já aguardou, evitando situações de starvation onde uma via poderia ficar indefinidamente sem receber o sinal verde.

### 2.4. Coleta de Dados Estatísticos

Um módulo específico, o `ColetorEstatisticas`, foi desenvolvido para monitorar e registrar sistematicamente os dados de desempenho da simulação. Este componente coleta informações em tempo real durante toda a execução da simulação, garantindo a precisão e confiabilidade dos dados estatísticos.

As principais métricas coletadas incluem:

- Tempo médio de viagem dos veículos que completaram o percurso
- Tempo médio de espera em interseções semaforizadas
- Fluxo total de veículos (número de viagens concluídas com sucesso)
- Consumo médio de energia por veículo
- Distribuição de tempos de espera por interseção
- Taxa de utilização das vias principais

Todos os dados são armazenados em estruturas apropriadas e exportados para análise posterior, permitindo a geração de relatórios detalhados e visualizações gráficas dos resultados obtidos.

## 3. Implementação

A implementação do simulador seguiu princípios de engenharia de software, com foco na modularidade, extensibilidade e eficiência computacional. O sistema foi estruturado em pacotes bem definidos, cada um responsável por aspectos específicos da simulação.

### 3.1. Arquitetura do Sistema

O simulador foi organizado nos seguintes módulos principais:

**Módulo de Grafos:** Responsável pela representação e manipulação da malha viária, incluindo operações de busca, inserção e remoção de vértices e arestas.

**Módulo de Simulação:** Controla o loop principal da simulação, gerenciando o tempo, a movimentação dos veículos e a sincronização entre os diferentes componentes.

**Módulo de Heurísticas:** Implementa as diferentes estratégias de controle de semáforos, permitindo a fácil adição de novas heurísticas.

**Módulo de Estatísticas:** Coleta, processa e exporta os dados de desempenho da simulação.

### 3.2. Estruturas de Dados Utilizadas

Para garantir eficiência computacional, foram utilizadas estruturas de dados apropriadas para cada componente:

- **Lista de Adjacência:** Para representação do grafo, proporcionando acesso eficiente aos vizinhos de cada vértice
- **Heap Binário:** Na implementação do algoritmo de Dijkstra, garantindo complexidade  $O((V + E) \log V)$
- **HashMap:** Para mapeamento rápido entre identificadores de interseções e objetos
- **Queue:** Para gerenciamento das filas de veículos em cada via

### 3.3. Integração com Dados Reais

A integração com dados do OpenStreetMap foi realizada através de um parser específico que extrai informações geográficas e as converte para a representação interna do simulador. O processo inclui:

1. Extração de coordenadas de interseções e ruas
2. Cálculo de distâncias reais entre pontos
3. Mapeamento de tipos de vias para velocidades limite
4. Identificação de interseções semaforizadas

Esta abordagem garante que as simulações reflitam características reais do tráfego urbano, aumentando a validade dos resultados obtidos.

## 4. Resultados e Discussão

Nesta seção, apresentamos e discutimos os resultados quantitativos obtidos ao executar o simulador com as diferentes heurísticas de controle de semáforos. O objetivo foi comparar sistematicamente o desempenho da heurística de Ciclo Fixo com a Adaptativa, utilizando o cenário real do bairro Morada do Sol.

As simulações foram executadas com uma carga de 500 veículos distribuídos ao longo de um período de simulação de 2 horas, gerando as métricas de desempenho detalhadas a seguir. Cada experimento foi repetido 10 vezes para garantir a significância estatística dos resultados.

#### 4.1. Tempo Médio de Viagem e Tempo de Espera

O tempo de viagem e o tempo de espera em interseções são indicadores cruciais da eficiência do fluxo de trânsito. A Tabela 1 apresenta um comparativo direto entre as duas heurísticas, mostrando médias e desvios padrão dos resultados obtidos.

**Tabela 1. Comparativo de Tempos Médios por Heurística**

Heurística de Controle	Tempo Médio de Viagem (s)	Tempo Médio de Espera (s)
Ciclo Fixo	847,3 ± 45,2	312,7 ± 28,9
Adaptativa	623,8 ± 32,1	156,4 ± 19,3
<b>Melhoria (%)</b>	<b>26,4%</b>	<b>50,0%</b>

A análise da Tabela 1 demonstra que a Heurística Adaptativa obteve um desempenho significativamente superior à de Ciclo Fixo. A redução de 26,4% no tempo médio de viagem representa uma melhoria substancial na eficiência do sistema de transporte. Mais impressionante ainda é a redução de 50,0% no tempo médio de espera nos semáforos.

A principal causa para essa melhoria é a capacidade da heurística adaptativa de evitar ciclos ociosos, onde o sinal permanece verde para vias sem veículos enquanto outras vias acumulam filas. A gestão dinâmica dos semáforos otimiza a fluidez do tráfego, priorizando as vias com maior demanda instantânea.

#### 4.2. Fluxo de Veículos e Consumo Energético

A eficiência do sistema também foi medida pelo número de veículos que conseguiram completar seu trajeto dentro do período de simulação (throughput) e pelo consumo energético médio, que é diretamente impactado pela quantidade de paradas e acelerações. A Tabela 2 apresenta estes resultados.

**Tabela 2. Análise de Fluxo e Consumo Energético**

Heurística de Controle	Viagens Concluídas	Consumo Médio de Energia
Ciclo Fixo	423	15,7 ± 2,1
Adaptativa	487	12,3 ± 1,8
<b>Melhoria (%)</b>	<b>15,1%</b>	<b>21,7%</b>

Conforme demonstrado na Tabela 2, a Heurística Adaptativa não só permitiu que 15,1% mais veículos concluíssem seus trajetos em comparação com o Ciclo Fixo, como também demonstrou maior sustentabilidade ao reduzir em 21,7% o consumo médio de energia por veículo.

A redução no consumo energético está diretamente relacionada à diminuição do número de paradas e ao menor tempo de espera em filas. Veículos que passam menos tempo parados e em aceleração consomem menos combustível, contribuindo para a redução da pegada ambiental do sistema de transporte urbano.

### 4.3. Análise Estatística da Distribuição de Tempos

Para uma análise mais aprofundada, foi examinada a distribuição dos tempos de espera em diferentes interseções. A heurística adaptativa mostrou não apenas uma redução na média, mas também uma menor variabilidade nos tempos de espera, indicando um sistema mais previsível e justo para todos os usuários.

A análise de variância (ANOVA) confirmou que as diferenças observadas são estatisticamente significativas ( $p < 0,001$ ), validando a superioridade da abordagem adaptativa em todas as métricas avaliadas.

## 5. Conclusões

A análise estatística dos resultados confirma inequivocamente a hipótese central deste trabalho: o controle inteligente de semáforos, por meio de heurísticas adaptativas, é significativamente mais eficaz do que abordagens estáticas de ciclo fixo. A simulação realizada no cenário real do bairro Morada do Sol em Teresina demonstrou que a capacidade de ajustar os tempos de semáforo com base na demanda instantânea do fluxo resultou em melhorias expressivas em todas as métricas avaliadas.

Os resultados mostram reduções de 26,4% no tempo médio de viagem, 50,0% no tempo de espera, além de aumentos de 15,1% no throughput de veículos e 21,7% na eficiência energética. Estes números representam ganhos substanciais que, se aplicados em escala urbana, poderiam resultar em benefícios econômicos, ambientais e sociais significativos.

O simulador desenvolvido provou ser uma ferramenta valiosa para a análise e comparação de diferentes estratégias de controle de tráfego, validando a aplicação de estruturas de dados e algoritmos clássicos na resolução de problemas complexos de mobilidade urbana. A utilização de dados reais do OpenStreetMap conferiu maior credibilidade aos resultados, aproximando as simulações das condições reais de tráfego.

Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de heurísticas mais sofisticadas baseadas em aprendizado de máquina, a expansão do simulador para incluir diferentes tipos de veículos (transporte público, bicicletas, pedestres) e a validação dos resultados através de estudos de campo em cenários reais.

A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento em sistemas de transporte inteligentes e demonstra o potencial da simulação computacional como ferramenta de apoio ao planejamento urbano e à tomada de decisões em políticas públicas de mobilidade.

## Referências

- [1] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 3rd edition.
- [2] OpenStreetMap contributors (2023). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>.
- [3] Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271.
- [4] Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., and Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12):2043–2067.

- [5] Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings. *Road Research Technical Paper*, 39.
- [6] Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R., and Winton, R. (1981). SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals. *Transport and Road Research Laboratory Report*, 1014.
- [7] Lowrie, P. R. (1990). Scats, sydney co-ordinated adaptive traffic system: A traffic responsive method of controlling urban traffic. *Roads and Traffic Authority*, NSW.
- [8] Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer, New York.
- [9] Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., and Wießner, E. (2018). Microscopic traffic simulation using sumo. In *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- [10] Chen, X., Li, Z., Yang, Y., Qi, L., and Ke, R. (2020). High-resolution vehicle trajectory extraction and denoising from aerial videos. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(10):4190–4202.