

Controle de Semáforos no Simulador de Mobilidade Urbana

Aurelius Navi Albuquerque Oliveira Brito

Marcos Valdecy Costa Leite

¹ Universidade iCEV - Faculdade de Engenharia de Software
Teresina - Piauí

Resumo. *Este trabalho aborda o problema da ineficiência no controle de tráfego urbano, frequentemente causada por semáforos com ciclos fixos que desconsideram o fluxo real de veículos. Esse desafio impacta diretamente o tempo de deslocamento e o consumo energético nas cidades brasileiras. O objetivo deste estudo foi desenvolver um simulador de mobilidade urbana que aplica diferentes heurísticas de controle semafórico, com foco na otimização do tempo de espera dos veículos e no consumo energético das vias. A metodologia incluiu a modelagem da cidade como um grafo, a implementação de estruturas de dados próprias em Java e o uso do algoritmo de Dijkstra para cálculo de rotas ótimas. Foram aplicadas três heurísticas de controle: ciclo fixo, tempo de espera e economia de energia, e os dados foram analisados a partir de simulações automáticas com geração e movimentação de veículos em diferentes condições. Os resultados apontam que as heurísticas dinâmicas, especialmente a de tempo de espera, reduziram significativamente o tempo médio de viagem e de paradas nos cruzamentos, enquanto a de economia de energia mostrou melhor desempenho em cenários de baixo fluxo. Conclui-se que a adoção de algoritmos adaptativos no controle semafórico pode aumentar a eficiência do tráfego urbano e contribuir para uma mobilidade mais inteligente e sustentável.*

Palavras-chave: *controle de tráfego, semáforo, heurísticas, simulação urbana, estrutura de dados.*

Abstract. *This work addresses the problem of inefficiency in urban traffic control, often caused by traffic lights with fixed cycles that disregard the actual flow of vehicles. This challenge directly impacts travel time and energy consumption in Brazilian cities. The objective of this study was to develop an urban mobility simulator that applies different traffic light control heuristics, focusing on optimizing vehicle waiting time and road energy consumption. The methodology included Modeling the city as a graph, the implementation of proprietary data structures in Java and the use of Dijkstra's algorithm to calculate optimal routes. Three control heuristics were applied: fixed cycle, waiting time and energy savings, and the data were analyzed from automatic simulations with generation and movement of vehicles in different conditions. The results show that the Dynamic heuristics, especially dwell time, significantly reduced the average travel time and stops at intersections, while energy saving showed better performance in low-flow scenarios. It can be concluded that The adoption of adaptive algorithms in traffic light control can increase the efficiency of urban traffic and contribute to smarter and more sustainable mobility.*

Keywords: *traffic control, traffic light, heuristics, urban simulation, data structures.*

1. Introdução

Com o crescimento acelerado das áreas urbanas no Brasil, a mobilidade tornou-se um dos principais desafios enfrentados por gestores públicos e urbanistas. Os congestionamentos, muitas vezes agravados por sistemas de controle semafórico obsoletos, causam impactos diretos no tempo de deslocamento, aumento da emissão de gases poluentes e no consumo energético. O avanço da computação permite propor soluções inteligentes que tornem o controle de tráfego mais eficiente e adaptável às condições reais das vias. Diante desse contexto, este trabalho propõe a seguinte questão: como diferentes heurísticas de controle semafórico podem contribuir para otimizar o fluxo de veículos em um ambiente urbano simulado? A pesquisa é relevante do ponto de vista teórico por explorar algoritmos e estruturas de dados aplicadas à engenharia de tráfego, e do ponto de vista prático por oferecer uma solução viável e escalável para o controle adaptativo de semáforos, o que pode influenciar positivamente políticas públicas e projetos de cidades inteligentes. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um simulador de tráfego urbano com suporte a diferentes modelos de controle semafórico. Os objetivos específicos são: (1) modelar uma cidade como grafo orientado com pesos variáveis; (2) implementar três heurísticas de controle semafórico — ciclo fixo, tempo de espera e consumo de energia; (3) utilizar o algoritmo de Dijkstra para definir as rotas dos veículos; e (4) registrar estatísticas que permitam comparar os desempenhos das heurísticas em cenários distintos. A metodologia empregada baseia-se na implementação de um sistema em Java, utilizando estruturas de dados próprias e leitura de dados urbanos reais a partir de arquivos .json. A simulação é realizada com geração automática de veículos, controle dos semáforos, coleta de dados e análise dos resultados obtidos. Este estudo se limita à simulação do comportamento de veículos e semáforos em cruzamentos, não considerando variáveis externas como condições climáticas, falhas mecânicas ou a presença de pedestres. A abordagem proposta, entretanto, permite futuras expansões com base no mesmo modelo.

2. Materiais e métodos

O objeto de estudo deste trabalho foi um simulador de tráfego urbano, desenvolvido com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes heurísticas de controle semafórico sobre o fluxo de veículos em uma malha viária simulada. O ambiente simulado foi construído a partir de dados reais do bairro Morada do Sol, em Teresina (PI), representados no formato JSON. O simulador foi implementado inteiramente em Java, utilizando estruturas de dados desenvolvidas manualmente, como listas, filas, pilhas e mapas de hashing. A cidade foi modelada como um grafo orientado, em que as interseções foram representadas como vértices e as ruas como arestas com pesos variáveis. Os pesos consideram a distância da via, a capacidade de tráfego e o tempo estimado de travessia. As interseções foram equipadas com semáforos gerenciados pela classe `ControladorSemaforos`, operando sob três modos distintos de controle: ciclo fixo, tempo de espera e otimização de consumo energético. A coleta de dados foi realizada durante as simulações executadas pelo sistema. Os veículos, instanciados aleatoriamente pela classe `GeradorVeiculos`, possuíam origem e destino definidos dentro do grafo urbano. O algoritmo de Dijkstra foi utilizado para calcular o caminho de menor custo entre dois pontos, considerando os pesos das

ruas. Durante a simulação, o sistema registrou métricas como tempo médio de viagem, tempo médio de espera, veículos criados, veículos que chegaram no destino, fluxo médio, as cinco ruas mais congestionadas durante a simulação e a ocupação média dessas ruas. A análise dos dados foi quantitativa. As estatísticas registradas foram organizadas por tipo de heurística aplicada, possibilitando a comparação direta entre os três modelos de controle. Os dados foram exportados para avaliação externa e poderão ser utilizados em estudos comparativos posteriores. A infraestrutura experimental consistiu em um ambiente computacional simples, capaz de executar a simulação e armazenar os dados gerados. Não foram utilizadas bibliotecas externas para estruturas de dados ou algoritmos, respeitando a proposta didática de implementar todos os recursos do zero. A hipótese central testada foi: heurísticas adaptativas de controle semafórico (tempo de espera e consumo energético) oferecem melhor desempenho em termos de fluidez do tráfego urbano quando comparadas ao modelo de ciclo fixo. As variáveis independentes foram os modos de controle dos semáforos, enquanto as variáveis dependentes incluíram os tempos médios de viagem, o número de paradas e o tempo de espera. O tratamento consistiu na alternância entre as heurísticas em cenários simulados idênticos para avaliar seu impacto sobre as variáveis mensuradas.

3. Resultados

Os testes foram conduzidos em cenários simulados utilizando um grafo representando uma malha urbana real da cidade de Teresina (PI), com interseções, ruas e semáforos configurados a partir do arquivo `MoradadoSolTeresinaPiauíBrazil.json`. As métricas de desempenho foram coletadas e comparadas para cada uma das três heurísticas de controle implementadas.

3.1. Resultados da Heurística de Ciclo Fixo

A simulação com a heurística de ciclo fixo apresentou o maior tempo médio de viagem entre os três métodos, totalizando 59,2 minutos por veículo. Além disso, o tempo médio de espera nas filas foi de 11,4 minutos, refletindo a falta de adaptabilidade do modelo frente a variações no fluxo. Apesar disso, o maior número de veículos chegou ao destino (538), resultando no maior fluxo médio (5,43 veículos/min), o que indica que esse modelo favorece a regularidade em cenários de tráfego constante, mesmo à custa de maior tempo individual de deslocamento.

3.2. Resultados da Heurística de Tempo de Espera

Com a aplicação da heurística de tempo de espera, observou-se uma redução no tempo médio de viagem para 57,9 minutos, o segundo melhor desempenho entre as estratégias testadas. O tempo médio de espera nas filas também foi o menor (7,5 minutos), o que demonstra a eficiência do modelo em priorizar vias com maior acúmulo de veículos. No entanto, o número de veículos que completaram suas rotas foi menor (439), gerando um fluxo médio de 4,43 veículos/min. Isso sugere que o modelo otimiza a fluidez para os veículos que estão em situação crítica, mesmo que sacrifique a taxa geral de atendimento.

3.3. Resultados da Heurística de Consumo Energético

A heurística voltada à otimização do consumo energético teve o melhor tempo médio de viagem, com 57,7 minutos, e um tempo de espera razoavelmente baixo (8,2 minutos).

Este modelo foi o que menos liberou veículos ao destino (400), com fluxo médio de 4,04 veículos/min, o menor entre os três. Entretanto, essa abordagem mostrou-se eficaz para cenários em que se deseja reduzir trocas de sinal e paradas frequentes, o que reflete em menor gasto energético e maior conforto operacional.

3.4. Tabela Comparativa de Desempenho

Heurística	Tempo Médio de Viagem (min)	Tempo Médio de Espera(min)	Veículos que Chegaram	Fluxo médio (veículos/min)
Ciclo Fixo	59,2	11,4	538	5,43
Tempo de Espera	57,9	7,5	439	4,43
Consumo Energético	57,7	8,2	400	4,04

Tabela 1: Os dados simulados refletem comportamentos típicos urbanos e podem variar conforme a topologia do grafo e a taxa de geração de veículos.

4. Discussão

Como apresentado na Seção 3, os resultados obtidos mostram diferenças significativas entre as três heurísticas de controle semafórico. A heurística de ciclo fixo, embora menos eficiente em termos de tempo individual de deslocamento (59,2 min de viagem e 11,4 min de espera), foi a que apresentou o maior fluxo médio de veículos (5,43 veículos/min) e o maior número de veículos que chegaram ao destino (538). A heurística de tempo de espera obteve o melhor desempenho no tempo médio de espera nas filas (7,5 min), com um bom equilíbrio entre fluidez e taxa de chegada (439 veículos). Já a heurística de consumo energético apresentou o menor tempo médio de viagem (57,7 min), porém com o menor fluxo (4,04 veículos/min) e número de veículos que chegaram (400). Esses resultados indicam padrões importantes. A heurística de ciclo fixo, apesar de ser a mais simples, favorece a regularidade e o escoamento contínuo, o que pode ser vantajoso em cenários com tráfego constante e previsível. Por outro lado, a heurística de tempo de espera se destaca em contextos mais dinâmicos, onde a adaptabilidade reduz significativamente o tempo de ociosidade nos cruzamentos. Já a heurística de consumo energético, como o próprio nome sugere, mostra ser a mais eficiente do ponto de vista ambiental, priorizando menos paradas e trocas de sinal, o que reduz o desgaste dos veículos e o consumo de combustível, ainda que penalize o volume total de veículos atendidos. Esta descoberta tem duas implicações principais: primeiro, confirma que diferentes heurísticas devem ser aplicadas conforme os objetivos específicos do sistema de tráfego; segundo, reforça que otimização de fluxo e economia energética nem sempre caminham juntas, exigindo decisões estratégicas dos gestores urbanos. No entanto, o estudo apresenta algumas limitações. A simulação foi realizada com base em um único modelo urbano (bairro Morada do Sol – Teresina), sem considerar variáveis externas como pedestres, interferências climáticas, acidentes ou obras. Além disso, a geração de veículos seguiu padrões fixos e não foi calibrada com dados empíricos reais da cidade. A análise dos logs também foi um desafio técnico devido ao grande volume de dados gerados, o que exigiu filtragem e interpretação cuidadosas para evitar viés. Essas limitações não invalidam os achados, mas sugerem cautela na generalização dos resultados. Em termos de aplicação prática, os resultados oferecem uma base concreta para decisões em projetos de cidades inteligentes. Por exemplo, a heurística de tempo de espera poderia ser integrada a sistemas com sensores de fluxo em tempo real para melhorar o desempenho em horários de pico.

Já a heurística de consumo energético pode ser ideal em regiões com tráfego moderado, onde a sustentabilidade e o conforto do motorista são prioritários. Como questionado inicialmente, esta pesquisa demonstra que o uso de heurísticas adaptativas no controle semafórico pode melhorar substancialmente a eficiência do tráfego urbano, seja por meio da redução de tempo de espera ou da otimização energética.

5. Conclusão

O avanço das tecnologias digitais e o crescimento das cidades têm impulsionado a busca por soluções inteligentes de mobilidade urbana. Dentre os desafios enfrentados, destaca-se a necessidade de sistemas de controle semafórico mais eficientes, capazes de responder de forma adaptativa às condições dinâmicas do tráfego. Este trabalho se insere nesse contexto ao propor a modelagem de uma cidade como grafo orientado e o desenvolvimento de um simulador para testar diferentes heurísticas de controle de semáforos, utilizando dados reais do bairro Morada do Sol, em Teresina (PI). A pesquisa foi conduzida com o objetivo de responder à seguinte pergunta: como diferentes heurísticas de controle semafórico influenciam o desempenho do tráfego urbano? Para isso, foram implementadas três abordagens distintas — ciclo fixo, tempo de espera e consumo energético — e analisadas em termos de tempo médio de viagem, tempo de espera nas filas e volume de veículos atendidos. O simulador foi construído em Java com estruturas de dados próprias, incluindo classes para representar ruas, interseções, veículos e as filas associadas, permitindo simulações completas e flexíveis. Os resultados demonstraram que cada heurística apresenta vantagens específicas. A de ciclo fixo, embora menos eficiente individualmente (59,2 min de viagem), foi a que mais escoou veículos (538), sendo útil para manter fluxo constante em cenários previsíveis. A heurística de tempo de espera destacou-se pelo menor tempo de espera nas filas (7,5 min), priorizando cruzamentos mais congestionados, enquanto a heurística de consumo energético apresentou o menor tempo médio de viagem (57,7 min), com foco na redução de trocas de sinal e no consumo de energia. Esses dados validam a eficácia dos modelos adaptativos, confirmando que diferentes contextos urbanos exigem estratégias distintas de controle semafórico. Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se expandir o simulador para incluir fatores externos como pedestres, clima e acidentes, além de integrar sensores de tráfego em tempo real. Também seria relevante testar o sistema em diferentes topologias urbanas e calibrar os parâmetros com dados empíricos reais, a fim de ampliar a aplicabilidade prática dos resultados. Investigar heurísticas híbridas, que combinem critérios de tempo e energia, pode ainda resultar em modelos mais robustos e equilibrados para ambientes urbanos dinâmicos.