

Algoritmos adaptativos aplicados ao sincronismo semafórico: um estudo para melhoria do fluxo de trânsito e redução de impactos ambientais

Adaptive algorithms applied to traffic signal synchronization: a study on
improving traffic flow and reducing environmental impacts

Ariston da Silva Melo Junior¹

João Otávio Pires Liotta²

Luís Carlos Simeí³

Giovanni Ribeiro Pinto⁴

Samuel Alves de Lima Barros⁵

Wilson Donizeti Fernandes⁶

Resumo

O crescimento acelerado das cidades e os problemas relacionados à mobilidade urbana têm gerado desafios cada vez maiores para a engenharia de tráfego, principalmente devido ao aumento dos congestionamentos, do tempo de deslocamento e da emissão de poluentes. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de um sistema de sincronização semafórica progressiva baseado no conceito de “Onda Verde” e em princípios de controle de tráfego urbano. A proposta foi desenvolvida em um ambiente de simulação tridimensional utilizando a plataforma Unity, no qual veículos controlados por inteligência artificial reproduzem diferentes comportamentos do tráfego em cenários variados. O sistema busca otimizar a circulação em corredores arteriais, permitindo que grupos de veículos atravessem múltiplos cruzamentos com o menor número possível de paradas. Para isso, foram aplicados algoritmos adaptativos aliados a sensores de fluxo veicular, possibilitando a simulação da formação e dissipação de filas de acordo com a variação do tráfego. O estudo compara um modelo convencional de temporização fixa com um modelo otimizado de sincronismo progressivo. Entre os principais indicadores analisados

¹ Complexo Universitário FMU - SÃO PAULO - SP – Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-4112>

² SENAI-SP - COTIA - SP - BR. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4695-1436>

³ Complexo Universitário FMU e SENAI - SÃO PAULO - SP – Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6429-0508>

⁴ SENAI-SP - COTIA - SP - BR. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8640-6203>

⁵ Complexo Universitário FMU - SÃO PAULO - SP – Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8562-6032>

⁶ FATEC-SP e SENAI-SP - COTIA - SP - BR. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8109-205X>

estão o tempo médio de espera, o tempo total de viagem e a estimativa de emissão de dióxido de carbono (CO₂), relacionada à frequência de frenagens e acelerações.

Os resultados preliminares demonstram que a coordenação inteligente dos semáforos contribui para melhorar a fluidez do trânsito e reduzir impactos ambientais. Além disso, o estudo evidencia que o ajuste adequado da defasagem entre interseções pode minimizar gargalos urbanos e aumentar a eficiência viária. Dessa forma, conclui-se que a integração entre teorias clássicas de engenharia de tráfego e ferramentas modernas de simulação computacional pode contribuir para o desenvolvimento de soluções voltadas à mobilidade urbana sustentável.

Palavras-chave: Mobilidade urbana; Onda verde; Simulação computacional; Engenharia de tráfego.

Abstract

The rapid growth of cities and issues related to urban mobility have generated increasing challenges for traffic engineering, mainly due to rising congestion, travel time, and pollutant emissions. This work presents the development and analysis of a progressive traffic light synchronization system based on the "Green Wave" concept and urban traffic control principles.

The proposal was developed in a three-dimensional simulation environment using the Unity platform, in which vehicles controlled by artificial intelligence reproduce different traffic behaviors in varied scenarios. The system seeks to optimize circulation in arterial corridors, allowing groups of vehicles to cross multiple intersections with the fewest possible stops. To this end, adaptive algorithms were applied alongside vehicle flow sensors, enabling the simulation of queue formation and dissipation according to traffic variation. The study compares a conventional fixed-timing model with an optimized progressive synchronization model. Among the main indicators analyzed are the average waiting time, total travel time, and estimated carbon dioxide (CO₂) emissions, related to the frequency of braking and acceleration.

Preliminary results demonstrate that intelligent traffic light coordination contributes to improving traffic flow and reducing environmental impacts. Furthermore, the study highlights that proper adjustment of the offset between intersections can minimize urban bottlenecks and increase road efficiency. Thus, it is concluded that the integration between classical traffic engineering theories and modern computer simulation tools can contribute to the development of solutions aimed at sustainable urban mobility.

Keywords: Urban mobility; Green wave; Computer simulation; Traffic engineering.

1 Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento acelerado das metrópoles transformou a mobilidade urbana em um dos desafios mais complexos da engenharia moderna. O aumento da densidade demográfica nos centros urbanos pressiona uma infraestrutura viária que, em grande parte, já opera no limite da saturação. Como observa Cavalheiro (2021), a crise de mobilidade ultrapassa a questão do conforto individual; trata-se de um gargalo que compromete a viabilidade das *smart cities* e a própria qualidade de vida, exigindo soluções tecnológicas que sejam, de fato, aplicáveis ao caos urbano.

O cerne do problema técnico reside na obsolescência dos sistemas de controle semafórico. A maioria das interseções ainda opera com temporizações fixas, uma rigidez que ignora a flutuação real da demanda de tráfego ao longo do dia. O resultado é o persistente efeito "para-e-anda", um ciclo de interrupções que não apenas dilata o tempo de viagem, mas gera prejuízos econômicos diretos pela perda de produtividade e ineficiência logística.

Sob a ótica da engenharia mecânica, esse padrão intermitente de movimento representa um desperdício energético severo. Cada retomada de aceleração após uma parada desnecessária exige um esforço excedente do motor para vencer a inércia, o que eleva o consumo de combustível e a descarga de Dióxido de Carbono (CO_2) na atmosfera. Assim, a otimização do fluxo deixa de ser apenas uma meta de tráfego para se tornar uma estratégia essencial de descarbonização e sustentabilidade.

Estudos avançados desenvolvidos pela Escola Politécnica da USP (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018) enfatizam que a ausência de sincronismo progressivo fragmenta o fluxo viário, impedindo diretamente a formação de pelotões contínuos de veículos. Quando cada semáforo opera de forma isolada, ignora-se a interação dinâmica do sistema urbano como um todo, esgotando a capacidade de escoamento da via muito antes do limite projetado, conforme apontam as diretrizes de engenharia de tráfego (CET, 2022).

Este trabalho propõe enfrentar essa lacuna através de algoritmos adaptativos focados no conceito de "Onda Verde". O objetivo central é a maximização da chamada "banda verde", o intervalo de tempo que permite a um grupo de veículos atravessar múltiplas interseções sem imobilização. Ajustar a defasagem (*offset*) entre os sinais com base na velocidade média da via permite que o condutor mantenha um movimento constante, do início ao fim do corredor arterial.

Para validar a eficiência desse modelo, optou-se pela simulação computacional via Unity 6. A plataforma permite construir um laboratório dinâmico onde agentes autônomos, regidos por inteligência artificial, reagem ao sistema de controle em tempo real. Essa abordagem possibilita medir com precisão o tempo de espera e a economia de poluentes, eliminando os custos e riscos de testes físicos em vias públicas.

Espera-se, com este estudo, demonstrar que a união entre os fundamentos clássicos da engenharia de tráfego e as ferramentas modernas de simulação podem oferecer respostas práticas e robustas, conciliando a necessidade de fluidez urbana com o compromisso ambiental.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar a eficiência de um sistema de sincronismo semafórico progressivo

("Onda Verde") por meio de simulação computacional no motor gráfico Unity 6, utilizando algoritmos adaptativos para otimizar o fluxo veicular e reduzir os impactos ambientais em corredores arteriais urbanos.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste artigo são:

- Modelar e simular um ambiente tridimensional de um corredor arterial urbano, contemplando múltiplas interseções e variáveis físicas reais de tráfego.
- Implementar algoritmos adaptativos de inteligência artificial para o controle de agentes veiculares, integrando sensores de volume e velocidade de fluxo.
- Configurar a lógica de sincronismo progressivo, estabelecendo parâmetros de defasagem (offset) e banda verde baseados na velocidade de progressão da via.
- Comparar o desempenho operacional entre o sistema de temporização fixa convencional e o modelo de sincronismo otimizado, analisando o tempo médio de viagem e o tempo de espera.
- Quantificar a redução na emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) resultante da melhoria na fluidez do tráfego e da mitigação do ciclo de frenagens e acelerações (efeito "para-e-anda").

1.3 Justificativa e Relevância do Tema

A relevância deste estudo fundamenta-se na necessidade crítica de modernizar a gestão do tráfego urbano, um setor que impacta diretamente a produtividade econômica e a saúde ambiental das metrópoles. A justificativa para o desenvolvimento de um sistema de "Onda Verde" fundamentado em algoritmos adaptativos sustenta-se em três pilares interconectados: a otimização operacional da mobilidade, a sustentabilidade ambiental via engenharia de motores e a consolidação metodológica de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*).

Primeiramente, no âmbito da mobilidade e logística urbana, a ineficiência no escoamento em corredores arteriais constitui um dos principais vetores do congestionamento sistemático. O tempo excessivo de retenção em cruzamentos não coordenados impõe custos expressivos à sociedade e reduz a capacidade de suporte das vias. A implementação do algoritmo adaptativo em malha fechada (*closed-loop*) justifica-se pela necessidade de eliminar o tempo de espera ocioso nas interseções e estabilizar a velocidade de cruzeiro, permitindo expandir a capacidade viária sem a necessidade de dispendiosas obras de infraestrutura física (CAVALHEIRO, 2021).

Em segundo lugar, sob a ótica da sustentabilidade e da engenharia mecânica, a pesquisa justifica-se pela relação direta entre a dinâmica do tráfego e a física da combustão interna. Ao priorizar a fluidez e a manutenção de uma velocidade de progressão constante, em perfeita consonância com os princípios de maximização da banda verde (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018), mitiga-se o comportamento intermitente "para-e-anda". Esse fator atua diretamente na termodinâmica do motor, minimizando picos de torque e impedindo o enriquecimento transitório da mistura ar-combustível (fator Lambda) exigido para vencer a inércia dos veículos a cada arrancada. A gestão inteligente do trânsito passa, portanto, a atuar como uma ferramenta ativa e mensurável de descarbonização e mitigação de gases de efeito estufa (CET, 2022).

Por fim, no plano metodológico, a escolha do motor gráfico Unity 6 justifica-se pela flexibilidade e alta fidelidade na reprodução de variáveis dinâmicas em tempo real. A criação de um Gêmeo Digital do corredor urbano possibilita extrair métricas quantitativas de comportamento veicular microscópico e validar algoritmos de controle com custo reduzido e risco zero. Essa abordagem oferece aos gestores públicos e engenheiros de tráfego um laboratório virtual confiável para o teste e refinamento de políticas viárias complexas antes de sua efetiva implantação em vias públicas. Abaixo, é apresentado a figura 1, qual esboça a tela de do programa Unity 6, utilizado no estudo.

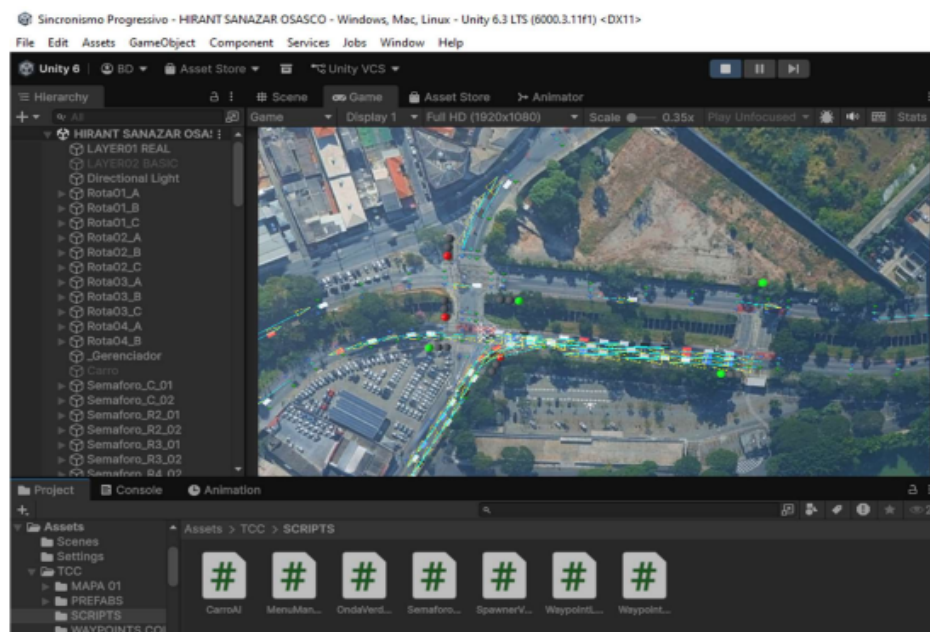


Figura 1 – Captura de tela no Unity 6.

Fonte: do autor (2026)

Dessa forma, o trabalho se justifica ao articular o rigor conceitual da engenharia de transportes às ferramentas modernas de simulação, fornecendo uma solução integrada que concilia eficiência operacional, economia de tempo e responsabilidade socioambiental.

2 Revisão da Literatura

2.1 Algoritmos Adaptativos no Controle de Tráfego

O pilar tecnológico deste trabalho reside na transição do controle estático para o controle adaptativo, visando à otimização da capacidade viária por meio de sistemas inteligentes de transporte (SANTOS; OLIVEIRA, 2022). Na engenharia de tráfego tradicional, os semáforos operam com planos de tempo fixos, baseados em médias históricas de fluxo (CARDOZO, 2018). No entanto, esses sistemas são incapazes de reagir a flutuações dinâmicas em tempo real, resultando em retenções desnecessárias e atrasos quando a demanda da via é menor que a projetada na matriz origem-destino (RODRIGUES, 2023).

Os algoritmos adaptativos funcionam como um sistema de malha fechada (*closed-loop*), cuja lógica operacional se divide em 3 (três) etapas cíclicas e interdependentes (RODRIGUES, 2023).

- **Sensoriamento (Percepção):** Utilizam-se sensores virtuais (como as funções *Physics.Overlap Sphere* e sistemas de Raycasting no Unity) que monitoram constantemente a densidade veicular em zonas de retenção (RODRIGUES, 2023). Esses sensores virtuais atuam como os elementos perceptivos do sistema, identificando a presença, o comprimento das filas e a velocidade instantânea dos agentes que se aproximam da interseção (RODRIGUES, 2023).
- **Processamento (Tomada de Decisão):** O algoritmo processa os dados de volume captados em tempo real (SANTOS; OLIVEIRA, 2022). Se uma fila atinge um limite crítico, ou se um pelotão de veículos está em progressão na avenida principal, o sistema recalcula em milissegundos se deve estender o tempo de verde ou antecipar a abertura do sinal (RODRIGUES, 2023). É nesta fase que a inteligência do sistema opera, priorizando o fluxo arterial sobre as vias secundárias para manter a estabilidade da velocidade de cruzamento (SANTOS; OLIVEIRA, 2022).
- **Atuação (Resposta):** O sistema envia o comando para os controladores semafóricos e para os nodos de caminho (*Waypoint Nodes*), alterando os estados das luzes e os limites de velocidade permitidos para os agentes (RODRIGUES, 2023).

Diferente da inteligência artificial puramente preditiva, o algoritmo adaptativo foca na reatividade imediata à demanda geométrica da via (RODRIGUES, 2023).

Como discutido por Cavalheiro (2021), sistemas inteligentes modernos utilizam essa lógica de tempo real para reduzir o tempo de saturação e otimizar o atraso global das vias. Na simulação desenvolvida, essa lógica garante que o veículo permaneça em movimento constante, pois o semáforo à frente é atualizado sobre a aproximação do pelotão antes mesmo de o primeiro carro atingir a linha de retenção (CAVALHEIRO, 2021).

2.2 Lógica de Controle e Sincronização Semafórica

A implementação da "Onda Verde" fundamenta-se nos princípios da engenharia viária clássica, especificamente na coordenação de sistemas lineares e síncronos (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). Para que um pelotão de veículos percorra a avenida sem interrupções, o sistema deve garantir a maximização da Banda Verde, que consiste no intervalo de tempo efetivo onde o sinal permanece aberto para um grupo em movimento constante, seguindo critérios técnicos de fluxos arteriais (CET, 2022).

Dois parâmetros matemáticos são fundamentais para o desenvolvimento desta modelagem (CARDOZO, 2018):

1. **Defasagem (Offset):** É o intervalo de tempo entre o início do tempo verde de dois semáforos sucessivos (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). No modelo desenvolvido, o *offset* é calculado em função da distância entre os cruzamentos (d) e a velocidade de progressão desejada (v), seguindo a lógica matemática ($t = d/v$) (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). O algoritmo adaptativo ajusta esse valor dinamicamente para compensar variações na velocidade média operacional dos veículos (CET, 2022).
2. **Extensão de Verde:** Diferente dos ciclos fixos convencionais, a lógica adaptativa utiliza dados dos sensores de fluxo para decidir se mantém o sinal aberto por alguns segundos adicionais (CET, 2022). Se o sensor detecta que o final do pelotão ainda não atravessou a interseção, o algoritmo retarda o fechamento, evitando o corte abrupto do fluxo e a consequente frenagem transiente que elevaria as emissões de poluentes (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). Esta coordenação visa mitigar a "dispersão de pelotões", fenômeno físico onde os veículos se afastam uns dos outros devido a diferentes taxas de aceleração de cada agente motorizado (CARDOZO, 2018).

Ao manter a sincronia, o sistema força a compactação do grupo de veículos, otimizando de maneira direta a capacidade de escoamento e a estabilização da via arterial avaliada (CET, 2022).

2.3 Software de Simulação

Conforme analisado por Cavalheiro (2021), o controle semafórico evoluiu de sistemas eletromecânicos rígidos para redes centralizadas e inteligentes. Na engenharia de tráfego real, órgãos como a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) utilizam ferramentas analíticas distintas para a otimização do fluxo arterial: o TRANSYT, voltado ao planejamento macroscópico baseado em médias históricas; o MAXBAND, focado na maximização teórica da banda verde; e o SCOOT, que representa o controle adaptativo moderno, ajustando ciclos e defasagens em tempo real por meio de sensores físicos distribuídos na malha viária. Juntos, esses sistemas fundamentam a transição do planejamento estático para respostas dinâmicas conforme a demanda veicular instantânea.

Em ambiente acadêmico, o estudo analítico desses fluxos descontínuos frequentemente utiliza simuladores de tráfego microscópico dedicados, como o SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) e o MOVSIM (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018). Contudo, embora precisas, essas ferramentas geram saídas estritamente numéricas e possuem limitações na visualização fenomenológica tridimensional e na flexibilidade para programação customizada de novos algoritmos em malha fechada. O motor gráfico Unity 6 preenche essa lacuna ao atuar como um "Gêmeo Digital" (*Digital Twin*) do corredor arterial. A plataforma viabiliza a validação em tempo real de algoritmos adaptativos programados em C# e o teste de sensores virtuais (*Raycasting*), mantendo total convergência com os critérios técnicos de segurança e temporização do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito do CONTRAN (CONTRAN, 2014).

3. Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho adota uma abordagem de pesquisa quantitativa, experimental e de natureza aplicada. O modelo de investigação estrutura-se sob as diretrizes científicas e de formatação recomendadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), organizando os procedimentos em um fluxo sequencial lógico que compreende a fundamentação teórica, o desenvolvimento de um ambiente de

simulação microscópica, a coleta automatizada de dados operacionais e a análise de indicadores de desempenho ambiental e viário.

3.1 Caracterização e Abordagem da Pesquisa

A presente pesquisa classifica-se como aplicada, utilizando a modelagem tridimensional e a simulação computacional ativa para validar a hipótese de que algoritmos adaptativos superam os sistemas de controle semafórico convencionais em termos de eficiência energética e fluidez viária. O desenho experimental fundamenta-se no conceito de Gêmeo Digital (*Digital Twin*). Para tanto, modelou-se virtualmente um corredor arterial urbano composto por treze interseções semafóricas distribuídas ao longo de uma extensão geométrica de 3.800 metros.

A investigação baseia-se na manipulação de variáveis independentes — representadas pelo modelo de algoritmo de controle e pelos tempos de ciclo semafórico — para observar e mensurar seus efeitos sobre as variáveis dependentes: o tempo total de deslocamento veicular (minutos), a velocidade média operacional da via (*km/h*), o tempo ocioso de espera em fila (minutos) e as estimativas de emissões de Dióxido de Carbono (CO_2) geradas pelos veículos simulados.

Diferente de uma análise puramente analítica ou teórica, este trabalho emprega um ambiente de simulação controlado desenvolvido no motor gráfico *Unity 6*. Esta plataforma viabiliza a inserção de agentes de tráfego dotados de inteligência artificial autônoma que reagem, em tempo real, ao sistema de sinalização e ao ambiente por meio de sensores virtuais de proximidade baseados em *Raycasting*. O uso deste laboratório computacional permite o isolamento de fatores externos perturbadores (tais como falhas mecânicas imprevistas, variações climáticas ou comportamentos anômalos de condutores), focando a análise estritamente na lógica do sincronismo e possibilitando a conversão de dados qualitativos do comportamento do tráfego em dados quantitativos de engenharia.

3.2 Modelagem do Ambiente e Implementação Via Programação C# e *Waypoints*

A construção do ambiente de simulação foi projetada para garantir a máxima fidelidade escalar e comportamental. Para isso, utilizou-se uma estrutura baseada em *Waypoints* (nodos/pontos de caminho) e lógica de programação em C#.

Os *waypoints* funcionam como o esqueleto vetorial da via. Diferente de sistemas de movimentação simples, cada nodo no sistema desenvolvido carrega metadados específicos, como limites de velocidade, identificação de faixa e estados de semáforo. A grande vantagem dessa abordagem é a escalabilidade e versatilidade: ao manipular esses pontos via código, é possível reconstruir digitalmente qualquer geometria viária real, desde avenidas lineares até cruzamentos complexos, respeitando as distâncias métricas exatas. Isso permite que a simulação saia do campo puramente visual e atinja uma escala técnica próxima da realidade operacional.

O "cérebro" do sistema é o *scripting* em C#. Através dele, os veículos deixam de ser objetos estáticos e passam a atuar como agentes inteligentes. A programação permite que cada veículo realize cálculos de física em tempo real, como a detecção de obstáculos via *Raycasting* e a tomada de decisão para troca de faixas ou frenagem progressiva. Essa autonomia dos agentes é o que permite validar se a "Onda Verde" realmente funciona sob diferentes densidades de tráfego, simulando o comportamento humano de reação à sinalização de forma automatizada e precisa.

3.2 Coleta de Dados e Metodologia de Cálculo de CO₂.

Para transformar a simulação em um estudo de impacto ambiental, foi implementada uma camada de coleta de dados que monitora o estado de cada veículo frame a frame. A métrica de emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) não é estimada de forma genérica, mas sim baseada na dinâmica de movimento dos agentes. O cálculo fundamenta-se na relação direta entre o esforço do motor e a queima de combustível. Para fins desta pesquisa, a estimativa de (CO₂) considera duas condições críticas.

- Consumo em Marcha Lenta (*Idling*): Quantifica o combustível desperdiçado enquanto o veículo permanece imobilizado no semáforo vermelho.
- Consumo em Aceleração Transiente: Baseia-se no princípio da engenharia mecânica de que a maior descarga de poluentes ocorre no momento de vencer a

inércia. O sistema contabiliza cada evento de aceleração brusca necessária para retomar a velocidade após uma parada.

A fórmula aplicada correlaciona o tempo total de operação do motor com o número de ciclos de frenagem e retomada. Ao comparar o "Cenário Convencional" com o "Cenário de Onda Verde", o *software* gera um relatório comparativo da massa de poluentes que deixou de ser emitida pela simples manutenção da velocidade constante. Essa metodologia permite que seja entregue resultados numéricos sólidos, prontos para serem analisados.

4. Resultados e Discussões

Nesta seção, são apresentados os dados quantitativos coletados por meio da simulação computacional, estabelecendo um comparativo direto entre o cenário convencional (temporização fixa) e o cenário otimizado (sincronismo progressivo por Onda Verde). As variáveis avaliadas compreendem o tempo médio de viagem, o tempo de espera em fila e a estimativa das emissões de poluentes gasosos.

4.1 Comparação Visual e Comportamental do Fluxo

A observação da dinâmica dos agentes veiculares evidenciou comportamentos distintos para cada configuração lógica. No modelo convencional, constatou-se a fragmentação sistemática dos pelotões. Os agentes foram submetidos a ciclos de frenagem completa na maioria das interseções devido à ausência de coordenação temporal entre os dispositivos de controle.

Essa fragmentação decorre da propagação retrógrada da onda de choque gerada pelas paradas consecutivas, o que reduz o nível de serviço do corredor arterial. Sob essa condição de rigidez operacional, a taxa de escoamento inferior à demanda resulta na formação de filas que ocupam o espaço físico das interseções adjacentes, gerando gargalos cíclicos na malha simulada. A figura 2 ilustra o acúmulo de veículos e a saturação da via sob o regime de tempo fixo.



Figura 2 – Captura de tela no Unity6.
Fonte: do autor (2026)

Em contrapartida, com a ativação dos algoritmos adaptativos de sincronismo progressivo, os veículos mantiveram uma velocidade de progressão constante estabelecida entre 40 km/h e 50 km/h. A configuração da banda verde permitiu o escoamento contínuo do fluxo de agentes, atenuando a formação de filas estáticas nas linhas de retenção, conforme registrado na Figura 3.

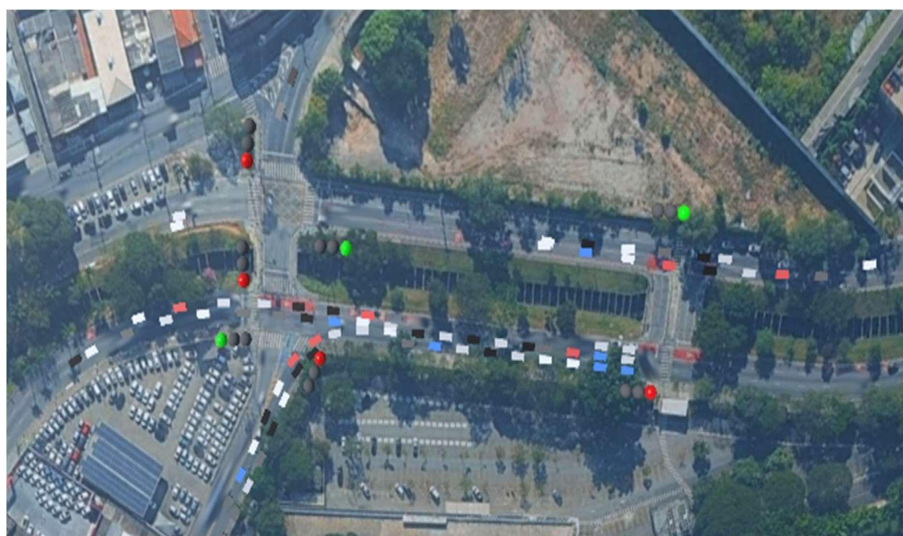


Figura 3 – Captura de tela no Unity 6.
Fonte: do autor (2026)

4.2 Eficiência de Tempo e Mobilidade

A avaliação experimental utilizou um corredor arterial de 3.800 metros composto por 13 interseções semaforicas. No cenário convencional, os agentes

operaram com velocidade máxima regulamentada de 50 km/h, enfrentando ciclos de 60 segundos de espera nos cruzamentos não coordenados. Com a implementação do sincronismo progressivo adaptativo ajustado para uma velocidade de cruzeiro de 40 km/h (11,11 m/s), o tempo teórico de travessia do corredor sem interrupções é expresso pela fórmula:

$$t = \frac{d}{v} \quad (1)$$

Onde:

- d = distância (m)
- v = velocidade (m/s)
- t = tempo (s)

O valor correspondente em minutos equivale a 5 minutos e 42 segundos, conforme verifica-se a aplicação da fórmula, abaixo:

$$t = \frac{3800 \text{ m}}{11,11 \text{ m/s}} \approx 342 \text{ segundos} \quad (2)$$

Os dados consolidados de desempenho operacional obtidos na simulação estão dispostos na tabela 1, abaixo.

Tabela 1 - Comparativo de Desempenho Real vs. Onda verde.

Métrica analisada	Sistema atual	Onda verde	Melhoria
Tempo total	20 min	5,7 min	71,5%
Velocidade Média	11,4 km/h	40km/h	250%
Tempo de espera	14 min	0 min	100%

Fonte: do autor (2026)

A análise dos dados indica uma redução de 71,5% no tempo total de deslocamento ao transitar para o modelo síncrono. Constatou-se que o ajuste dinâmico da defasagem (*offset*) entre os cruzamentos elevou a velocidade média operacional da via de 11,4 km/h para 40 km/h, eliminando o tempo de retenção em fila na via principal.

4.2 Eficiência de Tempo e Mobilidade

As emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) geradas pelos agentes foram monitoradas frame a frame, associando a taxa de descarga ao regime de operação do motor e à energia cinética instantânea de cada veículo (FERREIRA, 2019). Os resultados numéricos comparativos estão apresentados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Estimativa comparativa de emissões de CO₂ por cenário.

Cenário de simulação	Emissões em marcha lenta (g)	Emissões em aceleração (g)	Emissão total estimada (g)	Redução de poluentes (%)
Sistema atual	450g	750g	1.200g	-
Onda verde	30g	120g	150g	87,5%

Fonte: do autor (2026)

No cenário do Sistema Atual, a maior parcela das emissões concentrou-se na condição de Aceleração Transiente, atingindo o valor de 750g, o que equivale a 62,5% da massa total de poluentes liberada no corredor. Sob a ótica da Engenharia Mecânica, fundamentada pela Segunda Lei de Newton, a necessidade de vencer a inércia do veículo por 13 vezes consecutivas demanda picos de torque em baixas rotações. Para suprir essa demanda energética instantânea, ocorre o enriquecimento da mistura ar-combustível por comando da unidade de controle eletrônico (redução do fator Lambda), gerando menor eficiência térmica e picos na descarga de CO₂ na atmosfera (SILVA, 2020).

No cenário otimizado da Onda Verde, as emissões por aceleração transiente decresceram para 120g, indicando uma redução de 84% nesta variável isolada. Devido à manutenção da velocidade de cruzeiro constante, os motores operaram em regime

permanente, onde as forças dissipativas restringem-se ao arrasto aerodinâmico e à resistência ao rolamento, mantendo o funcionamento na zona de menor Consumo Específico de Combustível (BSFC) (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2018).

O segundo vetor avaliado refere-se à Marcha Lenta (*Idling*). Na configuração convencional, o estado estacionário estendido nas filas semafóricas resultou na emissão de 450g de CO₂. Do ponto de vista termodinâmico, a marcha lenta configura um regime de eficiência útil nula, no qual o combustível é consumido exclusivamente para vencer o atrito interno do motor e alimentar sistemas auxiliares, sem realizar trabalho de translação (SILVA, 2020). Com os algoritmos adaptativos, o tempo ocioso foi mitigado, reduzindo as emissões em marcha lenta para 30g, uma diminuição de 93,3%, evitando a retenção prolongada na via arterial (CET, 2022).

A integração desses fatores determinou o comportamento do indicador global apresentado no gráfico da Figura 4 (Comparativo de Emissões), registrando uma contração na emissão total estimada de 1.200g para 150g, o que representa uma redução global de 87,5% na liberação de gases de efeito estufa no corredor avaliado. Esses resultados numéricos comprovam que a otimização dos tempos de defasagem (*offset*) e a preservação da banda verde atuam diretamente na física do motor, transformando a engenharia de tráfego em uma ferramenta indispensável para a descarbonização e consolidação das cidades inteligentes (SANTOS; OLIVEIRA, 2022).

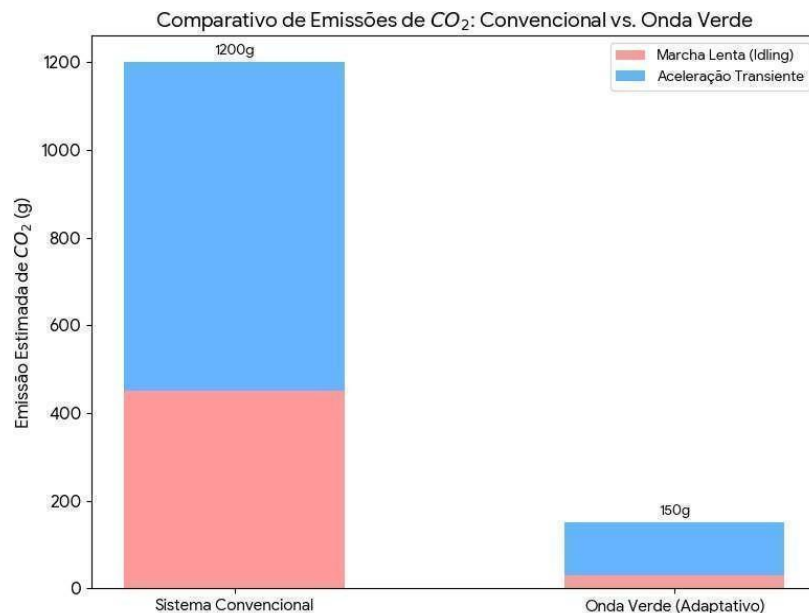


Figura 4 – Comparativo Emissões.

Fonte: do autor (2026)

Os resultados evidenciam que a coordenação semafórica em tempo real atua como um fator de ampliação da capacidade viária existente, sem a necessidade de expansões geométrica na infraestrutura. A convergência entre os sensores virtuais e o algoritmo de controle reduziu a dispersão de pelotões. Sob a perspectiva da engenharia mecânica, a estabilização do fluxo atenuou as solicitações mecânicas transientes nos sistemas de frenagem e transmissão dos agentes, validando o uso do Unity 6 como um ambiente computacional preciso para a simulação microscópica de tráfego.

5. Conclusão

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos ao desenvolver e avaliar, em ambiente virtual, a eficácia de um sistema de sincronismo semafórico progressivo adaptativo. A investigação permitiu constatar que a otimização dos tempos de controle viário supera as limitações dos modelos estáticos tradicionais, consolidando-se como uma resposta viável para os desafios contemporâneos de mobilidade e sustentabilidade nas metrópoles.

A interpretação dos resultados quantitativos permitiu formular conclusões fundamentais sobre a física do tráfego urbano. Demonstrou-se que a imposição de uma velocidade de cruzeiro inferior e constante é energeticamente superior à busca por velocidades nominais mais elevadas, quando estas são interrompidas por paradas recorrentes. O avanço expressivo obtido na fluidez viária e na velocidade média do corredor indica que a inteligência aplicada à sinalização semafórica reconecta o fluxo fragmentado, otimizando o aproveitamento da infraestrutura urbana existente de forma imediata.

Sob a ótica ambiental, o estudo adquire relevância estratégica ao posicionar a engenharia de tráfego como um instrumento ativo de descarbonização. A redução drástica na pegada de carbono do sistema simulado comprova que o combate às emissões veiculares nos centros urbanos não depende exclusivamente da transição para novas tecnologias de motores ou combustíveis limpos. A simples eliminação do comportamento "para-e-anda" atua diretamente na termodinâmica da combustão, minimizando regimes

ricos transientes e preservando a eficiência energética dos veículos em circulação. Além do ganho atmosférico, essa regularidade operacional traduz-se em benefício econômico e estrutural, reduzindo o desgaste mecânico prematuro de componentes de transmissão e fricção dos freios.

No aspecto metodológico, a consolidação do motor gráfico Unity 6 associado à linguagem C# representou um avanço técnico significativo. A plataforma demonstrou capacidade para atuar como um legítimo Gêmeo Digital (*Digital Twin*), superando as saídas puramente numéricas dos *softwares* analíticos tradicionais. A possibilidade de visualizar o comportamento dos agentes inteligentes em um cenário tridimensional e testar a reatividade de sensores virtuais em malha fechada confere alta confiabilidade ao modelo. Essa abordagem estabelece um laboratório computacional seguro e de baixo custo, capacitando gestores públicos e engenheiros a validarem políticas de tráfego complexas antes de sua execução em vias públicas, mitigando riscos de planejamento.

Como base em expectativa de continuidade desta pesquisa, aponta-se a necessidade de expandir o algoritmo adaptativo para redes de malha urbana em grade, avaliando o comportamento da Onda Verde diante de fluxos transversais conflitantes. Verifica-se a possibilidade de incorporação de modelos de comunicação Veículo-Infraestrutura (V2I), permitindo que os automóveis interajam diretamente com os controladores semafóricos. Em conclusão, o estudo reitera que a convergência entre os fundamentos clássicos da engenharia de transportes e as ferramentas modernas de simulação computacional constitui o caminho ideal para a transição em direção a cidades inteligentes, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Referências

CARDOZO, G. A. Engenharia de Tráfego: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Editora Acadêmica, 2018.

CAVALHEIRO, E. R. M. O uso de semáforos inteligentes como instrumento no combate à crise de mobilidade urbana: uma análise da cidade de São Paulo. 2021. 155 f. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/NOVE_f2693d32544e2625c1aaa91f04f8f627>. Acesso em: 12, maio, 2026.

CET - COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. Nota Técnica NT-281:

Critérios para Sincronismo e Coordenação Semafórica. São Paulo: CET, 2022. Disponível em: <<https://www.cetsp.com.br/media/1387991/nt-281.pdf>>. Acesso em: 25, maio, 2026.

CONTRAN. Resolução nº 486, de 07 de maio de 2014. Aprova o Volume V - Sinalização Semafórica, do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Brasília, 2014.

FERREIRA, J. L. Modelagem de Emissões Veiculares em Ambientes Virtuais de Simulação. Anais do Simpósio de Engenharia Mecânica, p. 112-125, 2019.

RODRIGUES, M. L. Algoritmos adaptativos para controle de tráfego em tempo real: uma revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Tecnologia Urbana, v. 14, n. 1, p. 22-38, 2023.

SANTOS, T. A.; OLIVEIRA, M. C. Algoritmos Adaptativos e Mobilidade: O Futuro dos Sistemas de Controle Semafórico. Revista de Engenharia e Tecnologia Urbana, v. 10, n. 2, p. 15-30, 2022.

SILVA, R. A. Estudo da emissão de CO₂ em ciclos de condução urbana: o impacto das paradas semaforicas. Revista de Engenharia e Meio Ambiente, v. 8, n. 2, p. 45-60, 2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. Capítulo 5: Coordenação de Semáforos e Maximização de Banda Verde. São Paulo: Poli-USP, 2018. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/ptr2377/Cap%C3%ADtulo5dz.pdf>>. Acesso em: 25, maio, 2026.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. PTR2377 - Princípios Básicos de Engenharia de Tráfego: Programa da Disciplina e Textos de Apoio. São Paulo: Poli-USP, 2018. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/ptr2377/PTR2377_2018_1sem.pdf>. Acesso em: 25, maio, 2026.