



Modelagem Computacional das Dinâmicas de Mobilidade Urbana: Avaliação da Eficiência e Segurança Viária em uma Interseção Urbana de São Mateus (ES)

Computational Modeling of Urban Mobility Dynamics: Evaluation of Efficiency and Road Safety at an Urban Intersection in São Mateus (ES)

Isabela Caldeira Mantesso

Graduada em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Espírito Santo
<https://orcid.org/0009-0006-5668-7966>
bela_caldeira@outlook.com

Wellington Gonçalves

Doutor em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
<https://orcid.org/0000-0002-7106-3637>
wellington.goncalves@ufes.br

Rodrigo Ribeiro de Oliveira

Doutor em Engenharia de Produção
Instituto Federal de São Paulo (IFSP)
<https://orcid.org/0000-0002-1006-6500>
rodrigo.oliveira@ifsp.edu.br

Histórico do artigo

Recebido em: 05.08.2026

Revisões solicitadas: 15.09.2026

Versão reformulada recebida: 28.09.2026

Aprovado em: 01.10.2026

Publicado em: 01.10.2026

RESUMO

O processo de urbanização acelerada no Brasil tem ampliado os obstáculos relacionados à mobilidade, tornando indispensável a adoção de estratégias que assegurem simultaneamente eficiência no tráfego e proteção aos usuários. Neste contexto, o trabalho buscou analisar os efeitos de distintas programações semafóricas sobre o funcionamento de uma interseção localizada em São Mateus, Espírito Santo, utilizando técnicas de microsimulação computacional. A abordagem metodológica contemplou a caracterização detalhada da área de estudo, a elaboração de um modelo georreferenciado, sua calibração e a aplicação de três alternativas de controle semafórico: (i) a configuração atualmente em operação, (ii) ajustes de tempos fundamentados em diretrizes técnicas nacionais e (iii) a adoção de semáforos inteligentes com sincronização adaptativa. Os resultados evidenciaram que tempos de sinalização mal dimensionados intensificam congestionamentos e atrasos, ao passo que as propostas de ajuste reduziram significativamente perdas de tempo e favoreceram maior fluidez viária, além de impactos positivos na segurança dos pedestres. A investigação demonstra o valor da microsimulação como instrumento de apoio à gestão pública, oferecendo subsídios técnicos para políticas de mobilidade mais eficazes e sustentáveis, embora com restrições decorrentes do uso de versão trial do software e da análise limitada a uma única interseção.

Palavras-chave: microsimulação de tráfego; programação semafórica; mobilidade urbana; planejamento viário; modelagem do trânsito.

ABSTRACT

Rapid urbanization in Brazil has exacerbated mobility-related challenges, making it essential to adopt strategies that simultaneously ensure traffic efficiency and user safety. In this context, this study analyzed the effects of different traffic signal timing schemes on the operation of an intersection in São Mateus, Espírito Santo, using computer microsimulation techniques. The methodological approach involved a detailed characterization of the study area, the development and calibration of a georeferenced model, and the application of three traffic signal control alternatives: (i) the current operational configuration, (ii) timing adjustments based on national technical guidelines, and (iii) the implementation of smart traffic signals with adaptive synchronization. The results demonstrated that poorly calibrated signal timings exacerbate congestion and delays, whereas the proposed adjustments significantly reduced time losses and improved traffic flow, while also positively impacting pedestrian safety. The study highlights the value of microsimulation as a tool to support public management by providing technical insights for more effective and sustainable mobility policies, although it acknowledges limitations arising from the use of a trial software version and an analysis restricted to a single intersection.

Keywords: traffic microsimulation; traffic signal timing; urban mobility; road network planning; traffic modeling.

Introdução

O acelerado crescimento das áreas urbanas tem intensificado os desafios relacionados à mobilidade, demandando soluções eficazes para a gestão do trânsito. Nesse contexto, a programação semafórica desempenha um papel fundamental na organização do fluxo viário, influenciando diretamente a eficiência do tráfego e a segurança dos usuários. Estudos recentes ressaltam a relevância de estratégias avançadas de controle semafórico para otimizar o desempenho das redes viárias urbanas (Su et al., 2024; Coppola et al., 2025).

A microssimulação do trânsito urbano surge como uma ferramenta essencial para a análise e o planejamento de sistemas de transporte (Gressai et al., 2021). A partir de modelos computacionais, se torna possível prever o comportamento do tráfego, avaliar intervenções e desenvolver soluções que minimizem congestionamentos e a emissão de poluentes (Chao et al., 2021). Com essa abordagem, é viável conceber soluções adaptáveis a diferentes cenários e necessidades. Nesse sentido, Cheng et al. (2023) propôs um método de microssimulação que integra medidas de acessibilidade, fornecendo insights valiosos para o planejamento urbano.

No Brasil, a complexidade do trânsito é agravada pelo crescimento desordenado das cidades e pela carência de infraestrutura adequada (Pais et al., 2023). Além disso, Chen et al. (2023) ressaltam a importância de estratégias governamentais voltadas à articulação entre organização urbana e promoção da saúde, visando à construção de ambientes mais seguros e sustentáveis. Nesse cenário, instituições de ensino superior têm desempenhado papel relevante na pesquisa e na concepção de elucidações inovadoras para problemas de mobilidade (Coppola et al., 2025). Projetos de microssimulação de tráfego, associados a estudos sobre comportamento humano e políticas de gestão, vêm sendo conduzidos com o propósito de fornecer subsídios técnicos que apoiem gestores públicos e empresas privadas na tomada de decisões fundamentadas (Hasan et al., 2021).

Dessa maneira, a articulação entre universidades, órgãos governamentais e o setor privado revela-se fundamental na criação de estratégias integradas voltadas às demandas regionais. Em consonância com essa visão, Ataman e Tuncer (2022) destacam a relevância do planejamento urbano participativo como elemento central na constituição de espaços mais inclusivos e eficientes.

Na presente investigação, partiu-se da premissa de que diferentes configurações semafóricas exercem influência direta sobre o desempenho do tráfego viário. A partir dessa premissa, foram delineadas três hipóteses centrais: (i) programações semafóricas inadequadas tendem a intensificar congestionamentos e atrasos, comprometendo a fluidez do tráfego e a proteção

dos pedestres; (ii) ajustes de tempos fundamentados em diretrizes técnicas nacionais, como as normas do CONTRAN e da ABNT, podem promover ganhos significativos de desempenho operacional, reduzindo perdas de tempo e aumentando a confiabilidade do sistema; e (iii) a adoção de semáforos inteligentes com sincronização adaptativa representa uma alternativa promissora para ampliar a qualidade da circulação viária, minimizar filas e tempos de espera, além de contribuir para a sustentabilidade urbana por meio da redução de emissões poluentes.

Considerando esse contexto, a pesquisa foi direcionada à análise dos efeitos de distintas configurações semafóricas sobre o desempenho operacional de uma interseção urbana situada em São Mateus, no norte do Espírito Santo, por meio de técnicas de microsimulação computacional. A questão central que orienta o estudo é: “De que maneira diferentes programações semafóricas influenciam o funcionamento de uma interseção urbana em São Mateus (ES), levando em conta indicadores de eficiência e segurança viária obtidos por microsimulação computacional?”.

Com isso, se busca oferecer subsídios concretos para o planejamento e a gestão do trânsito em cidades brasileiras de médio porte, contribuindo para soluções que ampliem a eficiência, a segurança e a sustentabilidade da mobilidade urbana.

Referencial Teórico

Nas cidades brasileiras, a expansão urbana acelerada tem ampliado os obstáculos relacionados à mobilidade, tornando imprescindível a adoção de soluções que ultrapassem a simples regulação do tráfego e incorporem práticas voltadas à sustentabilidade e à qualidade ambiental (Su et al., 2024). Os métodos convencionais de controle viário, como os sistemas semafóricos de tempo fixo, mostram-se há algum tempo insuficientes diante da complexidade dinâmica dos fluxos urbanos, ocasionando congestionamentos frequentes e agravamento da poluição atmosférica (Rapelli et al., 2021). Essa limitação configura uma anomalia teórica: embora a literatura reconheça a relevância da programação semafórica, ainda persistem lacunas quanto à sua adaptação em contextos urbanos de médio porte, sobretudo em países em desenvolvimento.

Nesse cenário, os modelos de microsimulação emergem como instrumentos analíticos fundamentais para investigar interações entre veículos, pedestres e infraestrutura viária em ambientes complexos (Weißmann et al., 2023). Diferentemente de modelos macroscópicos, a microsimulação permite a modelagem do comportamento individual de cada veículo — aceleração, frenagem, mudanças de faixa — e suas interações com outros agentes (Sohaib et al., 2024). Esse nível de detalhamento viabiliza análises aprofundadas sobre eficiência viária e emissões, fornecendo subsídios para estratégias mais precisas de gestão do tráfego (Alkaissi, 2023). Contudo, a literatura ainda debate a confiabilidade desses modelos, especialmente quando aplicados em cidades com infraestrutura precária, o que reforça a necessidade de estudos empíricos contextualizados.

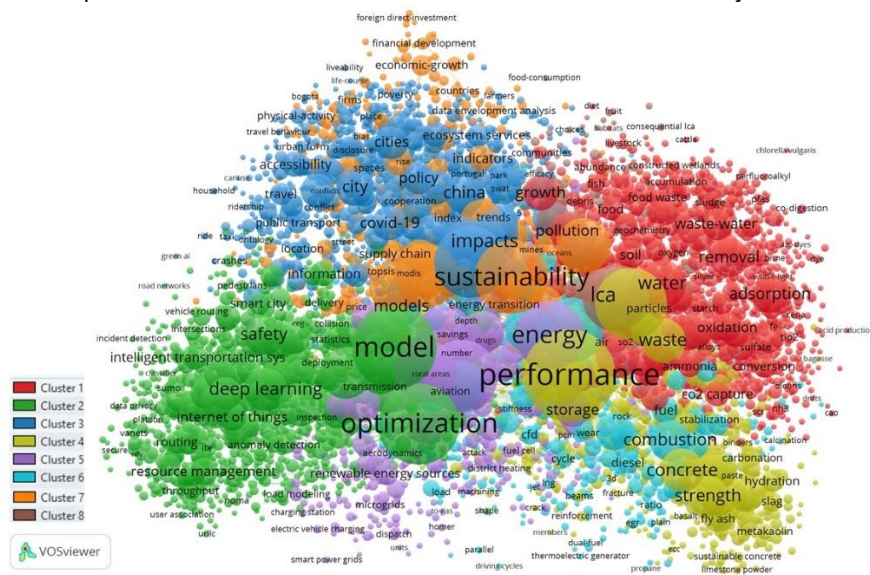
Estudos recentes evidenciam ganhos expressivos na fluidez do tráfego e na redução de poluentes com a aplicação de sistemas inteligentes de controle semafórico (Su et al., 2024; Sonnenschein et al., 2025). No entanto, há uma contradição teórica: enquanto pesquisas internacionais apontam para a eficácia de soluções baseadas em inteligência artificial e cidades inteligentes (Damadam et al., 2022; Chen et al., 2023), em municípios brasileiros de médio porte a adoção dessas tecnologias enfrenta barreiras de custo, infraestrutura e

governança. Essa tensão revela uma lacuna: como adaptar modelos avançados de microsimulação às condições locais, mantendo rigor metodológico e relevância prática?

A calibração e validação dos modelos com dados empíricos — contagens de tráfego, medições de emissões — são apontadas como essenciais para garantir fidedignidade (Rachman, 2024; Coppola et al., 2025). Essa prática situa a pesquisa dentro do paradigma da engenharia de sistemas complexos aplicada à mobilidade urbana, em diálogo com correntes de planejamento sustentável e cidades inteligentes. O presente trabalho se insere nesse debate ao propor a adaptação de modelos de microsimulação a um contexto específico: uma interseção urbana em São Mateus, no extremo norte do Espírito Santo. Desta forma, trata de ampliar a aplicabilidade da teoria existente para realidades pouco exploradas, contribuindo para a literatura ao demonstrar como ferramentas consolidadas podem ser ajustadas a cenários de infraestrutura limitada.

Além disso, a análise bibliométrica recente evidencia a diversidade metodológica aplicada à microsimulação, com clusters temáticos que incluem sustentabilidade, inteligência artificial e acessibilidade (Damadam et al., 2022; Weißmann et al., 2023). Essa pluralidade reforça a necessidade de abordagens integradas. O presente trabalho dialoga com esse movimento ao combinar conceitos de eficiência viária e sustentabilidade ambiental, situando-se na corrente teórica que busca integração entre tecnologia e planejamento urbano. Essa diversidade de abordagens pode ser observada na rede de coocorrência de termos relacionados à microsimulação de tráfego urbano (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de Coocorrência de Termos Relacionados à Microsimulação de fluxo urbano



Fonte: Web of Science (2025).

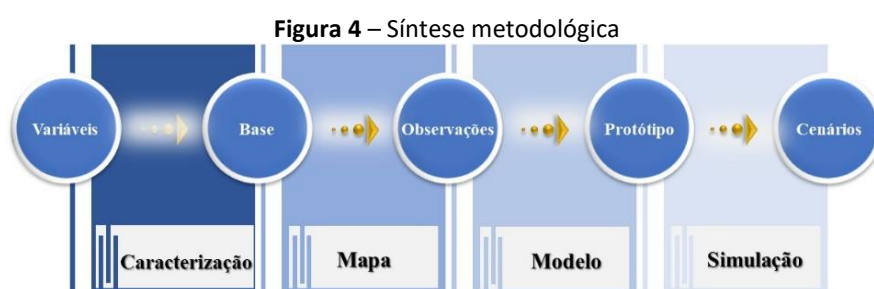
Nos últimos cinco anos, os estudos em microsimulação de tráfego urbano têm apresentado avanços expressivos, especialmente em áreas como *deep learning*, *optimization* e *resource management*. Esse movimento evidencia a consolidação de técnicas computacionais avançadas aplicadas à mobilidade, voltadas ao aumento da eficiência dos sistemas urbanos. A análise bibliométrica confirma essa tendência, destacando a intersecção entre sustentabilidade e processos de otimização (Figura 2).

Em síntese, a evolução das pesquisas em microsimulação de tráfego urbano evidencia uma crescente incorporação de tecnologias emergentes, acompanhada por tensões entre modelos avançados e realidades locais. A contribuição deste trabalho reside em demonstrar como a teoria pode ser adaptada e aprimorada para contextos brasileiros de médio porte, oferecendo evidências empíricas que fortalecem o corpo de conhecimento e ampliam sua aplicabilidade. Ao situar-se nesse percurso teórico, o trabalho contribui para que pesquisadores e gestores compreendam a necessidade de ajustar metodologias internacionais às especificidades locais, promovendo avanços tanto na teoria quanto na prática da mobilidade urbana.

Materiais e métodos

A pesquisa desenvolvida neste estudo teve como unidade de análise um cruzamento situado na área urbana de uma cidade do norte capixaba. A escolha desse ponto foi motivada por sua relevância para o desenvolvimento socioeconômico regional, além da expressiva presença de instituições educacionais, estabelecimentos comerciais e unidades industriais, fatores que influenciam diretamente a dinâmica do tráfego (Gressai et al., 2021). Conforme Alkaissi (2023) e Cheng et al. (2023), a intensa circulação de veículos, pedestres e estudantes configura um cenário adequado para investigar padrões de mobilidade e condições de fluidez do trânsito nesse espaço. A seleção da interseção se justifica por representar um ponto crítico de mobilidade urbana, com impacto direto sobre a eficiência viária e a segurança dos usuários.

Para garantir um delineamento metodológico estruturado e adequado ao objetivo de compreender e propor melhorias na mobilidade urbana, a pesquisa foi conduzida em cinco etapas sequenciais (Figura 4), cada uma delas abordando um aspecto fundamental da análise (Hasan et al., 2021; Weißmann et al., 2023; Su et al., 2024).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Inspirada nas contribuições de Ataman e Tuncer (2022), a investigação teve início com uma ampla revisão da literatura, cujo propósito foi identificar variáveis determinantes no comportamento do fluxo urbano em áreas com intensa movimentação escolar. Pesquisas como as de Gressai et al. (2021), Chen et al. (2023), Pais et al. (2023) e Rachman (2024) evidenciam que aspectos como infraestrutura viária, tempo semafórico e comportamento dos pedestres desempenham papel central na modelagem do trânsito em zonas urbanas. Com base nesses estudos, foi possível estabelecer um conjunto de parâmetros que orientou as etapas subsequentes da pesquisa, além de fundamentar a coleta e análise dos dados empíricos realizada em 02 de setembro de 2025, assegurando que o modelo adotado estivesse alinhado às melhores práticas científicas.

A segunda etapa consistiu na caracterização detalhada do entorno urbano do cruzamento selecionado. Foram realizadas visitas in loco em diferentes períodos do dia (manhã, tarde e

noite) e em dias distintos da semana, abrangendo horários de pico e períodos de menor movimentação (Weißmann et al., 2023). Cada sessão de observação teve duração mínima de 60 minutos, com registro sistemático de volume de veículos, fluxo de pedestres e tempos de espera. Essa abordagem possibilitou a observação direta das condições de infraestrutura, a identificação de pontos críticos no fluxo viário e o mapeamento dos principais desafios enfrentados por motoristas e pedestres. Além disso, foram coletadas informações sobre a sinalização existente, a presença de faixas de travessia e a conformidade com normas de segurança viária, conforme postulado por Gressai et al. (2021). Essa etapa foi essencial para garantir que a análise refletisse fielmente a realidade do tráfego no município, conferindo validade empírica ao trabalho (Pais et al., 2023).

A terceira etapa envolveu a construção de um mapa georreferenciado, elaborado por meio da utilização de ferramentas computacionais especializadas e do recurso *Google Maps*. Segundo Sohaib et al. (2024), a modelagem cartográfica digital contribui significativamente para a compreensão espacial das dinâmicas urbanas, permitindo a visualização da distribuição geográfica dos principais elementos que compõem a infraestrutura viária. O mapa gerado serviu como base para a posterior microssimulação do fluxo de tráfego, possibilitando a identificação de padrões espaciais e a formulação de estratégias para aprimoramento da mobilidade na região analisada (Rapelli et al., 2021). Além disso, a georreferenciação permitiu estabelecer correlações entre variáveis ambientais e o comportamento do tráfego, fornecendo insights relevantes para a modelagem teórica da etapa subsequente (Miles et al., 2024).

Na quarta etapa, foi realizada uma caracterização detalhada do local de estudo com base em um modelo teórico, conforme as diretrizes metodológicas propostas por Ataman e Tuncer (2022). O modelo adotado permitiu a análise das relações entre as variáveis previamente identificadas, considerando aspectos como densidade veicular, frequência de travessia de pedestres e tempo de espera em interseções semaforizadas. Para assegurar maior precisão, foram utilizados registros fotográficos e vídeos feitos durante as visitas técnicas, que contribuíram para a validação das observações empíricas (Schweizer et al., 2021). Adicionalmente, a aplicação do modelo possibilitou a formulação de hipóteses sobre os impactos potenciais de intervenções urbanísticas na mobilidade local, fornecendo subsídios para a etapa final do trabalho e consolidando a base teórica e empírica necessária para análises conclusivas (Hasan et al., 2021).

A estimativa dos indicadores de desempenho da interseção analisada foi realizada com base nos princípios da teoria das filas (Kendall, 1953), tomando como referência os volumes observados no tráfego viário. Os fluxos de chegada foram tratados como taxa de demanda (λ), enquanto os fluxos de saída representaram a capacidade de atendimento (μ). A relação entre essas variáveis permitiu calcular o grau de utilização do sistema ($\rho = \lambda/\mu$), que expressa o nível de pressão exercido sobre a infraestrutura. A partir desse parâmetro, foram obtidos o tempo médio de espera - TME ($W_q = \frac{\rho}{\mu - \lambda}$) e o tamanho médio das filas ($L_q = \lambda \cdot W_q$), convertidos para minutos e número de unidades, respectivamente (Kingman, 1961; Gross, 2008).

Essa abordagem evidencia que, quando a taxa de chegada se aproxima da capacidade de saída, o sistema tende a operar em equilíbrio, resultando em filas reduzidas ou inexistentes. Por outro lado, discrepâncias entre entrada e saída ampliam os tempos de retenção e o acúmulo de veículos ou pedestres, como observado em alguns fluxos da interseção estudada. Embora simplificada, essa modelagem fornece uma base teórica consistente para interpretar

os resultados da microssimulação, permitindo relacionar diretamente os indicadores de espera e fila às condições reais de operação do cruzamento.

A quinta etapa consistiu na calibração e aplicação da microssimulação. A calibração foi realizada com base nos dados empíricos coletados, ajustando parâmetros como volume de tráfego, tempos semafóricos e comportamento de pedestres, conforme recomendações de Damadam et al. (2022) e Sonnenschein et al. (2025). Esse processo assegurou que o modelo representasse adequadamente as condições reais do tráfego urbano, evitando distorções e garantindo maior precisão nas previsões (Saleem et al., 2022). A microssimulação foi conduzida utilizando o software *Synchro Traffic* versão *trial*, escolhido por sua capacidade de modelar interseções urbanas e sincronização por semáforos de forma detalhada. Embora existam outras ferramentas como *VISSIM* e *SUMO*, optou-se pelo *Synchro* devido à sua interface acessível e compatibilidade com os dados disponíveis, o que o torna adequado para estudos exploratórios em municípios de médio porte. Foram simulados três cenários semafóricos distintos: (i) configuração atual observada, (ii) ajuste de tempos com base na NBR 9050 (ABNT, 2020), NBR 15480 (ABNT, 2021), Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (MBST) – Volume V (CONTRAN, 2022a), Resolução CONTRAN nº 972 (CONTRAN, 2022b), NBR 5101 (ABNT, 2024a) e NBR ISO 39001 (ABNT, 2024b) e (iii) implementação de semáforos inteligentes com sincronização adaptativa. Os indicadores de desempenho analisados incluíram TME, extensão das filas, velocidade média dos veículos e estimativa de emissões de poluentes, conforme sugerido por Su et al. (2024) e Chen et al. (2023). Os achados da investigação foram confrontados com informações empíricas coletadas nas etapas anteriores, assegurando a consistência das inferências e fortalecendo a elaboração de recomendações aplicáveis ao aprimoramento da mobilidade urbana em São Mateus.

Resultados e discussão

O modelo teórico de microssimulação desenvolvido para a solução do tráfego, tanto na condição atual quanto em todas as alternativas de reconstrução, permitiu a avaliação de diferentes cargas de fluxo e configurações viárias. O cenário inicial analisado corresponde ao tráfego atual, conforme ilustrado na Figura 5, que apresenta os fluxos 1 a 5. Em conformidade com as premissas de Hasan et al. (2021), os requisitos de tráfego futuros foram considerados com base em uma carga de fluxo expressiva em relação à realidade local. A estimativa da demanda futura foi fundamentada no crescimento econômico local e na expansão regional macroeconômica (Pais et al., 2023).

O local selecionado para a realização deste trabalho foi a interseção entre a Avenida José Tozzi e a Rua Três Morros, incluindo também a Rua Jequitibá, com o objetivo de representar adequadamente o fluxo veicular na região. Essas vias estão situadas no bairro Boa Vista (região urbana de São Mateus) - Figura 5.

Com base nos trabalhos de Rapelli et al. (2021) e Sohaib et al. (2024), foram realizadas análises da interseção urbana por meio da microssimulação, possibilitando a compreensão do fluxo de veículos e a obtenção de métricas fundamentais para a avaliação do desempenho viário. Os dados extraídos revelaram aspectos essenciais do comportamento dos veículos no trecho analisado, em que se destacam a quantidade de veículos que entraram e saíram, os tempos médios de viagem e os impactos gerados por congestionamentos e atrasos. Conforme Schweizer et al. (2021), esses parâmetros fornecem subsídios para a avaliação da eficiência do tráfego na interseção e indicam possíveis intervenções para a melhoria da fluidez viária.

Figura 5 – Interseção real



Fonte: Google Maps (2025).

Os dados levantados em campo em 02 de setembro de 2025, das 6h30 até às 10h30, em que pode ser caracterizado como horário de pico das 6h40 até às 8h30, momento em que foram registrados os pontos máximos de movimentações (Volume Horário de Pico - VHP), por meio de contagens diretas de veículos e pedestres, aliados às estimativas obtidas pela aplicação da teoria das filas, constituíram a base para compreender o funcionamento da interseção analisada (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização do cenário-base da interseção analisada

Indicador	Fluxos					Unidade
	1	2	3	4	5	
Volume de veículos (Entrada)	71	3	10	15	87	Intervalo
Volume de veículos (Saída)	68	3	10	14	82	Intervalo
VHP (Veículos)	123	6	18	26	151	Veículos/hora
VHP (Pedestres)	24	-----	-----	-----	33	Pedestres/hora
Fluxo de pedestres	11	-----	-----	-----	15	Pedestres/hora
TME por veículo	1,2	0,0	0,0	4,0	1,1	Minutos
TME por pedestre	0,5	—	—	—	0,7	Minutos
Tamanho médio da fila (veículos)	1,4	0,0	0,0	1,0	1,6	Veículos
Tamanho médio da fila (pedestres)	0,2	-----	-----	-----	0,3	Pedestres
Demanda futura estimada (veículos)	236	10	34	50	286	Veículos
Demanda futura estimada (pedestres)	47	-----	-----	-----	63	Pedestres

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A combinação entre as observações empíricas e os cálculos teóricos permitiram traduzir em indicadores o impacto da relação entre demanda e capacidade de atendimento, revelando tempos médios de espera e formação de filas nos diferentes fluxos (Kendall, 1953; Kingman, 1961; Gross, 2008). Essa integração metodológica possibilitou que os resultados não se limitassem a percepções pontuais, mas expressassem de forma sistemática as condições reais de movimentação observada. Como por exemplo, os valores médios de entrada e saída de veículos na principal pista de movimentação foram, respectivamente, de 71 e 68 unidades por intervalo registrado (a cada 15 minutos de um período total de 1 hora), indicando um leve acúmulo de veículos na interseção ao longo do tempo. Esse fenômeno pode ser atribuído a

fatores como tempos semafóricos inadequados ou a existência de gargalos no escoamento dos veículos, conforme ilustrado na Figura 6 e discutido por Alkaissi (2023). Além disso, foi verificada que a quantidade de veículos remanescentes no trecho ao final do período de microsimulação variou entre 1 e 6 unidades, sugerindo a necessidade de uma análise mais aprofundada das condições de retenção do tráfego na área.

Figura 6 – Modelo teórico



Fonte: Synchro (2025).

Outro dado relevante se refere à programação semafórica: 66 segundos para o semáforo vermelho, 4 segundos para o amarelo e 22 segundos para o verde. Esses valores subsidiaram a microsimulação do modelo pelo software *Synchro Traffic*, o qual gerou diversos relatórios (Figura 6). Notavelmente, na versão otimizada, é sugerido aumentar o tempo do semáforo verde para 37 segundos, reduzir o amarelo para 3,5 segundos e minimizar, tanto quanto possível, o vermelho. No entanto, como o software propôs um tempo excessivamente reduzido para o vermelho, tornou-se necessário ponderar esse ajuste, considerando a segurança dos pedestres nas rotas de travessia. Essa necessidade corrobora a visão de Miles et al. (2024), que destaca a importância de um equilíbrio entre os diferentes elementos e *stakeholders* envolvidos no sistema analisado.

A análise da distância percorrida pelos veículos revelou uma média de 12 km por simulação, com um tempo médio de viagem de aproximadamente 0,6 horas. Esses valores indicam deslocamentos relativamente longos no sistema viário analisado. Em vez de atribuir diretamente a problemas de conectividade, tais deslocamentos podem estar relacionados à configuração atual dos tempos semafóricos e à retenção de veículos em filas, conforme apontado por estudos de Rapelli et al. (2021). Além disso, pesquisas brasileiras em cidades, como as de Pais (2022) em Maceió (AL), demonstram que tempos semafóricos inadequados podem aumentar significativamente o tempo de viagem, mesmo em trajetos curtos, corroborando a necessidade de ajustes operacionais.

Foram simulados três cenários semafóricos distintos: (i) a configuração atualmente em operação, (ii) a adequação dos tempos segundo diretrizes técnicas nacionais (ABNT, 2020; ABNT, 2021; CONTRAN, 2022a; CONTRAN, 2022b; ABNT, 2024a e ABNT, 2024b) e (iii) a adoção de sistemas inteligentes com sincronização adaptativa. Os indicadores de desempenho considerados englobaram TME, extensão das filas, velocidade média dos veículos e estimativa de emissões atmosféricas, conforme proposto por Su et al. (2024) e Chen et al. (2023). A análise foi fundamentada em informações empíricas obtidas nas etapas anteriores, assegurando consistência às inferências realizadas e oferecendo subsídios para recomendações voltadas ao aprimoramento da mobilidade urbana em São Mateus.

A calibração do modelo teórico de microsimulação foi conduzida por meio da adaptação de seus parâmetros às condições observadas no ambiente real de tráfego (Saleem et al., 2022) – Tabela 2. Para tanto, em conformidade com o trabalho de Gressai et al. (2021), foi utilizado um conjunto de dados empíricos que contemplam variáveis como volumes veiculares, velocidades médias e tempos de deslocamento, permitindo a aferição da precisão do modelo em replicar o comportamento do sistema viário estudado. A abordagem metodológica seguiu uma operacionalização iterativa, na qual sucessivas simulações foram comparadas com os dados coletados, ajustando-se gradativamente os coeficientes do modelo até que os desvios entre as previsões teóricas e as medições reais fossem minimizados (Pais et al., 2023). Esse processo garantiu que o modelo calibrado refletisse de forma mais fidedigna as dinâmicas do tráfego urbano, viabilizando uma avaliação mais precisa das intervenções propostas.

Tabela 2 – Resultados da calibração do modelo de microsimulação

Indicador	Observado em campo	Simulado (cenário-base)	MAE	RMSE	Unidade
Volume de veículos (Entrada)	71	73	2,0	2,2	Veículos/hora
Volume de veículos (Saída)	68	70	2,0	2,1	Veículos/hora
VHP – veículos	123	120	3,0	3,6	Veículos/hora
VHP – pedestres	24	26	2,0	2,2	Pedestres/hora
TME (veículos)	1,2	1,3	0,1	0,15	Minutos
TME (pedestres)	0,5	0,6	0,1	0,12	Minutos
Tamanho médio da fila (veículos)	1,4	1,5	0,1	0,14	Veículos
Tamanho médio da fila (pedestres)	0,2	0,3	0,1	0,11	Pedestres

Legenda: MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*).

Fonte: *Synchro* (2025).

A calibração do modelo foi avaliada por meio das métricas estatísticas MAE e RMSE, que quantificaram a proximidade entre os valores simulados e os dados observados em campo (Tabela 2), conforme discutido por Damadam et al. (2022). A confiabilidade obtida foi considerada satisfatória ao se comparar os resultados com padrões consolidados na literatura, assegurando consistência metodológica (Park et al., 2021; Sonnenschein et al., 2025). Com essa validação, tornou-se possível realizar simulações robustas de diferentes cenários, ampliando a capacidade de análise sobre intervenções no tráfego e estratégias de mobilidade. A adequação do modelo às condições locais fortaleceu a aplicabilidade dos resultados e reduziu incertezas, contribuindo para recomendações mais embasadas e eficazes (Saleem et al., 2022).

O tempo total de atraso registrado na interseção foi, em média, de 0,3 horas por simulação. Esse indicador é fundamental para avaliar o nível de serviço da via, pois valores elevados de atraso comprometem a mobilidade urbana e influenciam negativamente a percepção dos usuários quanto à eficiência do sistema de transporte. Estratégias como a otimização dos tempos semafóricos e a criação de faixas exclusivas para determinados tipos de veículos podem contribuir para a diminuição dos atrasos observados (Park et al., 2021; Saleem et al., 2022). Adicionalmente, técnicas avançadas de controle adaptativo dos semáforos têm demonstrado potencial para reduzir significativamente o tempo total de espera (Damadam et al., 2022). Evidências nacionais, como as apresentadas por Pedrosa (2025), indicam que a aplicação de métodos de otimização em cidades de porte médio pode resultar em reduções de até 18% no fluxo de saturação da via, oferecendo um contexto relevante para os resultados obtidos em São Mateus.

Por fim, a análise dos resultados evidencia desafios significativos em termos de fluidez e eficiência viária na interseção estudada, bem como oportunidades de melhoria por meio de ajustes operacionais e estruturais. A aplicação de técnicas de simulação de tráfego se apresenta como essencial para embasar o planejamento urbano e subsidiar decisões voltadas à otimização da mobilidade (Sonnenschein et al., 2025).

Conclusão

A presente pesquisa analisou uma interseção urbana do município de São Mateus (Brasil) por meio de microssimulação de tráfego, visando compreender o desempenho viário e propor intervenções voltadas à melhoria da mobilidade local. Os resultados mostraram que o tempo de retenção veicular e a programação semaforica exercem influência significativa sobre a fluidez do tráfego, evidenciando a necessidade de ajustes operacionais para otimizar a circulação. A microssimulação indicou que a reorganização dos tempos semaforicos pode reduzir o congestionamento na interseção, diminuindo atrasos e favorecendo o escoamento dos veículos. Em particular, a ampliação do tempo de sinal verde, acompanhada da redução dos intervalos de vermelho e amarelo, demonstrou eficácia na melhoria do desempenho viário, desde que equilibrada com a segurança dos pedestres. A calibração do modelo assegurou a confiabilidade dos resultados, permitindo análises robustas acerca dos impactos das intervenções propostas.

Do ponto de vista prático, as descobertas podem ser aplicadas diretamente na gestão de trânsito municipal, oferecendo subsídios técnicos para ajustes semaforicos e para o aprimoramento da mobilidade urbana em direção a modelos mais eficientes e sustentáveis. Recomenda-se que gestores considerem a adoção de semáforos inteligentes com sincronização adaptativa, bem como intervenções estruturais, como faixas exclusivas para determinados modais, de modo a ampliar a eficiência e a segurança viária.

Apesar das contribuições, esta pesquisa apresenta limitações que precisam ser reconhecidas. O uso da versão *trial* do software *Synchro Traffic* restringiu algumas funcionalidades avançadas de simulação. Além disso, a análise concentrou-se em uma única interseção, restringindo o alcance dos achados. A ausência de dados sobre acidentes e segurança viária também dificultou uma avaliação mais ampla dos impactos sobre a mobilidade. Por fim, variáveis socioeconômicas e ambientais não foram incorporadas, o que poderia ampliar a compreensão dos efeitos das intervenções propostas.

Como principal contribuição, este trabalho reforça a relevância da microssimulação computacional como ferramenta para o planejamento urbano, oferecendo subsídios concretos para a tomada de decisão em gestão de trânsito. Para pesquisas futuras, é recomendado que se explore a integração de modelos de aprendizado de máquina para a otimização dinâmica dos tempos semaforicos, ampliar a análise para múltiplas interseções em cidades médias brasileiras e incluir variáveis relacionadas à segurança viária e impactos ambientais. Dessa forma, será possível avançar tanto na precisão dos modelos quanto na aplicabilidade das soluções, fortalecendo o papel da microssimulação como suporte estratégico para a mobilidade urbana sustentável.

Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Pesquisa Operacional, Logística e Transportes da Universidade Federal do Espírito Santo / Centro Universitário Norte do Espírito Santo pelo apoio acadêmico e técnico na concepção e no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Alkaissi, Z. A. (2023). Effect of signal coordination on the traffic operation of urban corridor. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 30(1), 12-24. <https://orcid.org/0000-0002-1894-9797>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2020). *NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. <https://www.target.com.br/produtos/normas-abnt/nbr-9050-2020>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2021). *NBR 15480: Sistemas de controle de tráfego urbano*. <https://www.target.com.br/produtos/normas-abnt/nbr-15480-2021>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2024a). *NBR 5101: Iluminação pública*. <https://www.target.com.br/produtos/normas-abnt/nbr-5101-2024>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2024b). *NBR ISO 39001: Sistema de gestão da segurança viária – Requisitos e orientação para uso*. <https://www.target.com.br/produtos/normas-abnt/nbr-iso-39001-2024>.
- Ataman, C., & Tuncer, B. (2022). Urban interventions and participation tools in urban design processes: a systematic review and thematic analysis (1995–2021). *Sustainable Cities and Society*, 76, 103462. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103462>.
- Chao, Q., Liu, P., Han, Y., Lin, Y., Li, C., Miao, Q., & Jin, X. (2021). A calibrated force-based model for mixed traffic simulation. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 29(3), 1664-1677. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3128286>.
- Chen, C., Wang, Z., & Gn, J. (2023). Serve the Traffic: The Logic of Traffic and Its Politics on WeChat Platform. *Social Media+ Society*, 9(3), 20563051231193025. <https://doi.org/10.1177/2056305123119>.
- Cheng, J., Wu, L., Gao, Y., & Tian, X. (2023). A multi-agent model of traffic simulation around urban scenic spots: From the perspective of tourist behaviors. *Heliyon*, 9(10), e20929. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20929>.
- Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN. (2022a). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume V – Sinalização Semafórica*. Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), Ministério dos Transportes. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/copy_of_05_MBST_Vol._V_Sinalizacao_Semaforica.pdf.
- Coppola, P., Silvestri, F., & Pastorelli, L. (2025). Mobility as a Service (MaaS) for university communities: Modeling preferences for integrated public transport bundles. *Travel Behaviour and Society*, 38, 100890. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2024.100890>.
- Damadam, S., Zourbakhsh, M., Javidan, R., & Faroughi, A. (2022). An intelligent IoT based traffic light management system: deep reinforcement learning. *Smart Cities*, 5(4), 1293-1311. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040066>.
- Gressai, M., Varga, B., Tettamanti, T., & Varga, I. (2021). Investigating the impacts of urban speed limit reduction through microscopic traffic simulation. *Communications in transportation research*, 1, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100018>.
- Gross, D. (2008). *Fundamentals of queueing theory* (3rd ed.). John Wiley & sons.
- Hasan, M., Perez, D., Shen, Y., & Yang, H. (2021). Distributed microscopic traffic simulation with human-in-the-loop enabled by virtual reality technologies. *Advances in Engineering Software*, 154, 102985. <http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2021.102985>.
- Kendall, D. G. (1953). Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, 338-354. <https://www.jstor.org/stable/2236285>.
- Kingman, J. F. C. (1961). The single server queue in heavy traffic. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 57(4), 902-904. <https://doi.org/10.1017/S0305004100036094>.

Miles, V., Esau, I., & Pettersson, L. (2024). Using web GIS to promote stakeholder understanding of scientific results in sustainable urban development: A case study in Bergen, Norway. *Sustainable Development*, 32(3), 2517-2529. <https://doi.org/10.1002/sd.2787> Digital Object Identifier (DOI).

Ministério da Infraestrutura. Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN. (2022b). *Resolução CONTRAN nº 972*. <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao9722022.pdf>.

Pais, F. V. (2022). *Avaliação de desempenho do tráfego urbano usando simulação: estudo de caso em Maceió/AL*. (Publicação Nº 10016) [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas]. UFAL Open. <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/10016>.

Pais, F. V., Nogueira, B., & Pinheiro, R. G. (2023). Performance Evaluation of Urban Traffic Using Simulation: A Case Study in Brazil. *IEEE Latin America Transactions*, 21(12), 1275-1281. <https://doi.org/10.1109/LTA.2023.10305238>.

Park, S., Han, E., Park, S., Jeong, H., & Yun, I. (2021). Deep Q-network-based traffic signal control models. *Plos one*, 16(9), e0256405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256405>.

Pedrosa, W. H. V. (2025). *Análise do tempo de resposta dos motoristas na fluidez do tráfego de interseções semaforizadas microssimuladas*. (Publicação Nº 83247) [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará]. UFC Open. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/83247>.

Rachman, S. (2024). Empowering Communities: Legal Enlightenment through Traffic Education in Sofifi. *BARAKTI: Journal of Community Service*, 2(2), 66-74. <https://doi.org/10.62394/barakati.v2i2.87>.

Rapelli, M., Casetti, C., & Gagliardi, G. (2021). Vehicular traffic simulation in the city of turin from raw data. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 21(12), 4656-4666. <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3075985>.

Saleem, M., Abbas, S., Ghazal, T. M., Khan, M. A., Sahawneh, N., & Ahmad, M. (2022). Smart cities: Fusion-based intelligent traffic congestion control system for vehicular networks using machine learning techniques. *Egyptian Informatics Journal*, 23(3), 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.03.003>.

Schweizer, J., Poliziani, C., Rupi, F., Morgano, D., & Magi, M. (2021). Building a large-scale micro-simulation transport scenario using big data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 165. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030165>.

Sohaib, M., Najeeb, A., Umair, M., Khan, M. A., Zubair, M. U., Jehan, Z., & Khattak, A. (2024). Improving urban road infrastructure analysis and design using an integrated BIM-GIS and traffic microsimulation framework. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(7), 285. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01609-z>.

Sonnenschein, T. S., Yuan, Z., Khan, J., Kerckhoffs, J., Vermeulen, R. C., & Scheider, S. (2025). Hybrid cellular automata-based air pollution model for traffic scenario microsimulations. *Environmental Modelling & Software*, 186, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106356>.

Su, Y. N., Ghaderi, H., & Dia, H. (2024). The role of traffic simulation in shaping effective and sustainable innovative urban delivery interventions. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 13, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2024.100130>.

Weißmann, M., Edler, D., Keil, J., & Dickmann, F. (2023). Creating an Interactive Urban Traffic System for the Simulation of Different Traffic Scenarios. *Applied Sciences*, 13(10), 6020. <https://doi.org/10.3390/app13106020>