

MODELAGEM E MICROSSIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA SEGURANÇA VIÁRIA DE USUÁRIOS VULNERÁVEIS DE VIAS URBANAS (VRUS)

Pedro Henrique Valentim Cezar – pedrohvalentim@unifei.edu.br

Alexandre Ferreira de Pinho – pinho@unifei.edu.br

Josiane Palma Lima – jplima@unifei.edu.br

Palavras-chave: Mobilidade Urbana, Segurança Viária, Interseções Urbanas, Microsimulação de Tráfego, VRUs.

1. INTRODUÇÃO

A investigação sobre a segurança viária se consolida como um dos maiores desafios contemporâneos para as áreas de gestão de tráfego, engenharia de transportes e mobilidade urbana. Segundo dados da Organização Pan-Americana da Saúde (2025), os usuários vulneráveis das vias (do inglês, *Vulnerable Road Users – VRUs*), representam uma fração expressiva das vítimas fatais no trânsito das cidades latino-americanas. Esses grupos, que incluem pedestres e ciclistas, estão particularmente suscetíveis a acidentes devido à falta de proteção física em comparação com os ocupantes de veículos motorizados (NATIONAL ROAD SAFETY STRATEGY, 2021).

Historicamente, os estudos de segurança viária foram desenvolvidos para se analisar, de forma primária, o comportamento veicular. Com o avanço das técnicas de microsimulação de tráfego e de medidas substitutivas de segurança, surgem novos modelos voltados à identificação de conflitos potenciais antes da ocorrência de acidentes reais. Contudo, a representação do comportamento humano nesses modelos ainda é limitada, especialmente no caso de pedestres e ciclistas, cujo processo decisório pode ser fortemente influenciado por percepções subjetivas de tempo, espaço e risco.

Com isso, buscando evidenciar as interações de risco de pedestres e ciclistas (VRUs) com o ambiente de fluxo veicular motorizado em vias urbanas, o presente estudo propõe o desenvolvimento de um modelo computacional híbrido de microssimulação espacial, com utilização de lógica de tomada de decisões baseada em simulação por agentes (SBA), que buscará maximizar métricas de segurança viária para VRUs. Para que os resultados sejam alcançados, têm-se como objetivos específicos:

- Caracterizar os cenários de riscos em cruzamentos selecionados, por meio de análise de métricas como, tempo para colisão, tempo após interação potencialmente perigosa e invasões de áreas críticas;
- Avaliar intervenções através de experimentos de validações estatísticas, como análises de sensibilidade, comparando cenários atuais e propostos, qualificando os possíveis riscos para VRUs;
- Verificar a eficácia da técnica de simulação híbrida para estudo de comportamentos de usuários vulneráveis.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

Por meio de uma revisão sistemática de literatura (RSL), é identificado o crescimento da utilização de ferramentas computacionais na análise da segurança viária urbana. *Softwares* de microssimulação do tráfego, como por exemplo o *PTV VISSIM*, são frequentemente utilizados para modelar fluxos complexos e avaliar cenários de intervenção (ABIDEEN *et al.*, 2020; CUI *et al.*, 2024). No entanto, os modelos tradicionais de microssimulação apresentam limitações na representação de comportamentos adaptativos e decisões individuais, especialmente no caso de pedestres e ciclistas. A simulação baseada em agentes (SBA) surge como uma alternativa capaz de superar essas restrições (MACAL; NORTH, 2019). Essa abordagem de simulação está presente em ambientes virtuais de microssimulação do tráfego. Estudos recentes demonstram que a SBA é particularmente adequada para

investigar fenômenos emergentes e interações de risco entre múltiplos modais de transporte (HU *et al.*, 2023; JOHORA, 2022).

O ambiente construído e sua interação com o fluxo de pedestres são abordados em pesquisas desenvolvidas de forma a entender como a existência de infraestrutura adequada impacta na possibilidade de ocorrer acidentes de trânsito em determinados cruzamentos mais do que em outros. As formas geométricas das vias, a existência de calçadas, ciclovias e ciclofaixas, iluminação pública, tipos de pavimentos, entre outros, estão relacionados aos riscos diversos que os usuários vulneráveis das vias urbanas (VRUs) estão expostos, dentro do contexto de segurança das vias (OKAIDJAH *et al.*, 2022; PAN *et al.*, 2022; CASTRO *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019; SACCHI *et al.*, 2018). Porém, há lacunas identificadas na literatura que persistem no que diz respeito à representação adequada do comportamento de pedestres e ciclistas, muitas vezes tratados de forma genérica ou secundária em relação ao tráfego motorizado (SACCHI *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2021).

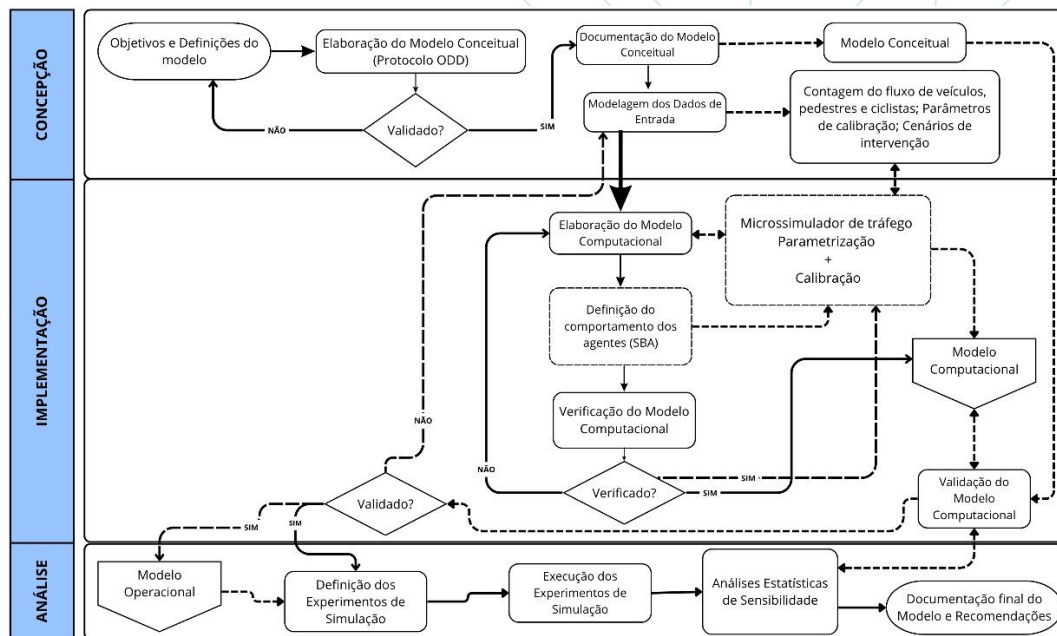
2.2 Metodologia

A metodologia desta pesquisa é de natureza quali-quantitativa e o desenvolvimento do modelo proposto é estruturado em três etapas principais: (i) concepção; (ii) implementação; e (iii) análise. A Figura 1 demonstra o fluxograma elaborado a partir de adaptações das metodologias propostas por MONTEVECHI *et al.* (2010); DONIN & RUBIO (2020).

Com base em dados primários e secundários coletados no município de Itajubá-MG, por meio de análises de imagens de câmeras de segurança pública, são selecionadas as interseções a serem estudadas. Dentre os critérios para determinação dos locais de estudo, destaca-se que as interseções selecionadas devem apresentar elevado fluxo de VRUs (pedestres e ciclistas) e veículos motorizados, além de deficiências que possam ser visíveis existentes na infraestrutura das vias. As contagens de tráfego são realizadas em dias úteis (segunda à sexta-feira), nos períodos de pico, sendo na parte da manhã das 07:00h às 10:00h e na parte da tarde das 16:00h às 19:00h, utilizando-se dados reais de

imagens de câmeras de monitoramento, disponibilizados pelo departamento de segurança pública da Guarda Civil Municipal.

Figura 1 – Etapas para o desenvolvimento do modelo proposto.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A modelagem computacional é elaborada em ambiente virtual dedicado à microssimulação de tráfego, com base na geometria real do local e parâmetros ajustados conforme observações empíricas durante a análise das imagens de câmera das interseções estudadas. São simulados cenários com diferentes tempos de sinalização e volume de tráfego para avaliar os efeitos sobre indicadores como tempo de espera, número de travessias inseguras e interações de risco que possam ocasionar colisões. A validação do modelo computacional desenvolvido é realizada através de análises estatísticas de sensibilidade.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Ao propor uma representação mais realista e calibrada do comportamento de pedestres e ciclistas em interseções urbanas, espera-se que o modelo computacional híbrido desenvolvido nesta pesquisa contribua de forma significativa para a

formulação e avaliação de políticas públicas voltadas à segurança e à mobilidade urbana sustentável.

A proposta de incorporação de parâmetros comportamentais baseados em medidas de segurança, como ‘tempo para colisão’ (do inglês, *Time-to-Collision - TTC*), permitirá que a simulação reflita com maior fidelidade as decisões individuais e coletivas de VRUs, em diferentes contextos de interação com o tráfego motorizado. Outro resultado esperado é o avanço metodológico na calibração de modelos comportamentais de pedestres e ciclistas, em especial pela adoção do *TTC* como indicador central de ajuste de parâmetros.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo propõe um modelo híbrido de microssimulação espacial com base em agentes, voltado à análise da segurança viária de pedestres e ciclistas em interseções urbanas. A pesquisa contribui para preencher lacunas metodológicas existentes na literatura, ao incorporar métricas de segurança viária como variáveis de calibração e validação de comportamento dos agentes.

De forma mais ampla, espera-se que os resultados contribuam para o desenvolvimento de políticas públicas de mobilidade urbana, capazes de promover ambientes viários mais seguros, eficientes e inclusivos. O trabalho elucida a importância da modelagem e simulação híbrida como instrumento de pesquisa aplicada, capaz de apoiar a formulação de soluções inovadoras para os setores de engenharia de tráfego e segurança viária urbana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Donin, A. L.; Rubio, J. E. Proposta de metodologia para o desenvolvimento de modelos híbridos de simulação. *Revista Produção Online*, v. 20, n. 2, p. 559–585, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v20i2.3757>.

Hu, W.; Mu, H.; Chen, Y.; Liu, Y.; Li, X. Modeling Interactions of Autonomous/Manual Vehicles and Pedestrians with a Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient. *Sustainability*, v. 15, n. 7, art. 6156, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15076156>.

Johora, F. T. Modeling Interactions among Pedestrians and Cars in Shared Spaces. *Wiesbaden: Springer Vieweg*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38345-9>.

Macal, C. M.; North, M. J. Agent-based Modeling and Simulation: *From Conceptual Modeling to Execution*. *Journal of Simulation*, v. 13, n. 2, p. 83–93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/17477778.2018.1503270>.

Montevecchi, J. A. B. et al. (2010). Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: *An application in a Brazilian tech company*. *Proceedings – Winter Simulation Conference*. 1624 1635. DOI: 10.1109/WSC.2010.5678908. 12p.

NATIONAL ROAD SAFETY STRATEGY. *Statistics on road safety and vulnerable road users*. Disponível em: <https://www.nationalroadsafetystrategy.ca/>.

Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS). (2025, 22 de janeiro). *Novo relatório da OPAS sobre segurança viária destaca progresso lento e desigual*. Brasília: OPAS. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/22-1-2025-novo-relatorio-da-opas-sobre-seguranca-viaria-destaca-progresso-lento-e-desigual>.

Okaidjah, D., Haddad, M., Day, C., & Das, B. (2023). Spatial Analysis of Relationships Between Intersection Safety, the Urban Built Environment, and Average Income Level: A Case Study of Des Moines. *Transportation Research Record*, 2677(2), 803–817. <https://doi.org/10.1177/03611981221108392>.

Pan, H., Wang, Y., & Szűcs, G. (2022). Occupational road traffic accidents and aberrant driving behaviors among taxi and full-time transport drivers: A comparative study. *Transportation Letters*, 15(10), 1366–1375. <https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2157075>.

PTV, P. T. V. A. Ptv Vissim 25 user manual. *Karlsruhe, Germany*, 2025.

PTV GROUP. *Mesoscopic and Hybrid Simulations in PTV Vissim*. PTV Technology Plus, 2025. Disponível em: <https://blog.ptvgroup.com/en/technologyplus/mesoscopic-and-hybrid-simulations-in-ptv-vissim/>.

Sacchi, E., Sayed, T., Osama, A. (2015). Developing crash modification functions for pedestrian signal improvement. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.009>.

Sacchi, E.; Lammel, G.; Ahlert, A.; Werneck, A. Evaluation of surrogate safety measures in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Procedia*, v. 33, p. 329–336, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.100>.

Ui Abideen, Z., Sun, H., Yang, Z., & Ali, A. (2020). The Deep 3D Convolutional Multi-Branching Spatial-Temporal-Based Unit Predicting Citywide Traffic Flow. *Applied Sciences*, 10(21), 7778. <https://doi.org/10.3390/app10217778>.

Wang, P., Cao, S., & Yao, M. (2019). Fundamental diagrams for pedestrian traffic flow in controlled experiments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 525, 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.057>.

Wang, K., Wang, Y., Wang, L., Du, H., & Nam, K. (2021). Distributed intersection conflict resolution for multiple vehicles considering longitudinal lateral dynamics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(5), 4166–4177. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3072629>.