

APLICAÇÃO DO INDICADOR DE ACESSIBILIDADE EM PONTOS DE ÔNIBUS POR SIMULAÇÃO HÍBRIDA

José da Silva Ferreira Junior – joseferjunior@yahoo.com.br

Josiane Palma Lima – jplima@unifei.edu.br

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

Palavras-chave: Simulação baseada em agentes, Simulação a eventos discretos, Mobilidade urbana, Transporte público.

1. INTRODUÇÃO

Compreender como sistemas urbanos respondem a novos eventos exige integrar comportamento individual (microscópico) e coletivo (macroscópico). Isso requer métodos que combinem métricas de mobilidade e transporte coletivo, fundamentais para o acesso a serviços como saúde, educação, trabalho e lazer (Carmen; Idalia, 2023; Huang *et al.*, 2022).

A Modelagem e Simulação Híbrida (MSH) tem sido aplicada para representar simultaneamente usuários, lógica operacional e evolução do ambiente urbano. Estudos recentes destacam variáveis comportamentais associadas a processos discretos no transporte (Bounadi; Boussalia; Bellaouar, 2023; Mustafee; Harper; Fakhimi, 2022; Ferreira Junior, Lima; Pinho, 2025; Pessoa *et al.*, 2025).

Essas pesquisas reforçam o uso da MSH na avaliação do transporte público, sobretudo nos pontos de ônibus. Vidovic, Sostaric e Budimir (2019) salientam a importância de indicadores logísticos para decisões. Ingram (1971) e Bracarense e Ferreira (2018) destacam a relevância de mensurar a atratividade das estações pela interação entre oferta de transporte e esforço do usuário (tempo, distância ou custo), por meio do indicador de acessibilidade.

Parte-se da hipótese de que integrar esse indicador à MSH fornece subsídios para avaliar a localização de pontos de ônibus. O objetivo é aplicá-lo às linhas da cidade de Passos/MG, em três etapas: modelar eventos e agentes (passageiros,

pontos, POIs e GIS); coletar tempos de deslocamento; calcular e visualizar no GIS o indicador de acessibilidade.

Apesar de avanços em simulação de transportes, faltam aplicações sistemáticas da MSH no transporte urbano, especialmente na avaliação de pontos de ônibus. A originalidade deste estudo está em propor um modelo híbrido que combina SBA e SED ao indicador de Ingram (1971), estruturando decisões sobre localização de pontos em cidades médias.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

O estudo articula três áreas: simulação híbrida, mobilidade urbana e indicador de acessibilidade em estações de transporte público. A MSH combina subsistemas discretos, contínuos e baseados em agentes, unificando paradigmas para representar sistemas complexos, inclusive de mobilidade urbana (Brailsford, 2023; Mustafee; Harper; Fakhimi, 2022).

A pesquisa enquadra-se na taxonomia D (híbrida acoplada), em que componentes distintos interagem em tempo de execução (Mustafee; Harper; Fakhimi, 2022). Utiliza de modelo SBA integrados a um SED, conectados ao ambiente GIS do simulador e com cálculos de equações no MsExcel.

A mobilidade urbana envolve deslocamentos influenciados por fatores espaciais, temporais e sociais, exigindo modelos sensíveis à heterogeneidade comportamental. O transporte público é central para o acesso a serviços, operando de forma interdependente e complexa (Carmen; Idalia, 2023; Huang *et al.*, 2022; Santos; Lima, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

O impacto das tecnologias emergentes na mobilidade urbana tem sido foco de pesquisas recentes. A MSH integra análises micro e macroscópicas e, ao combinar SBA e SED, capta a heterogeneidade e reforça a robustez dos modelos (Brailsford, 2023; Huang *et al.*, 2022).

A avaliação da MSH exige indicadores específicos de mobilidade urbana. A literatura apresenta diversas métricas oriundas de diferentes segmentos do transporte (Bracarense; Ferreira, 2018; Vidovic *et al.*, 2019). Entre elas, destaca-se o indicador

de acessibilidade de Ingram (1971), Equação 1, que quantifica a facilidade de acesso a pontos de embarque considerando dimensões espaciais, temporais e econômicas (Bracarense; Ferreira, 2018)..

$$A_i = \sum_j^n O_j \times f(c_{ij}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

- A_i: acessibilidade do ponto;
- O_j: oportunidades de destino;
- c_{ij}: custo de deslocamento (tempo);
- f(c_{ij}): função de impedância decrescente.

2.2 Método de Pesquisa

Segundo Marconi e Lakatos (2022), esta pesquisa é aplicada, descritivo-explicativa, com abordagem quali-quantitativa baseada em dados secundários. O método foi a modelagem e simulação, representando sistemas reais em ambiente computacional em três etapas: concepção, implementação e análise (Bertrand; Fransoo, 2002).

Foram usados MsExcel e AnyLogic. O Excel organizou os dados de latitude dos pontos de ônibus, agentes e pontos de interesse (POI), além de apoiar a análise do indicador de acessibilidade. O AnyLogic integrou SBA, SED e SD em ambiente único, com suporte a bibliotecas externas e geolocalização, eficaz para estudos de mobilidade urbana (Miedviedieva; Baharii, 2023).

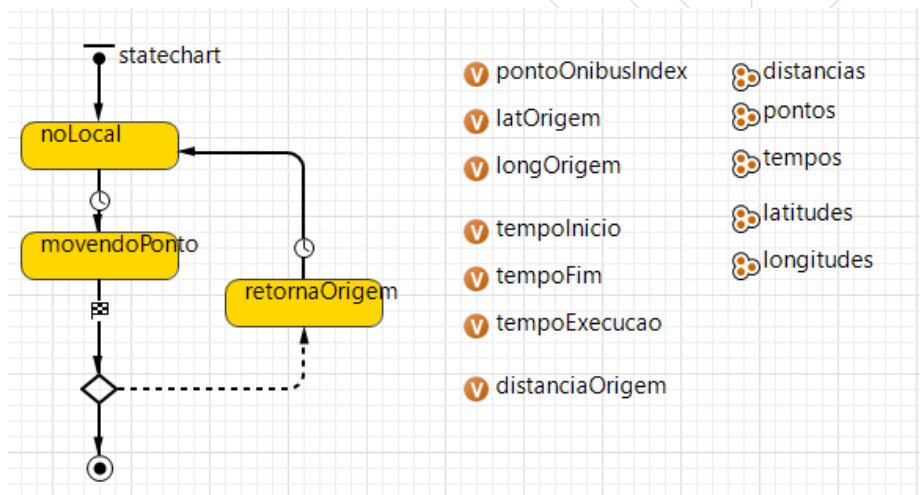
O estudo partiu do modelo de Ferreira Junior, Lima e Pinho (2025), que simularam linhas de ônibus de Passos/MG no AnyLogic. A partir desse modelo híbrido, definiram-se os passos da pesquisa (Figura 1). MsExcel e AnyLogic foram empregados em cada etapa, além do Google Maps em uma delas.

Figura 1 – Etapas desenvolvimento MSH



$$\text{Valor normalizado} = \frac{(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad \text{Eq. (2)}$$

Figura 2 - Diagrama de estados Agentes Passageiros-POIs



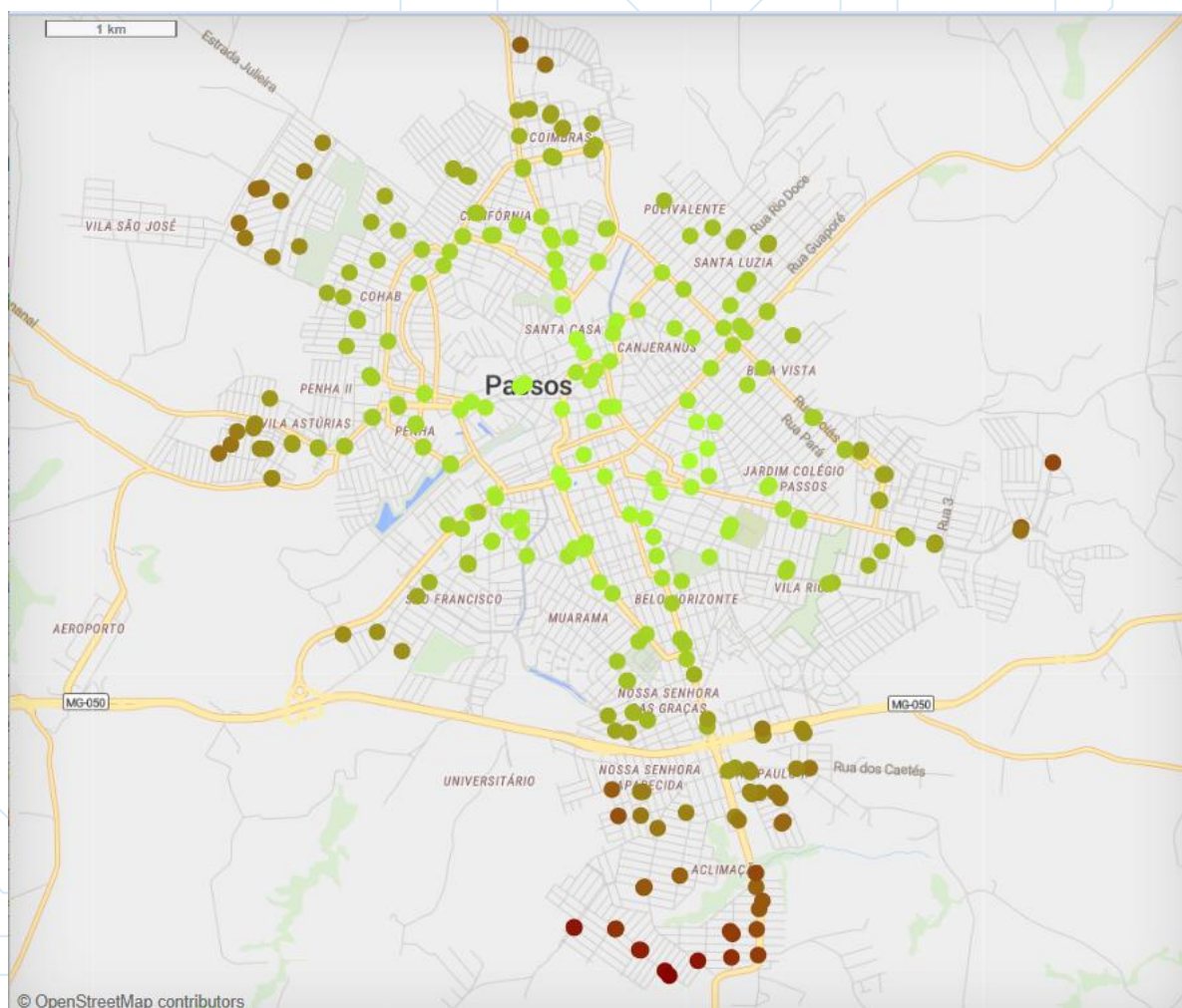
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi elaborada uma planilha em Excel com o indicador de acessibilidade, puro e normalizado entre 0 e 1. A Tabela 1 exemplifica os cálculos, e a Figura 3 mostra os resultados em gradiente: verde indica maior acessibilidade e vermelho menor.

Tabela 1 – Exemplo resultado indicador acessibilidade normalizado

Ponto Destino	Latitude	Longitude	Indicador de Acessibilidade	Normalização min-max
1	-20,75523	-46,60065	1840045617	0,814276045
2	-20,75341	-46,600745	1783671496	0,762106013
3	-20,75328	-46,598777	1716399601	0,699850906
...	...	...	...	...
280	-20,72021	-46,591147	1269804501	0,286560544
281	-20,72178	-46,589425	1317345890	0,330556545
282	-20,72353	-46,58973	1322572898	0,335393749

Figura 3 – Indicador acessibilidade dos pontos de ônibus



Os dados permitem avaliar a acessibilidade dos pontos segundo Ingram (1971), identificando os melhor localizados em função da distribuição populacional e dos POIs ponderados. Os achados confirmam Bracarense e Ferreira (2018), que também observaram maior acessibilidade nas estações centrais.

A hipótese foi confirmada, mostrando ser viável integrar o indicador à MSH. Contudo, houve dificuldades para obter dados de pontos de ônibus e POIs, exigindo buscas em bases públicas. Outros desafios foram a validação, feita apenas qualitativamente com especialistas, e as limitações de hardware, que obrigaram a reduzir o modelo.

Como contribuição, o estudo oferece subsídios para propor melhorias de acessibilidade. Ferramentas como racionalização de pontos, aprendizado de máquina e teoria dos grafos podem apoiar decisões de gestores sobre alocação das estações.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu uma simulação híbrida no AnyLogic para aplicar o indicador de acessibilidade aos pontos de ônibus, avaliando a proximidade entre estações, passageiros e POIs.

O caso estudado foi a cidade de Passos/MG, com dados de pontos de ônibus, mapa urbano e 140 POIs georreferenciados (escolas, serviços, alimentação etc.). Esses dados foram inseridos no software, que calculou o tempo de deslocamento de passageiros e POIs às estações, ponderado por capacidade ou atendimentos diários em relação à população municipal. O indicador foi então calculado e exibido graficamente, mostrando o estado atual da cidade.

Como trabalhos futuros, recomenda-se aprimorar o banco de dados dos agentes com informações censitárias, ampliar a amostra e aplicar o modelo em outros contextos urbanos. Também se sugere simular cenários de realocação ou adição de pontos de ônibus e adotar técnicas de racionalização, como aprendizado de máquina ou teoria dos grafos, para apoiar políticas públicas de mobilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e a CAPES pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BERTRAND, J. W.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, pp.241-264, 2002. DOI: 10.1108/01443570210414338.

BOUNADI, N.; BOUSSALIA, S. R.; BELLAOUAR, A. Optmizing Algerian company's delivery fleet with agent-based model in AnyLogic. **Transport and Telecommunication**, v. 24, n. 4, p. 434-442, 2023. DOI: 10.2478/ttj-2023-0034.

BRACARENSE, L. S. F. P.; FERREIRA, J. O. N. Índice de acessibilidade para comparação dos modos de transporte privado e coletivo. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, n. 3, p. 600-613, 2018. DOI: 10.1590/2175-3369.010.003.AO08.

BRILSFORD, S. Introduction to hybrid simulation modelling, **Operational Research Society Simulation Workshop**, p. 37-45, 2023. DOI: 10.36819/SW23.005.

CARMEN, F. C. A.; IDALIA, F. M. Simulation models for public transportation: a state-of-art review. **Procedia Computer Science**, n. 217, p. 562-569, 2023. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.252.

FERREIRA JUNIOR, J. S.; LIMA, J. P.; PINHO, A. F. Simulação híbrida para múltiplas linhas de transporte coletivo por ônibus de Passos/mg: modelo axiomático descritivo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 57, 2025. **Anais do LVII SBPO 2025**.

HUANG, J. *et al.* An overview of agent-based models for transport simulation and analysis. **Journal of Advanced Transportation**, 2022. DOI: 10.1155/2022/1252534.

INGRAM, D. R. The concept of accessibility: a search for an operational form. **Regional Studies**, v. 5, n. 2, p. 101–107, 1971.

MACAL, C. M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 10, p. 144-156, 2016. DOI: 10.1057/jos.2016.7.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia Científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

MIEDVIEDIEVA, N.; BAHARII, M. Optimization of the simulation process of product supply from the manufacturer. **Science-based Technologies**, v. 57, n.1, 2023. DOI: 10.18372/2310-5461.57.17449.

MUSTAFEE, N.; HARPER, N.; FAKHIMI, M. From conceptualization of hybrid modelling & simulation to empirical studies in hybrid modelling. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2022. **Anais do WSC 2022**. DOI: 10.1109/WSC57314.2022.10015400.

PESSOA, D. O. *et al.* Developing routes using hybrid simulations: public transport vs. Bike sharing. **International journal of simulation modelling**, v. 24, n. 1, 2025. DOI: 10.2507/IJSIMM24-1-718.

SANTOS, J. B.; LIMA, J. P. Health determinants, applications, and methods: A systematic literature review on the relationships between the urban transport of people and health. **Transportation Research Record**, p. 1-27, 2023. DOI: 10.1177/03611981231170625.

VIDOVIC, K.; SOSTARIC, M.; BUDIMIR, D. An overview of indicators and indices used for urban mobility assessment. **PROMET-Traffic & Transportation**, v. 31, n. 6, p. 703-714, 2019. DOI: 10.7307/ptt.v31i6.3281.

ZHANG, Z. *et al.* Spatial-temporal interplay in human mobility: a hierarchical reinforcement learning approach with hypergraph representation. In: CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 38, 2024. **Anais do XXXVIII AAI-24**. DOI: 10.1609/aaai.v38i8.28793.