Taxonomia das Abordagens Computacionais para Apoio à Decisão no Transporte Público Urbano: Uma Revisão Comparativa da Literatura

Anna Clara da Silva Costa[1], **Marcio Roberio da Costa Ferro**[1]
Pablo Gustavo Soares Tiburcio[1], **David Henrique de Souza Lima**[1]

[1]Instituto Federal de Alagoas, Rio Largo – AL – Brasil

acsc14@aluno.ifal.edu.br

{marcio.roberio, pablo.tiburcio, david.lima}@ifal.edu.br

Abstract. *Urban public transportation relies on computational approaches to support planning, operation, and service management. However, existing studies are typically organized according to the employed technologies, making it difficult to obtain an integrated view of their role in decision-making. This paper proposes a taxonomy of computational approaches for decision support in urban public transportation, developed through a comparative literature review. Representative studies were analyzed according to the addressed problem, computational approach, and decision-support level, allowing their organization into four categories: strategic, tactical, operational, and real-time information. The proposed taxonomy provides a conceptual framework that organizes computational research according to its contribution to the decision-making process, highlighting complementarities among different approaches and identifying research opportunities, particularly at the tactical level.*

Resumo. *Este trabalho propõe uma taxonomia das abordagens computacionais aplicadas ao apoio à decisão no transporte público urbano, construída por meio de uma revisão comparativa da literatura. Estudos representativos foram analisados segundo o problema abordado, a abordagem computacional empregada e o nível de apoio à decisão, permitindo sua organização em quatro categorias: estratégica, tática, operacional e informação em tempo real. A taxonomia organiza pesquisas tradicionalmente classificadas por tecnologia sob uma perspectiva orientada ao processo decisório, evidenciando complementaridades entre diferentes abordagens computacionais e identificando oportunidades de pesquisa, especialmente no nível tático. Como principal contribuição, o trabalho apresenta um referencial conceitual para apoiar a organização e a análise de pesquisas em Computação aplicada ao transporte público urbano.*

1. Introdução

O transporte público urbano constitui um dos principais componentes da mobilidade nas cidades, desempenhando papel fundamental na promoção da acessibilidade, redução dos impactos ambientais e melhoria da qualidade de vida da população [Rui and Othengrafen 2023]. O planejamento e a operação desses sistemas envolvem decisões complexas relacionadas ao projeto da rede, localização de infraestrutura,

programação operacional, monitoramento da operação e disponibilização de informações aos usuários. Essas atividades dependem da análise de múltiplos fatores, como demanda, cobertura espacial, capacidade operacional e custos, tornando o processo de gestão cada vez mais dependente de ferramentas computacionais capazes de apoiar a tomada de decisão [Ali et al. 2023, Dumitrescu et al. 2025, Simon 1977].

Os avanços da Computação ampliaram significativamente as possibilidades de planejamento e gestão do transporte público urbano. A crescente disponibilidade de dados provenientes de sistemas de bilhetagem eletrônica, sensores urbanos, dispositivos de geolocalização, Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems – ITS*) e Sistemas de Informação Geográfica (*Geographic Information Systems – GIS*) impulsionou o desenvolvimento de abordagens baseadas em otimização, heurísticas e metaheurísticas, simulação computacional, análise espacial e planejamento dinâmico de viagens para apoiar gestores, operadores e usuários [Elassy et al. 2024].

Apesar dessa evolução, a literatura organiza essas soluções predominantemente segundo as tecnologias ou algoritmos empregados, privilegiando classificações baseadas em aspectos metodológicos. Embora essa perspectiva facilite a compreensão das técnicas utilizadas, ela dificulta uma visão integrada sobre a contribuição de cada abordagem ao processo de apoio à decisão. Tecnologias distintas podem apoiar decisões semelhantes, assim como uma mesma abordagem pode contribuir para diferentes etapas do planejamento e da operação do transporte público.

Embora existam revisões voltadas a temas específicos, ainda são escassos estudos que organizem as abordagens computacionais segundo sua função no processo decisório do transporte público urbano. Essa lacuna dificulta a comparação entre soluções, a identificação de complementaridades e a compreensão das oportunidades de pesquisa existentes. Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa:

> *Como organizar as abordagens computacionais aplicadas ao transporte público urbano de forma que sua contribuição para o processo de apoio à decisão possa ser analisada de maneira integrada?*

Para responder a essa questão, este trabalho propõe uma taxonomia conceitual das abordagens computacionais para apoio à decisão no transporte público urbano, construída a partir de uma revisão comparativa da literatura. A proposta organiza os estudos em quatro categorias, estratégica, tática, operacional e informação em tempo real, segundo o nível de apoio à decisão, em vez de classificá-los exclusivamente pelas tecnologias empregadas [Anthony 1965].

Como principal contribuição, este trabalho propõe uma taxonomia que reorganiza as abordagens computacionais segundo o nível de apoio à decisão, oferecendo uma perspectiva integrada para análise da literatura.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a taxonomia proposta. A Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados. A Seção 4 apresenta a análise comparativa dos estudos selecionados. A Seção 5 discute os principais resultados obtidos e, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2. Taxonomia das Abordagens Computacionais de Apoio à Decisão

A literatura sobre transporte público urbano reúne uma ampla variedade de abordagens computacionais voltadas ao planejamento e à operação dos sistemas de transporte. Técnicas de otimização, simulação computacional, Sistemas Inteligentes de Transporte, Sistemas de Informação Geográfica, algoritmos de planejamento de rotas e métodos de análise espacial têm sido empregados para apoiar diferentes problemas decisórios, desde o projeto da rede até o fornecimento de informações em tempo real aos passageiros [Mavlutova et al. 2023].

Embora essa diversidade evidencie a importância da Computação para a mobilidade urbana, os estudos são tradicionalmente organizados segundo as tecnologias ou algoritmos empregados, privilegiando classificações baseadas em aspectos metodológicos, como otimização [Jain and Pandey 2025], simulação [Qiao et al. 2021] e Sistemas Inteligentes de Transporte [Hassan et al. 2023]. Essa perspectiva facilita a compreensão das técnicas utilizadas, mas dificulta uma visão integrada sobre o papel desempenhado por cada abordagem no processo de apoio à decisão.

A análise comparativa realizada neste trabalho mostrou que tecnologias distintas frequentemente apoiam decisões semelhantes e que uma mesma abordagem computacional pode contribuir para diferentes etapas do planejamento e da operação do transporte público. Assim, propõe-se uma taxonomia baseada no nível de apoio à decisão, em vez da tecnologia empregada, permitindo organizar os estudos segundo sua contribuição ao processo decisório. Neste trabalho, a taxonomia é compreendida como uma estrutura conceitual destinada à organização sistemática das abordagens computacionais segundo características compartilhadas, adaptando um método de desenvolvimento de taxonomias amplamente empregado na literatura de Sistemas de Informação [Nickerson et al. 2013]. A Figura 1 apresenta a estrutura geral da taxonomia proposta.



Figura 1. Taxonomia das abordagens computacionais

A taxonomia distingue inicialmente as abordagens segundo o público beneficiado, separando soluções voltadas à gestão do sistema daquelas direcionadas aos passageiros. No contexto da gestão, as decisões são classificadas em três níveis: estratégico, relacionado ao planejamento de longo prazo; tático, associado à programação operacional; e operacional, voltado ao monitoramento e controle da operação. Para os passageiros, são consideradas as categorias de planejamento de viagens e informação em tempo real.

Independentemente da categoria, diferentes abordagens computacionais podem ser empregadas como mecanismos de apoio à decisão. Dessa forma, a tecnologia deixa de representar o eixo central da classificação e passa a ser compreendida como instrumento para apoiar diferentes níveis decisórios.

A Figura 2 ilustra como os estudos podem ser posicionados na taxonomia proposta. Independentemente da técnica empregada, as abordagens seguem um processo semelhante, no qual dados provenientes do sistema de transporte são utilizados para modelar o problema, aplicar métodos computacionais e gerar informações que subsidiam decisões em diferentes níveis. Essa representação evidencia que abordagens distintas compartilham um objetivo comum: apoiar a tomada de decisão no transporte público urbano.

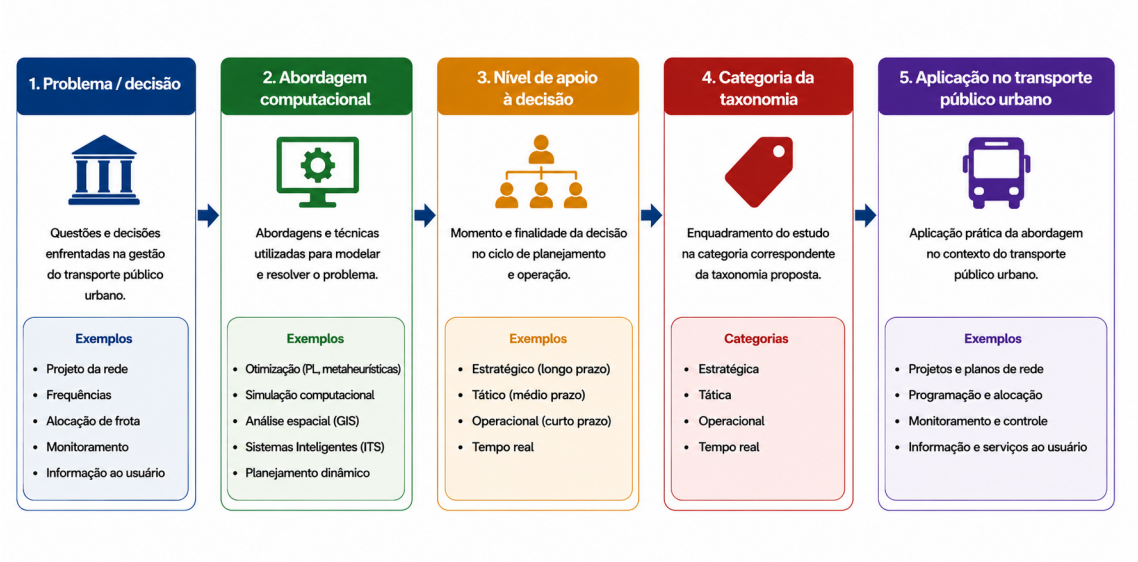


Figura 2. Mecanismo de classificação dos estudos segundo a taxonomia

A Tabela 1 sintetiza as categorias da taxonomia e suas principais características. Observa-se que as pesquisas distribuem-se ao longo dos diferentes níveis de decisão, evidenciando que otimização, simulação, Sistemas Inteligentes de Transporte e Sistemas de Informação Geográfica atuam de forma complementar durante o ciclo de planejamento e operação do transporte público.

Essa estrutura conceitual servirá como base para a análise comparativa apresentada na Seção 4, permitindo discutir os estudos segundo sua contribuição ao processo de apoio à decisão, e não apenas pelas tecnologias utilizadas.

Tabela 1. Caracterização das categorias da taxonomia proposta

Categoria	Tipo de decisão apoiada	Abordagens computacionais predominantes	Estudos
Estratégica	Planejamento da rede de transporte, localização de infraestrutura e cobertura espacial.	Otimização matemática, Metaheurísticas (PSO) e Sistemas de Informação Geográfica (GIS).	3
Tática	Programação operacional, definição de frequências e alocação de recursos.	Programação Linear e Algoritmos Genéticos.	1
Operacional	Avaliação do desempenho operacional e análise de cenários.	Simulação computacional (SUMO).	2
Tempo real	Monitoramento da operação e apoio à decisão durante a utilização do sistema.	Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), GPS e planejamento dinâmico de rotas.	2

3. Metodologia

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão comparativa da literatura, de natureza qualitativa e caráter analítico. Diferentemente de uma Revisão Sistemática da Literatura, o objetivo consiste na análise aprofundada de estudos representativos, buscando identificar padrões, relações e características comuns entre abordagens computacionais aplicadas ao planejamento e à operação do transporte público urbano. A partir dessa análise, foi construída a taxonomia proposta neste trabalho.

O procedimento metodológico foi organizado em seis etapas: planejamento da revisão, busca e seleção dos estudos, extração dos dados, análise comparativa, construção da taxonomia e validação da taxonomia. A Figura 3 apresenta uma visão geral desse processo.



Figura 3. Procedimento metodológico adotado na construção da taxonomia.

Foram selecionados estudos representativos que apresentassem abordagens computacionais aplicadas ao transporte público urbano, contemplando problemas relacionados ao planejamento da rede, programação operacional, monitoramento do sistema, planejamento de viagens e informação aos usuários. Consideraram-se artigos publicados em periódicos e eventos científicos com descrição metodológica suficiente para caracterizar a solução proposta, excluindo-se estudos voltados exclusivamente ao transporte individual, sem aplicação computacional ou constituídos apenas por revisões da literatura.

Para garantir consistência na análise comparativa, foi definido um conjunto de dimensões analíticas capaz de caracterizar os diferentes aspectos das abordagens identificadas. Essas dimensões contemplam o contexto do problema, a abordagem computacional empregada, o nível de apoio à decisão, a estratégia de avaliação e os principais resultados reportados pelos estudos. A Tabela 2 apresenta as dimensões consideradas durante o processo de análise.

Tabela 2. Dimensões utilizadas na análise comparativa.

Dimensão	Atributos analisados
Contexto	Problema abordado e objetivo da pesquisa.
Abordagem	Técnicas, algoritmos e ferramentas empregadas.
Apoio à decisão	Nível de decisão apoiado (estratégico, tático, operacional ou informação em tempo real).
Avaliação	Método de validação e indicadores utilizados.
Resultados	Benefícios obtidos e limitações identificadas.

Com base nas dimensões extraídas, os estudos foram comparados buscando identificar padrões recorrentes entre problemas abordados, abordagens computacionais e níveis de apoio à decisão. Essa análise permitiu organizar os trabalhos em quatro categorias: estratégica, tática, operacional e informação em tempo real, originando a taxonomia apresentada na Seção 2. A aplicação dessa taxonomia aos estudos selecionados é apresentada na Seção 4.

4. Análise Comparativa e Validação da Taxonomia

A taxonomia proposta foi avaliada por meio da classificação dos estudos selecionados segundo o problema abordado, a abordagem computacional empregada e o nível de apoio à decisão. O resultado dessa classificação é apresentado na Tabela 1, evidenciando que todos os estudos puderam ser enquadrados de forma consistente nas categorias propostas.

A distribuição dos trabalhos demonstra predominância de pesquisas voltadas às decisões estratégicas e operacionais, enquanto as categorias tática e de informação em tempo real apresentam menor representatividade. Nas subseções seguintes, cada categoria é discutida individualmente, destacando suas principais características e as abordagens computacionais predominantes.

4.1. Abordagens Computacionais para Apoio às Decisões Estratégicas

As decisões estratégicas compreendem atividades relacionadas ao planejamento de longo prazo do transporte público urbano, incluindo projeto da rede, localização de infraestrutura e cobertura espacial. Conforme apresentado na Tabela 1, três estudos foram classificados nessa categoria, evidenciando a predominância de pesquisas voltadas ao planejamento estrutural do sistema.

O estudo desenvolvido para a cidade de Barcelona utiliza modelos de otimização para reorganizar a rede de transporte considerando critérios de cobertura, eficiência operacional e redução do tempo de deslocamento [Miguel et al. 2025]. Em complemento, Li et al. [Li et al. 2023] empregam a metaheurística PSO para otimizar a localização de pontos de parada, enquanto Wang et al. [Wang et al. 2022] combinam Diagramas de Voronoi e Sistemas de Informação Geográfica para apoiar decisões relacionadas à cobertura espacial da rede.

Embora empreguem técnicas distintas, os três estudos possuem o mesmo objetivo: apoiar decisões de planejamento estrutural antes da implantação ou modificação do sistema, confirmando a adequação da categoria estratégica proposta pela taxonomia.

4.2. Abordagens Computacionais para Apoio às Decisões Táticas

As decisões táticas estão relacionadas ao planejamento operacional do transporte público, envolvendo definição de frequências, dimensionamento da frota e alocação de recursos. Apenas um estudo foi classificado nessa categoria, indicando que esse nível decisório ainda é pouco explorado na literatura analisada.

O trabalho sobre o Transit Network Design Problem (TNDP) combina Programação Linear e Algoritmos Genéticos para otimizar frequências de operação e utilização dos recursos disponíveis [Owais et al. 2014]. Diferentemente das decisões estratégicas, o foco está na melhoria da operação da infraestrutura existente.

Embora representada por apenas um estudo, essa categoria evidencia a importância das decisões táticas para o equilíbrio entre eficiência operacional e qualidade do serviço, além de indicar oportunidades para novas pesquisas.

4.3. Abordagens Computacionais para Apoio às Decisões Operacionais

As decisões operacionais concentram-se no monitoramento e na avaliação do sistema durante sua execução. Dois estudos foram classificados nessa categoria, ambos utilizando simulação computacional como principal mecanismo de apoio à decisão [Pais 2022, de Moraes Ayres Moura 2022].

Os trabalhos empregam o simulador SUMO para representar diferentes cenários operacionais, permitindo avaliar indicadores de desempenho, identificar gargalos e comparar alternativas antes da implementação de mudanças. Essa abordagem reduz riscos e possibilita análises detalhadas sem interferir diretamente na operação real.

Os resultados evidenciam o papel da simulação computacional como ferramenta consolidada para apoiar decisões operacionais, reforçando sua importância na avaliação do comportamento dinâmico dos sistemas de transporte.

4.4. Abordagens Computacionais Baseadas em Informação em Tempo Real

A categoria de informação em tempo real reúne soluções que utilizam dados continuamente atualizados para apoiar decisões durante a operação do sistema. Dois estudos foram classificados nessa categoria, contemplando tanto operadores quanto passageiros.

O primeiro apresenta uma revisão sobre Sistemas Inteligentes de Transporte aplicada ao monitoramento operacional [Iliopoulou and Kepaptsoglou 2019], enquanto o segundo propõe um sistema de planejamento dinâmico de viagens baseado em informações atualizadas da rede de transporte [Basu et al. 2020]. Apesar de possuírem objetivos distintos, ambos utilizam informações em tempo real como elemento central do processo decisório.

Essa categoria complementa os demais níveis da taxonomia ao apoiar decisões durante a utilização do sistema, evidenciando que informações dinâmicas constituem um componente essencial das abordagens computacionais modernas aplicadas ao transporte público urbano.

5. Implicações da Taxonomia

A análise comparativa demonstrou que a taxonomia proposta organiza de forma consistente diferentes abordagens computacionais aplicadas ao transporte público urbano segundo o nível de apoio à decisão, em vez da tecnologia empregada. Essa perspectiva permitiu integrar estudos fundamentados em técnicas distintas, evidenciando que otimização, simulação computacional, Sistemas Inteligentes de Transporte e Sistemas de Informação Geográfica desempenham papéis complementares no planejamento e na operação do sistema.

A distribuição dos estudos revelou predominância de pesquisas voltadas às decisões estratégicas e operacionais, enquanto as decisões táticas apresentaram menor representatividade. Esse resultado sugere que problemas relacionados à programação operacional, definição de frequências e alocação de recursos permanecem como oportunidades para o desenvolvimento de novas abordagens computacionais, especialmente aquelas capazes de integrar diferentes níveis do processo decisório.

Outro aspecto relevante refere-se ao crescente uso de informações em tempo real para apoiar decisões de operadores e passageiros. A incorporação de dados provenientes de sensores, dispositivos de geolocalização e Sistemas Inteligentes de Transporte amplia a capacidade de adaptação dos serviços às condições operacionais, aproximando planejamento e operação em um ambiente cada vez mais orientado por dados.

Assim, a principal contribuição deste trabalho não está na proposição de uma nova abordagem computacional, mas na reorganização do conhecimento existente sob uma perspectiva orientada ao apoio à decisão. Ao deslocar o foco da análise das tecnologias empregadas para o papel desempenhado pelas abordagens computacionais no processo decisório, a taxonomia proposta permite compreender soluções originalmente tratadas como independentes sob uma estrutura conceitual comum. Essa perspectiva favorece análises comparativas, facilita a identificação de lacunas de pesquisa e fornece um referencial para o desenvolvimento de novas soluções computacionais aplicadas ao transporte público urbano.

6. Conclusão

Este trabalho propôs uma taxonomia das abordagens computacionais aplicadas ao apoio à decisão no transporte público urbano, construída a partir de uma revisão comparativa da literatura. Ao organizar os estudos segundo o nível de apoio à decisão: estratégico, tático, operacional e informação em tempo real, a proposta oferece uma perspectiva alternativa às classificações tradicionalmente baseadas nas tecnologias empregadas.

A análise dos estudos demonstrou que diferentes abordagens computacionais desempenham papéis complementares ao longo do ciclo de planejamento e operação do transporte público. Além de sistematizar a literatura existente, a taxonomia desloca o foco da análise das tecnologias empregadas para o papel desempenhado pelas abordagens computacionais no processo de apoio à decisão. Essa perspectiva favorece análises comparativas, evidencia relações entre soluções originalmente tratadas de forma independente e oferece um referencial conceitual para futuras pesquisas.

A aplicação da taxonomia evidenciou predominância de pesquisas voltadas às decisões estratégicas e operacionais, enquanto o nível tático permanece relativamente pouco explorado, evidenciando oportunidades para o desenvolvimento de novas abordagens computacionais.

A taxonomia conceitual proposta deve ser compreendida como uma estrutura conceitual passível de evolução, podendo ser refinada com a incorporação de novos estudos e abordagens computacionais. Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar sua aplicação para outros domínios da mobilidade urbana e incorporar tecnologias emergentes, como aprendizado de máquina, gêmeos digitais (*digital twins*) e sistemas ciberfísicos, fortalecendo seu potencial como instrumento de organização do conhecimento em Computação aplicada ao transporte público urbano.

Referências

Ali, R., Hussain, A., Nazir, S., Khan, S., and Khan, H. U. (2023). Intelligent decision support systems—an analysis of machine learning and multicriteria decision-making methods. *Applied Sciences*, 13(22):12426.

Anthony, R. N. (1965). *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*. Harvard University Graduate School of Business Administration, Boston, MA.

Basu, A., Raja, B., Gracious, R., and Vanajakshi, L. (2020). Dynamic trip planner for public transport using genetic algorithm. *Transport*, 35(2):156–167.

de Moraes Ayres Moura, D. (2022). Otimização do transporte público visando a integração entre zonas central e sul de porto alegre utilizando o software de simulação sumo.

Dumitrescu, C., Tăbîrcă, A.-I., Stanciu, A., Nemtoi, L., Radu, V., and Gore, B. E. (2025). Ai-based decision support system for attenuating traffic congestion in smart cities. *Applied Sciences*, 15(21):11470.

Elassy, M., Al-Hattab, M., Takruri, M., and Badawi, S. (2024). Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 16:100252.

Hassan, M. A., Javed, R., Farhatullah, Granelli, F., Gen, X., Rizwan, M., Ali, S. H., Junaid, H., and Ullah, S. (2023). Intelligent transportation systems in smart city: A

systematic survey. In *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*, pages 1–9.

Iliopoulou, C. and Kepaptsoglou, K. (2019). Combining its and optimization in public transportation planning: State of the art and future research paths. *European Transport Research Review*, 11(1):27.

Jain, Y. and Pandey, K. (2025). Transforming urban mobility: A systematic review of ai-based traffic optimization techniques. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32:5381–5417.

Li, C., Ge, R., Wu, X., and Khamis, A. (2023). Optimal placement of bus stops using particle swarm optimization. In *2023 IEEE International Conference on Smart Mobility (SM)*, pages 15–20.

Mavlutova, I., Atstaja, D., Grasis, J., Kuzmina, J., Uvarova, I., and Roga, D. (2023). Urban transportation concept and sustainable urban mobility in smart cities: A review. *Energies*, 16(8):3585.

Miguel, I., Mendonça, J., Olivé, J., and Andrade, A. R. (2025). Assessing time savings as bus rapid transit is introduced in barcelona: A bus network design approach. *Public Transport*, 17:611–634.

Nickerson, R. C., Varshney, U., and Muntermann, J. (2013). A method for taxonomy development and its application in information systems. In *Proceedings of the European Conference on Information Systems (ECIS)*, Utrecht, The Netherlands.

Owais, M., Moussa, G., Abbas, Y., and El-Shabrawy, M. (2014). Simple and effective solution methodology for transit network design problem. *International Journal of Computer Applications*, 89(14):32–40.

Pais, F. V. (2022). Avaliação de desempenho de tráfego urbano usando simulação: Estudo de caso em maceió/al. Master's thesis, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL.

Qiao, F., Liu, T., Sun, H., Guo, L., and Chen, Y. (2021). Modelling and simulation of urban traffic systems: present and future. *International Journal of Cybernetics and Cyber-Physical Systems*, 1(1):1–32.

Rui, J. and Othengrafen, F. (2023). Examining the role of innovative streets in enhancing urban mobility and livability for sustainable urban transition: A review. *Sustainability*, 15(7):5709.

Simon, H. A. (1977). *The New Science of Management Decision*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, revised edition edition.

Wang, F., Ye, M., Zhu, H., and Gu, D. (2022). Optimization method for conventional bus stop placement and the bus line network based on the voronoi diagram. *Sustainability*, 14(13):7918.