PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

Gestão do tráfego veicular urbano com simulação sintética e roteamento dinâmico

SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA

MARCOS FABRÍCIO ZANNI

PROF. DR. ADEMAR TAKEO AKABANE

CAMPINAS

2026

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ZANNI, MARCOS FABRÍCIO

Z32g

Gestão do tráfego veicular urbano com simulação sintética e roteamento dinâmico / MARCOS FABRÍCIO ZANNI. - Campinas: PUC-Campinas, 2026.

61 f.

Orientador: Ademar Takeo Akabane.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de infraestrutura urbana) - Sistemas de infraestrutura urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Simulação. 2. Mobilidade urbana. 3. SUMO.

MARCOS FABRICIO ZANNI

GESTÃO DO TRÁFEGO VEICULAR URBANO COM SIMULAÇÃO SINTÉTICA E ROTEAMENTO DINÂMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. Dr. Ademar Takeo Akabane

Dissertação defendida e aprovada em 15 de junho de 2026 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

Prof. Dr. Ademar Takeo Akabane
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Profa. Dr. CARLOS ALBERTO DE CASTRO JUNIOR
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

gov.br Documento assinado digitalmente
DENIS MAYR LIMA MARTINS
Data: 19/06/2026 10:37:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. DENIS MAYR LIMA MARTINS
USP-RIBEIRÃO PRETO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Viviane Aparecida Neves Zanni, e ao meu filho, Gabriel Neves Zanni, pelo apoio incondicional, compreensão e paciência nos momentos em que estive ausente em função das exigências deste trabalho.

Ao Professor Doutor Ademar Takeo Akabane, pela orientação, confiança e compreensão diante dos desafios de conciliar as demandas profissionais com a dedicação acadêmica.

Ao corpo docente da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pela qualidade das aulas e pelo suporte ao longo do curso.

Aos colegas de turma, pelas trocas de experiências, colaboração e apoio durante essa jornada.

À Reitoria da PUC-Campinas pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio institucional oferecido ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, contribuindo de forma significativa para a realização deste trabalho.

O autor registra também o uso de ferramentas de inteligência artificial como apoio complementar à organização textual e refinamento da escrita, utilizadas de forma crítica e supervisionada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do tráfego veicular urbano por meio de simulações computacionais em redes sintéticas, considerando o aumento progressivo da demanda e a aplicação de estratégias de roteamento. A pesquisa adota uma abordagem experimental, utilizando o software SUMO para modelagem e análise de cenários em malhas viárias controladas, incluindo redes em grade e uma rede real de referência.

Foram definidos cenários com diferentes níveis de demanda, estratégias de roteamento estático e dinâmico, além da introdução de intervenções estruturais por meio do bloqueio de vias. A análise foi realizada com base em métricas quantitativas, como tempo de viagem, tempo de espera, perda de tempo e emissões.

Os resultados demonstram que o comportamento do sistema viário apresenta características não lineares, com a ocorrência de pontos de saturação nos quais pequenos aumentos na demanda resultam em significativa degradação do desempenho. Observou-se que o roteamento dinâmico contribui para a redistribuição dos fluxos e melhoria dos indicadores em cenários de demanda moderada. De forma contraintuitiva, verificou-se que a restrição de determinadas vias, quando combinada ao roteamento dinâmico, pode resultar em melhoria do desempenho global da rede, sugerindo comportamento compatível com o Paradoxo de Braess.

Conclui-se que a análise baseada em redes sintéticas e simulação computacional permite identificar padrões estruturais do tráfego urbano, contribuindo para a compreensão do comportamento sistêmico e oferecendo subsídios para o planejamento e a gestão da mobilidade urbana.

Palavras-chave: tráfego urbano; simulação computacional; redes sintéticas; roteamento; mobilidade urbana.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the behavior of urban vehicular traffic through computational simulations in synthetic networks, considering the progressive increase in demand and the application of routing strategies. An experimental approach is adopted using the SUMO software to model and analyze scenarios in controlled road networks, including grid-based synthetic networks and a real-world reference network. Different scenarios were defined based on varying demand levels, static and dynamic routing strategies, and structural interventions through road blockages. The analysis was conducted using quantitative metrics such as travel time, waiting time, time loss, and emissions.

The results indicate that the system exhibits nonlinear behavior, with saturation points where small increases in demand lead to significant performance degradation. Dynamic routing contributes to flow redistribution and performance improvement under moderate demand conditions. Counterintuitively, restricting certain routes, when combined with dynamic routing, can improve overall network performance, suggesting a behavior consistent with the Braess Paradox.

It is concluded that simulation based on synthetic networks allows the identification of structural traffic patterns, contributing to the understanding of systemic behavior and supporting decision-making in urban mobility planning and management.

Keywords: urban traffic; computational simulation; synthetic networks; routing; urban mobility.

Sumário

Lista de figuras 10
Lista de tabelas 11
1. INTRODUÇÃO 12
1.1 Contextualização 12
1.2 Problema de Pesquisa 14
1.3 Objetivo Geral 15
1.4 Objetivos Específicos 15
1.5 Justificativa 15
1.6 Estrutura do Trabalho 16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17
2.1 Mobilidade urbana e tráfego veicular 17
2.2 Tráfego como sistema complexo 18
2.3 Congestionamento e saturação 18
2.4 Modelagem e simulação de tráfego 19
2.5 Simulação microscópica e o SUMO 20
2.6 Redes sintéticas em estudos de tráfego 20
2.7 Estratégias de roteamento 21
2.7.1 Roteamento estático 21
2.7.2 Roteamento dinâmico 21
2.8 Princípios de equilíbrio de tráfego 21
2.9 Paradoxo de Braess 22
3. TRABALHOS CORRELATOS 22
3.1 Simulação de tráfego urbano 22
3.2 Estudos com redes sintéticas 23
3.3 Roteamento dinâmico em redes viárias 23
3.4 Saturação e comportamento não linear 24
3.5 Paradoxo de Braess e eficiência de redes 24
3.6 Lacunas na literatura e contribuição do trabalho 25

4. METODOLOGIA 25
4.1 Natureza e delineamento da pesquisa 25
4.3 Ferramentas utilizadas: SUMO 27
4.4 Automação e tratamento de dados com Python e Jupyter 28
4.5 Construção das redes viárias 30
4.5.1 Modelagem com NETEDIT 30
4.5.2 Redes sintéticas 31
4.5.3 Rede real (Erlangen) 33
4.6 Definição dos cenários experimentais 34
4.6.1 Configuração da demanda 34
4.6.2 Execuções e variabilidade (seeds) 35
4.6.3 Estratégias de roteamento 35
4.6.4 Cenários com bloqueio de vias 36
4.6.5 Síntese dos cenários 37
4.7 Métricas de avaliação 37
4.8 Execução das simulações e coleta de dados 39
4.9 Reprodutibilidade 40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 41
5.1 Validação do comportamento base da rede 41
5.2 Resultados sem bloqueio 44
5.2.1 Grid 1 44
5.2.2 Grid 2 45
5.2.3 Erlangen 46
5.3 Resultados com bloqueio 47
5.3.1 Grid 1 com bloqueio 47
5.3.2 Grid 2 com bloqueio 47
5.3.3 Erlangen com bloqueio 48
5.4 Comparação: estático *versus* dinâmico 48
5.5 Comparação: com bloqueio versus sem bloqueio 50
5.6 Análise do comportamento da rede 53
5.7 Interpretação teórica 53

5.8 Síntese dos resultados 54
6. CONCLUSÃO 54
6.1 Atendimento aos objetivos 54
6.2 Principais achados 55
6.3 Contribuições do trabalho 56
6.4 Limitações do estudo 56
6.5 Trabalhos futuros 57
7. REFERÊNCIAS 59

Lista de figuras

Figura 1– Crescimento da frota de veículos automotores e da população no Brasil (2010–2025)..... 17
Figura 2 - Interface do Amazon AWS, recurso utilizado para processamento em nuvem do SUMO..... 26
Figura 3 – Exemplo de arquivos de saída no formato XML gerados durante experimento com o SUMO 27
Figura 4 – Interface gráfica de usuário do SUMO (SUMO-GUI)..... 27
Figura 5 – Listagem dos scripts utilizados para automação de tarefas..... 28
Figura 6 – Jupyter Lab..... 29
Figura 7 – NETEDIT, ferramenta do pacote SUMO. 30
Figura 8 – Imagem da rede Grid 1 31
Figura 9 – Imagem da rede Grid 2 32
Figura 10 – Imagem da rede Erlangen..... 33
Figura 11 – Imagem de uma simulação com destaque aos veículos utilizados como bloqueio das faixas de rodagem. 36
Figura 12 – Imagem de simulação rodando em modo gráfico..... 39
Figura 13 – Imagem das tabelas e gráficos do Jupyter Lab 40
Figura 14 – Tempo médio de viagem com 1 veículo trafegando no cenário. 42
Figura 15 – Tempo médio de viagem com 100 veículos trafegando no cenário. 43
Figura 16 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para o Grid 1. 44
Figura 17 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para o Grid 2. 45
Figura 18 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para Erlangen. 46
Figura 19 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico. 48
Figura 20 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico. 49
Figura 21 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico. 49
Figura 22 – Variação na métrica “Perda de tempo” no cenário dinâmico no Grid 1. 51
Figura 23 – Variação na métrica “Emissão de CO2” no cenário dinâmico no Grid 1.51
Figura 24 – Mapa de calor da métrica “Perda de tempo” por demanda e cenário.... 53

Lista de tabelas

Tabela 1- Resumo e quantidade de testes 41
Tabela 2 - Ganho percentual do roteamento dinâmico 49
Tabela 3 - Ganho percentual na “Perda de tempo” nos cenários com bloqueio em comparação com cenários sem bloqueio para o roteamento dinâmico. 52
Tabela 4 - Síntese 54

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A gestão de sistemas complexos envolve a tomada de decisões em ambientes caracterizados por múltiplas variáveis interdependentes, dinâmicas não lineares e elevada sensibilidade a pequenas perturbações (STERMAN, 2000). Nesses sistemas, a compreensão do comportamento global não pode ser obtida apenas pela análise isolada de seus componentes, sendo necessário considerar as interações entre agentes e os efeitos decorrentes dessas relações (BATTY, 2005).

O tráfego urbano insere-se nesse contexto como um dos exemplos mais relevantes de sistema complexo aplicado à infraestrutura urbana. Seu comportamento resulta da interação contínua entre veículos, condutores e a própria rede viária, gerando fenômenos emergentes, entendidos neste trabalho como propriedades ou comportamentos coletivos que surgem espontaneamente das interações entre os elementos do sistema, sem terem sido previamente programados ou controlados de forma centralizada. Congestionamentos espontâneos, formação de filas, redistribuição de fluxos e propagação de ondas de congestionamento constituem exemplos desses fenômenos, que impactam diretamente o desempenho global da rede (HELBING, 2001). Ao longo deste trabalho, os termos fenômenos emergentes e comportamentos emergentes são utilizados como sinônimos para se referir a essas propriedades coletivas do sistema de tráfego. Em ambientes urbanos, o tráfego veicular exerce influência direta sobre a mobilidade, a produtividade, o consumo energético e a qualidade ambiental (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2020).

No Brasil, a complexidade desse sistema é intensificada pelo crescimento acelerado da frota de veículos nas últimas décadas. Dados da Secretaria Nacional de Trânsito indicam que o país ultrapassou a marca de 124 milhões de veículos, enquanto o crescimento populacional no mesmo período foi significativamente inferior (SENATRAN, 2025; IBGE, 2022). Esse descompasso entre a expansão da frota e a capacidade da infraestrutura viária tem contribuído para o aumento dos níveis de congestionamento, do tempo de deslocamento e das emissões associadas ao transporte urbano (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2020).

Esse cenário evidencia limitações nos modelos tradicionais de planejamento urbano, especialmente diante da dificuldade de avaliar antecipadamente os impactos de intervenções em sistemas complexos. A realização de testes em ambientes reais envolve custos elevados, riscos operacionais e impactos sociais, restringindo a capacidade de antecipação de problemas e avaliação de soluções (ORTÚZAR; WILLUNSEN, 2011).

Diante dessas limitações, a simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para o planejamento e a gestão da mobilidade urbana. Por meio da construção de ambientes virtuais controlados, torna-se possível analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições, testar intervenções e avaliar seus impactos sem interferência direta no ambiente real (BARCELÓ, 2010; LAW, 2015).

Nesse contexto, destaca-se o uso de simulações baseadas em redes sintéticas, estruturadas artificialmente para permitir maior controle das variáveis e repetibilidade dos experimentos. Diferentemente das redes reais, que apresentam elevada complexidade e dependência de dados específicos, as redes sintéticas possibilitam o isolamento e a análise de fenômenos estruturais do tráfego, como saturação, formação de gargalos e redistribuição de fluxos (XIE; LEVINSON, 2007; KRAJZEWICZ *et al*., 2012).

Entre as diferentes topologias possíveis, as malhas em grade apresentam vantagens metodológicas relevantes, como simplicidade estrutural, facilidade de replicação e maior controle experimental. Estudos anteriores demonstram que esse tipo de estrutura é adequado para análise de padrões de congestionamento e comportamento sistêmico do tráfego (KESTING, Treiber; HELBING, 2008; ZHOU, Taylor; HOLGUÍN-VERAS, 2019).

Além da estrutura da rede, a forma como os veículos são distribuídos ao longo do sistema exerce papel fundamental no desempenho global do tráfego. Nesse sentido, as estratégias de roteamento influenciam diretamente a organização dos fluxos e a formação de congestionamentos. O roteamento dinâmico, baseado nas condições atuais da rede, permite a adaptação das rotas ao longo do tempo, contribuindo para a redistribuição do tráfego e para a mitigação de gargalos (BEN-

AKIVA *et al*., 2012; PEETA; ZILIASKOPOULOS, 2001).

Entretanto, a literatura demonstra que o comportamento do sistema nem sempre segue uma lógica intuitiva. Em determinadas condições, intervenções como a adição ou remoção de vias podem produzir efeitos contrários ao esperado. Esse fenômeno é descrito pelo Paradoxo de Braess, segundo o qual a redução de opções de rota pode resultar em melhoria do desempenho global da rede (BRAESS, 2005; NAGURNEY, 2000; YOUN, Gastner; JEONG, 2008).

Dessa forma, a análise do tráfego urbano exige uma abordagem sistêmica, capaz de integrar aspectos estruturais, operacionais e comportamentais. A combinação entre simulação sintética e estratégias de roteamento surge como uma alternativa promissora para compreender o funcionamento do sistema e apoiar decisões baseadas em evidências.

1.2 Problema de Pesquisa

Apesar dos avanços na modelagem e simulação de sistemas de transporte, ainda existe uma limitação significativa na compreensão do comportamento do tráfego urbano sob condições controladas e replicáveis. Grande parte dos estudos concentra-se em redes reais, que, embora representem melhor a complexidade urbana, apresentam dificuldades relacionadas à coleta de dados, reprodutibilidade e isolamento de variáveis (BARCELÓ, 2010; KRAJZEWICZ *et al*., 2012).

Por outro lado, estudos baseados em redes sintéticas tendem a abordar aspectos teóricos ou estruturais de forma isolada, sem explorar de maneira integrada o impacto do crescimento progressivo da demanda, das estratégias de roteamento e das intervenções na infraestrutura (BARCELÓ, 2010; KRAJZEWICZ et al., 2012).

Adicionalmente, embora o comportamento não linear do tráfego e fenômenos como o Paradoxo de Braess sejam amplamente discutidos na literatura, sua investigação por meio de experimentos sistemáticos em ambientes controlados ainda permanece relativamente limitada (BRAESS, 2005; NAGURNEY, 2000).

Sob essa perspectiva, emerge a seguinte questão de pesquisa:

Como o aumento progressivo da demanda e a aplicação de estratégias de roteamento influenciam o desempenho do sistema viário em redes sintéticas, e em

que medida intervenções estruturais, como o bloqueio de vias, podem alterar esse comportamento?

1.3 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de simulações computacionais em malhas viárias sintéticas, como o aumento progressivo da demanda e a aplicação de estratégias de roteamento influenciam o desempenho do sistema viário, identificando padrões de saturação, comportamento emergente e possíveis ganhos decorrentes de intervenções estruturais.

1.4 Objetivos Específicos

- Modelar redes viárias sintéticas em malha regular utilizando o SUMO, com controle sobre fluxos de origem e destino;
- Simular o crescimento progressivo da demanda, induzindo diferentes níveis de saturação do sistema;
- Identificar a formação de gargalos e padrões de degradação do desempenho;
- Aplicar estratégias de roteamento estático e dinâmico para análise comparativa;
- Avaliar o impacto de intervenções estruturais, como bloqueio de vias, sobre o desempenho do sistema;
- Comparar cenários com base em métricas quantitativas, incluindo tempo de viagem, tempo de espera, perda de tempo e emissões;
- Estruturar uma metodologia replicável para análise do comportamento do tráfego em redes sintéticas.

1.5 Justificativa

A tomada de decisão no planejamento da mobilidade urbana frequentemente ocorre de forma reativa, baseada em observações empíricas ou intervenções pontuais, limitadas pela dificuldade de testar cenários complexos em ambientes reais (BARCELÓ, 2010).

Nesse sentido, a simulação computacional emerge como ferramenta estratégica para apoiar decisões baseadas em evidências, permitindo a avaliação de

múltiplos cenários sem impacto direto na população.

Entretanto, a aplicação dessas ferramentas em redes reais frequentemente demanda elevado esforço de modelagem e ampla disponibilidade de dados, o que restringe sua utilização em larga escala.

Como alternativa, o uso de redes sintéticas possibilita a construção de ambientes experimentais controlados, nos quais é possível analisar padrões estruturais do tráfego urbano de forma replicável. Nesses ambientes, podem ser investigados fenômenos fundamentais, como a saturação da rede, a formação de congestionamentos e a redistribuição dos fluxos, contribuindo para a compreensão do comportamento sistêmico do tráfego (XIE; LEVINSON, 2007; KRAJZEWICZ et al., 2012).

Além disso, a investigação do impacto de estratégias de roteamento e intervenções estruturais, como o bloqueio de vias, pode fornecer subsídios relevantes para o planejamento urbano, especialmente em contextos nos quais soluções tradicionais baseadas apenas na expansão da infraestrutura viária não se mostram suficientes para melhorar o desempenho global da rede (BRAESS, 2005; NAGURNEY, 2000).

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, incluindo contextualização, problema de pesquisa, objetivos e justificativa.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando conceitos relacionados à mobilidade urbana, sistemas complexos, modelagem de tráfego, simulação computacional e estratégias de roteamento.

O Capítulo 3 discute os trabalhos correlatos, situando o presente estudo no contexto da literatura existente e identificando lacunas de pesquisa.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada, incluindo a modelagem das redes, definição dos cenários experimentais, parâmetros utilizados e métricas de avaliação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e a discussão, com análise comparativa entre cenários e interpretação dos resultados à luz da teoria.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

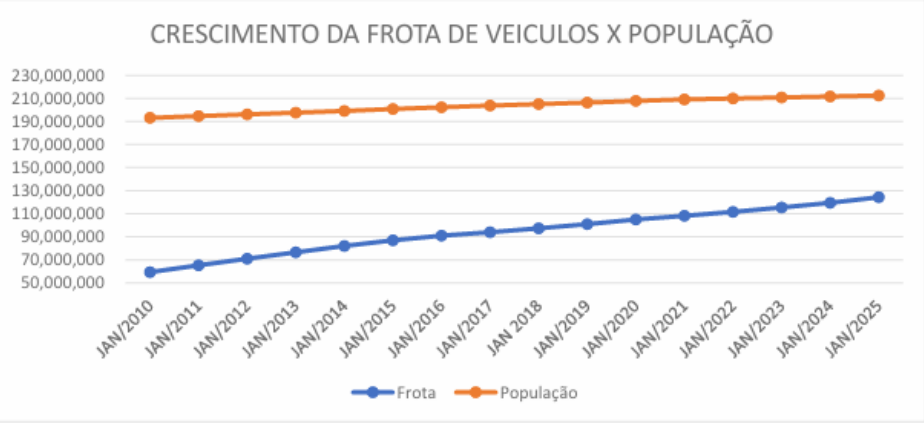
2.1 Mobilidade urbana e tráfego veicular

A mobilidade urbana constitui um dos principais desafios das cidades contemporâneas, sendo diretamente influenciada pelo crescimento populacional, pela expansão territorial e pelo aumento da frota de veículos. O sistema de transporte urbano envolve a interação entre infraestrutura, usuários e políticas públicas, configurando um ambiente complexo e dinâmico (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2020).

O tráfego veicular urbano, em particular, representa um componente crítico desse sistema, impactando diretamente fatores como tempo de deslocamento, consumo energético e emissões atmosféricas. A crescente demanda por mobilidade, associada às limitações físicas da infraestrutura viária, tem intensificado problemas como congestionamento, aumento do tempo de viagem e ineficiência operacional (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

A figura 1 ilustra o crescimento da frota de veículos em comparação ao crescimento da população entre os anos de 2010 e 2025.

Figura 1– Crescimento da frota de veículos automotores e da população no Brasil (2010–2025).



Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SENATRAN (2025) e IBGE (2025).

No Brasil, o crescimento acelerado da frota de veículos nas últimas décadas tem intensificado problemas como congestionamento, aumento do tempo de viagem e elevação das emissões de poluentes (SENATRAN, 2023; IBGE, 2022). Esse cenário evidencia um descompasso entre o crescimento da demanda por mobilidade e a capacidade da infraestrutura viária, exigindo abordagens mais sofisticadas para o planejamento e a gestão do tráfego urbano.

2.2 Tráfego como sistema complexo

O tráfego urbano pode ser caracterizado como um sistema complexo, no qual padrões globais emergem da interação entre múltiplos agentes individuais, apresentando comportamento dinâmico e não linear (HELBING, 2001).

Sistemas complexos apresentam características como não linearidade, sensibilidade às condições iniciais e presença de fenômenos emergentes, nos quais pequenas mudanças podem resultar em impactos significativos no desempenho global do sistema (STERMAN, 2000). No contexto do tráfego urbano, essas características manifestam-se na formação de congestionamentos, ondas de parada e propagação de filas.

Essa abordagem é fundamental para compreender por que soluções intuitivas nem sempre produzem os resultados esperados, uma vez que o comportamento do sistema não pode ser explicado apenas pela soma de seus componentes (STERMAN, 2000).

Helbing (2001) demonstra que a formação de congestionamentos está associada à interação local entre veículos e à propagação de ondas de tráfego do tipo *stop-and-go*, caracterizadas por sucessivos ciclos de desaceleração, parada e aceleração que se deslocam ao longo da corrente de veículos. Esse comportamento evidencia que pequenas perturbações locais podem propagar-se pela rede e produzir efeitos coletivos sobre o desempenho global do sistema.

2.3 Congestionamento e saturação

O congestionamento pode ser compreendido como um fenômeno decorrente do desequilíbrio entre a demanda por deslocamento, entendida como a quantidade de viagens ou veículos que desejam utilizar a infraestrutura em determinado intervalo de tempo, e a capacidade operacional da via, correspondente ao número máximo de

veículos que podem ser acomodados e escoados com níveis aceitáveis de desempenho. À medida que o fluxo de veículos, definido como a quantidade de veículos que atravessa um determinado ponto da via por unidade de tempo, aproxima-se da capacidade da rede, observam-se aumentos no tempo de viagem, formação de filas e redução da velocidade média, comprometendo o desempenho global do sistema (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

A literatura aponta que a relação entre fluxo e densidade não é linear. Enquanto o fluxo representa a quantidade de veículos que passa por um ponto da via em determinado período, a densidade corresponde ao número de veículos presentes por unidade de comprimento da via. Essa relação caracteriza diferentes regimes operacionais, como fluxo livre, transição e congestionamento (TREIBER; KESTING, 2013). A saturação ocorre quando a rede deixa de absorver novos veículos de forma eficiente, levando a uma degradação abrupta do desempenho do sistema. Nesse contexto, o processo de saturação não ocorre de maneira linear, sendo marcado por pontos críticos nos quais pequenas variações na demanda podem resultar em mudanças significativas no comportamento do tráfego (HELBING, 2001).

Esse comportamento está frequentemente associado à presença de pontos críticos da rede, conhecidos como gargalos, que limitam o escoamento do fluxo e impactam de forma desproporcional o desempenho global do sistema (DAGANZO, 1997).

A compreensão desses fenômenos é essencial para o planejamento e a gestão do tráfego urbano, especialmente em cenários de elevada demanda.

2.4 Modelagem e simulação de tráfego

A modelagem de tráfego busca representar o comportamento do sistema viário por meio de abstrações matemáticas e computacionais capazes de reproduzir diferentes dinâmicas de fluxo. Nesse contexto, destacam-se três abordagens principais: os modelos macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos (BARCELÓ, 2010).

Modelos macroscópicos tratam o tráfego como um fluxo contínuo, utilizando variáveis agregadas, como fluxo, velocidade média e densidade. Modelos

mesoscópicos combinam características das abordagens macroscópica e microscópica, representando grupos de veículos ou simplificando parte das interações individuais, buscando um equilíbrio entre nível de detalhe e custo computacional. Já os modelos microscópicos representam individualmente cada veículo e suas interações ao longo da rede viária. A escolha do modelo depende do nível de detalhe necessário para a análise.

Neste trabalho, opta-se por uma abordagem microscópica, capaz de representar explicitamente o comportamento individual dos veículos e suas interações locais, permitindo observar comportamentos emergentes, como congestionamentos espontâneos, formação de filas e redistribuição dos fluxos (TREIBER; KESTING, 2013).

A simulação computacional permite testar cenários de forma controlada, reduzindo custos e riscos associados à experimentação em ambientes reais. Além disso, possibilita a análise simultânea de múltiplas variáveis e condições operacionais, o que seria inviável em contextos reais (LAW, 2015).

2.5 Simulação microscópica e o SUMO

O Simulation of Urban MObility (SUMO) é uma plataforma de simulação microscópica amplamente utilizada na análise e modelagem de sistemas de transporte (KRAJZEWICZ *et al*., 2012). A ferramenta permite representar detalhadamente redes viárias e o comportamento individual dos veículos, incluindo aceleração, desaceleração, mudanças de faixa, interação entre agentes e tomada de decisão em rotas. Por ser uma solução de código aberto, o SUMO oferece elevada flexibilidade e extensibilidade, além de baixo custo de implementação, características que favorecem sua ampla adoção em pesquisas acadêmicas e aplicações práticas relacionadas ao planejamento e à gestão do tráfego urbano (BEHRISCH *et al*., 2011).

2.6 Redes sintéticas em estudos de tráfego

A utilização de redes sintéticas, como malhas em grade, possibilita a análise de padrões estruturais do tráfego urbano em ambientes controlados e replicáveis.

Essa abordagem favorece o isolamento de variáveis e a investigação de

fenômenos fundamentais, como formação de gargalos, saturação da rede e redistribuição de fluxo.

Redes sintéticas são amplamente utilizadas em estudos teóricos e experimentais por permitirem a reprodução padronizada de cenários e a comparação sistemática entre diferentes condições de operação (XIE; LEVINSON, 2007).

2.7 Estratégias de roteamento

O roteamento de veículos desempenha papel fundamental na distribuição dos fluxos na rede viária. As estratégias de roteamento podem ser classificadas em estáticas e dinâmicas, de acordo com a forma como as informações da rede são utilizadas no processo de definição das rotas (PEETA; ZILIASKOPOULOS, 2001; BEN-AKIVA *et al*., 2012).

2.7.1 Roteamento estático

No roteamento estático, as rotas são previamente definidas a partir de condições médias ou estimadas da rede, permanecendo inalteradas ao longo da operação. Nesse modelo, não há adaptação às variações temporais do tráfego ou às alterações nas condições operacionais da rede viária (PEETA; ZILIASKOPOULOS, 2001).

2.7.2 Roteamento dinâmico

O roteamento dinâmico considera as condições atuais da rede viária, permitindo a adaptação das rotas em resposta às variações do tráfego ao longo do tempo. Essa abordagem tem sido amplamente investigada como mecanismo para melhorar a distribuição dos fluxos e aumentar a eficiência operacional do sistema (BEN-AKIVA *et al*., 2012).

Entretanto, seus benefícios tendem a ser reduzidos em cenários de elevada demanda, nos quais a limitação da capacidade da infraestrutura passa a exercer influência predominante sobre o desempenho global da rede (PEETA; ZILIASKOPOULOS, 2001).

2.8 Princípios de equilíbrio de tráfego

A teoria de equilíbrio de tráfego fundamenta-se na premissa de que os usuários selecionam rotas buscando minimizar seus tempos de deslocamento. O

Equilíbrio de Wardrop estabelece que, em uma condição de equilíbrio, nenhum usuário pode melhorar individualmente seu tempo de viagem por meio da alteração unilateral de rota (WARDROP, 1952).

Esse princípio constitui uma das principais bases teóricas da modelagem de transportes, sendo amplamente empregado na análise da distribuição de fluxos em redes viárias (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

2.9 Paradoxo de Braess

O Paradoxo de Braess descreve uma situação na qual a ampliação da infraestrutura viária, por meio da adição de novas rotas, pode resultar no aumento do tempo total de viagem, enquanto a remoção de determinados caminhos pode melhorar o desempenho global da rede (BRAESS, 2005).

Esse fenômeno demonstra que decisões individuais orientadas pela minimização do tempo de deslocamento nem sempre produzem resultados coletivamente eficientes, evidenciando a importância da análise sistêmica do tráfego (Nagurney, 2000).

Estudos posteriores confirmaram a ocorrência desse efeito em diferentes topologias de rede e condições operacionais, reforçando sua relevância para o planejamento urbano e para a tomada de decisão em infraestrutura de transportes (Youn, Gastner; Jeong, 2008).

3. TRABALHOS CORRELATOS

3.1 Simulação de tráfego urbano

A simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para análise e planejamento de sistemas de transporte, permitindo a avaliação de cenários complexos sem intervenções diretas na infraestrutura urbana. Em sistemas caracterizados pela interação dinâmica entre múltiplas variáveis, como o tráfego urbano, modelos de simulação tornam-se particularmente relevantes para a compreensão do comportamento sistêmico da rede (BARCELÓ, 2010).

Ferramentas de simulação microscópica, como o SUMO, permitem representar detalhadamente o comportamento individual dos veículos e suas

interações ao longo da rede viária (KRAJZEWICZ *et al*., 2012).

Estudos recentes têm utilizado esse tipo de abordagem para análise de padrões de tráfego e avaliação de políticas de mobilidade urbana (BEHRISCH *et al*., 2011).

3.2 Estudos com redes sintéticas

A utilização de redes sintéticas em estudos de tráfego busca isolar variáveis estruturais e analisar o comportamento do sistema em ambientes controlados e replicáveis.

Redes em malha regular, como grids, são frequentemente empregadas na investigação de fenômenos fundamentais, como formação de gargalos, saturação da rede e redistribuição de fluxo.

Segundo Xie e Levinson (2007), redes sintéticas possibilitam a análise das propriedades topológicas da malha viária e de sua influência sobre o desempenho do sistema, permitindo a identificação de padrões aplicáveis a diferentes contextos urbanos.

Estudos baseados em redes simplificadas indicam que a estrutura da rede exerce influência direta sobre a distribuição dos fluxos e a formação de congestionamentos, evidenciando a relevância da topologia na dinâmica do tráfego.

3.3 Roteamento dinâmico em redes viárias

O roteamento dinâmico tem sido amplamente investigado como mecanismo para aumentar a eficiência operacional de sistemas viários, permitindo a adaptação das rotas às condições de tráfego em tempo real. Segundo Ben-Akiva *et al*. (2012), sistemas de atribuição dinâmica possibilitam a redistribuição dos fluxos na rede, reduzindo a concentração de veículos em pontos críticos e contribuindo para a melhoria do desempenho global.

Peeta e Ziliaskopoulos (2001) observam que, embora o roteamento dinâmico apresente ganhos relevantes em diferentes cenários operacionais, sua eficácia está diretamente relacionada às condições da rede e ao nível de demanda.

Em cenários de demanda moderada, a adaptação dinâmica das rotas tende

a reduzir tempos de viagem e melhorar a utilização da infraestrutura.

Entretanto, em condições de saturação, seus efeitos tornam-se progressivamente limitados, uma vez que a capacidade da rede passa a representar o principal fator restritivo do sistema.

3.4 Saturação e comportamento não linear

A literatura sobre tráfego urbano evidencia que o comportamento do sistema não apresenta relação linear com o aumento da demanda. Helbing (2001) demonstra que a formação de congestionamentos está associada à interação local entre veículos e à propagação de ondas de parada e aceleração (*stop-and-go waves*), caracterizando o tráfego como um sistema complexo.

Ortúzar e Willumsen (2011) destacam que a saturação ocorre quando a demanda excede a capacidade operacional da rede, resultando em aumento significativo do tempo de viagem e degradação do desempenho do sistema. Esse processo encontra-se frequentemente associado a pontos críticos da rede, nos quais gargalos locais produzem impactos desproporcionais sobre o fluxo global.

Tais características evidenciam que a análise do tráfego urbano exige uma abordagem sistêmica, capaz de considerar as interações entre os diferentes elementos da rede e seus efeitos sobre o comportamento global do sistema (STERMAN, 2000).

3.5 Paradoxo de Braess e eficiência de redes

O Paradoxo de Braess, proposto por Braess (2005), representa um dos fenômenos mais relevantes na análise de redes de transporte. O paradoxo demonstra que a ampliação da infraestrutura viária, por meio da adição de novas rotas, pode, em determinadas condições, degradar o desempenho global do sistema, enquanto a remoção de caminhos pode produzir melhorias operacionais.

Nagurney (2000) discute esse fenômeno no contexto de redes congestionadas, destacando que decisões individuais orientadas pela minimização do tempo de viagem nem sempre conduzem ao melhor resultado coletivo. Youn, Gastner e Jeong (2008) ampliam essa discussão ao demonstrar que a eficiência das redes depende da interação entre topologia da infraestrutura e comportamento dos

usuários.

Esses estudos reforçam que intervenções na infraestrutura viária devem considerar não apenas o aumento da capacidade da rede, mas também os efeitos sistêmicos decorrentes da redistribuição dos fluxos e das interações entre os usuários.

3.6 Lacunas na literatura e contribuição do trabalho

Apesar dos avanços na modelagem e simulação de sistemas de transporte, observa-se que grande parte dos estudos concentra-se em redes reais altamente complexas ou em modelos teóricos abstratos, com menor atenção a abordagens intermediárias capazes de combinar controle experimental, replicabilidade e aplicabilidade prática.

Embora o Paradoxo de Braess seja amplamente discutido na literatura, sua investigação por meio de simulações sistemáticas em redes sintéticas, associadas à variação progressiva da demanda e à aplicação de estratégias de roteamento dinâmico, ainda se mostra relativamente limitada.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe a utilização de redes sintéticas como ambiente experimental controlado para análise do comportamento do tráfego urbano, avaliando os impactos do crescimento da demanda, do roteamento dinâmico e do bloqueio de vias sobre o desempenho global da rede.

Busca-se, ainda, identificar padrões replicáveis de comportamento capazes de contribuir para a compreensão sistêmica do tráfego urbano.

Dessa forma, o estudo posiciona-se na convergência entre modelagem teórica e aplicação prática, contribuindo para o desenvolvimento de abordagens experimentais voltadas à análise de sistemas de transporte complexos.

4. METODOLOGIA

4.1 Natureza e delineamento da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e delineamento experimental fundamentado em simulação computacional. A escolha desse método decorre da necessidade de analisar o

comportamento de sistemas complexos de tráfego urbano em ambientes controlados, possibilitando a investigação de cenários cuja implementação em contextos reais envolveria elevados custos operacionais, riscos e limitações práticas.

A simulação computacional tem sido amplamente utilizada em estudos de mobilidade urbana, sobretudo em sistemas marcados pela interação dinâmica entre múltiplas variáveis e pela presença de comportamentos emergentes (BARCELÓ, 2010).

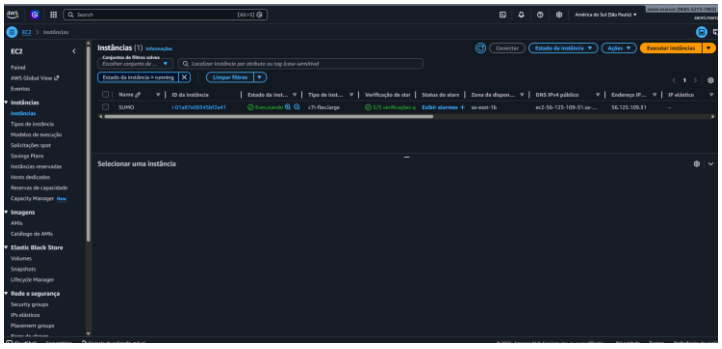
Por meio dessa abordagem, torna-se possível reproduzir o funcionamento do sistema viário e investigar padrões de comportamento sem intervenções diretas na infraestrutura urbana real.

O delineamento experimental adotado também permite a manipulação controlada de variáveis específicas, como nível de demanda, estratégias de roteamento e intervenções estruturais, assegurando maior controle analítico sobre os experimentos e favorecendo a replicabilidade dos resultados (LAW, 2015).

4.2 Ambiente de simulação computacional

As simulações foram executadas em ambiente computacional dedicado, como mostrado na figura 2 que ilustra a interface de adminsitração do Amazon AWS, configurado para suportar múltiplos cenários experimentais e elevada quantidade de execuções iterativas. A estrutura de processamento foi organizada de forma automatizada, permitindo a execução em lote (*batch processing*) de diferentes combinações de parâmetros, incluindo topologia da rede, nível de demanda, estratégias de roteamento e condições de bloqueio viário.

Figura 2 - Interface do Amazon AWS, recurso utilizado para processamento em nuvem do SUMO.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

Os dados gerados durante as simulações foram exportados em formatos estruturados, como XML e CSV, possibilitando posterior tratamento, consolidação e análise quantitativa.

A figura 3 mostra uma das arvores de arquivos de saída no formato XML gerados durante as simulações.

Figura 3 – Exemplo de arquivos de saída no formato XML gerados durante experimento com o SUMO

```
sumo@ip-172-31-28-164:~/simulacoes_finais/experiments/grid1/static/v0001_seed01/output$ ls -l
total 1080
-rw-rw-r-- 1 sumo sumo 183992 Mar 29 19:02 emissions.xml
-rw-rw-r-- 1 sumo sumo 913996 Mar 29 19:02 summary.xml
-rw-rw-r-- 1 sumo sumo   1877 Mar 29 19:02 tripinfo.xml
sumo@ip-172-31-28-164:~/simulacoes_finais/experiments/grid1/static/v0001_seed01/output$
```

Fonte: Captura de tela realizada pelo autor na interface da instância AWS.

A utilização de um ambiente controlado permitiu garantir consistência entre os experimentos, reduzindo interferências externas e assegurando comparabilidade entre os cenários analisados.

4.3 Ferramentas utilizadas: SUMO

As simulações desenvolvidas neste trabalho foram realizadas por meio do software Simulation of Urban MObility (SUMO), uma plataforma de simulação microscópica de código aberto amplamente utilizada em pesquisas relacionadas à modelagem e análise de sistemas de transporte (KRAJZEWICZ *et al.*, 2012).

A figura 4 mostra a interface gráfica de usuário do SUMO.

Figura 4 – Interface gráfica de usuário do SUMO (SUMO-GUI).



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

O SUMO realiza simulação microscópica do tráfego, representando individualmente cada veículo e suas interações ao longo da rede viária. O modelo

considera aspectos como aceleração, desaceleração, tomada de decisão em interseções e interação entre agentes, permitindo a investigação de fenômenos complexos, como formação de congestionamentos, propagação de filas e redistribuição de fluxos (BEHRISCH *et al*., 2011).

A escolha do SUMO fundamenta-se em sua flexibilidade, capacidade de modelagem de diferentes cenários experimentais e ampla utilização na literatura científica. O software permite tanto execução com interface gráfica (SUMO-GUI), utilizada na validação visual dos cenários, quanto execução em modo não interativo, mais adequada para experimentos em larga escala e processamento automatizado.

4.4 Automação e tratamento de dados com Python e Jupyter

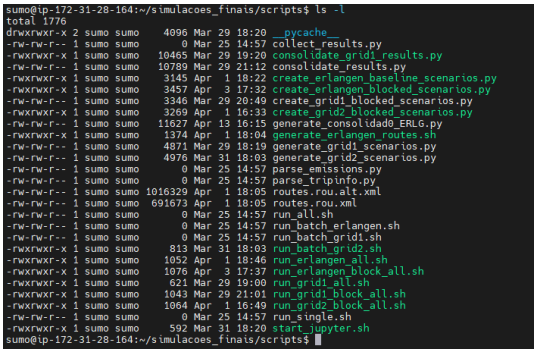
Além das ferramentas nativas do SUMO, foram desenvolvidos scripts em Python para automatização das etapas do processo experimental, incluindo geração de cenários, organização da estrutura de diretórios, leitura de arquivos de saída, consolidação de métricas e exportação dos resultados em formato tabular.

A utilização dessas rotinas automatizadas permitiu reduzir intervenções manuais repetitivas, aumentar a consistência metodológica entre os experimentos e viabilizar o processamento de múltiplos cenários em larga escala.

Adicionalmente, essa abordagem favoreceu a reprodutibilidade da pesquisa, uma vez que o tratamento e a consolidação dos dados passaram a seguir procedimentos padronizados e replicáveis.

A figura 5 mostra a relação dos arquivos de rotinas automatizadas (*scripts*), utilizados para organização e coleta de dados.

Figura 5 – Listagem dos scripts utilizados para automação de tarefas.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

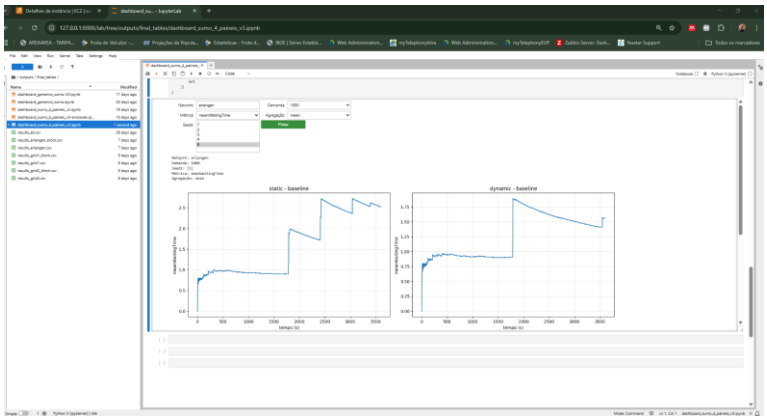
Para análise exploratória dos dados e geração de visualizações, foi utilizado o ambiente Jupyter Lab.

A ferramenta permitiu integrar código, tabelas, gráficos e etapas de processamento em um único fluxo de trabalho, favorecendo tanto a validação intermediária dos experimentos quanto a interpretação final dos resultados.

O uso do Jupyter Lab mostrou-se adequado ao contexto desta pesquisa, especialmente devido ao elevado volume de dados gerados pelas simulações e à necessidade de processamento iterativo, consolidação contínua das métricas e verificação recorrente das saídas experimentais.

A figura 6 mostra a interface grafica do Jupyter Lab com um painel de dados sendo trabalhado.

Figura 6 – Jupyter Lab



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

Os arquivos gerados pelo SUMO, especialmente nos formatos XML e CSV, foram processados por rotinas automatizadas desenvolvidas em Python, responsáveis pela extração e consolidação de métricas como tempo médio de viagem, tempo de espera, perda de tempo, velocidade média e emissões veiculares.

Os dados processados foram posteriormente organizados em tabelas comparativas utilizadas na análise quantitativa dos cenários experimentais.

O uso integrado de scripts em Python e do ambiente Jupyter Lab constituiu parte essencial da infraestrutura metodológica da pesquisa, fornecendo suporte à automação das execuções, ao tratamento dos dados e à elaboração das análises

apresentadas nos capítulos seguintes.

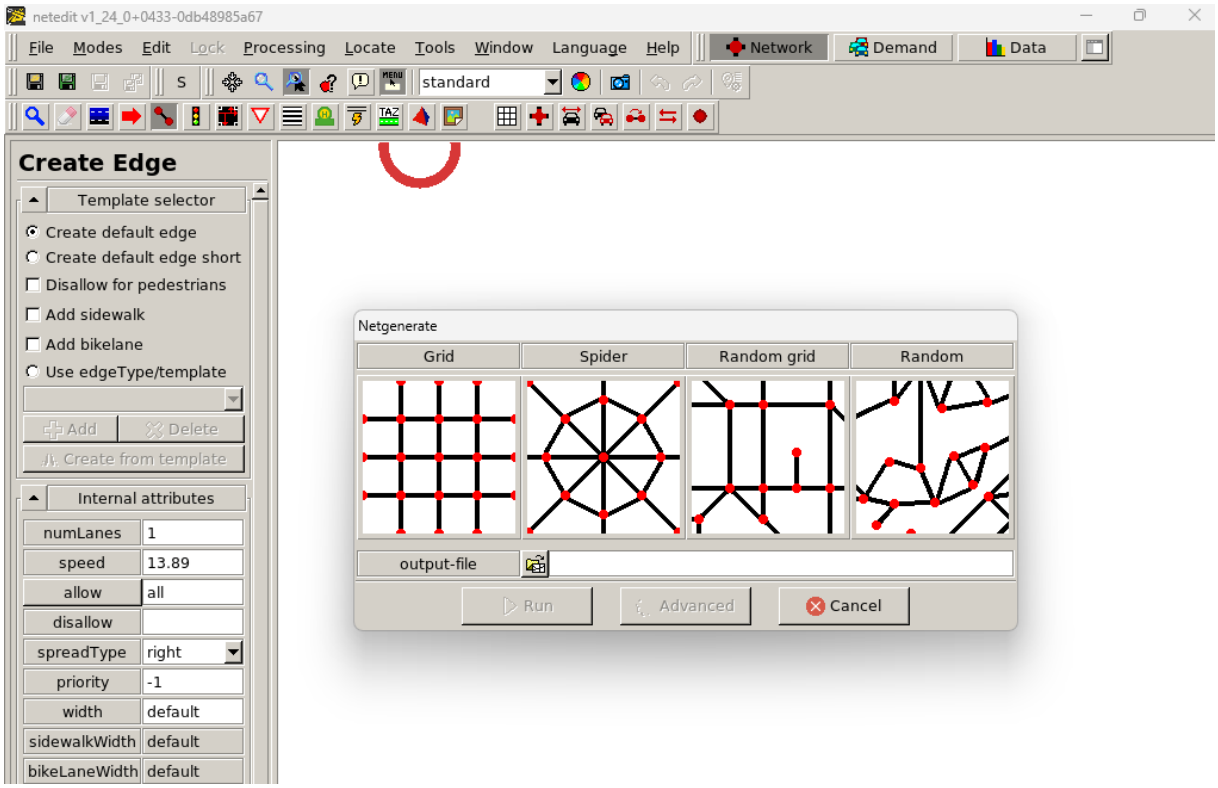
4.5 Construção das redes viárias

4.5.1 Modelagem com NETEDIT

A construção das redes viárias foi realizada por meio da ferramenta gráfica NETEDIT, integrada ao SUMO, que permite a criação e edição de redes de forma interativa.

A figura 7 mostra a interface gráfica de usuário do NETEDIT e a ferramenta NETGENERATE com malhas pré-definidas.

Figura 7 – NETEDIT, ferramenta do pacote SUMO.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

Foram definidos os elementos estruturais fundamentais da rede, incluindo:

- nós (nodes), representando interseções;
- arestas (edges), representando segmentos viários;
- conexões entre vias;
- atributos operacionais, como velocidade máxima e direção de fluxo.

A utilização do NETEDIT possibilitou a validação visual da consistência da

rede, reduzindo erros de configuração e garantindo coerência estrutural antes da execução dos experimentos.

4.5.2 Redes sintéticas

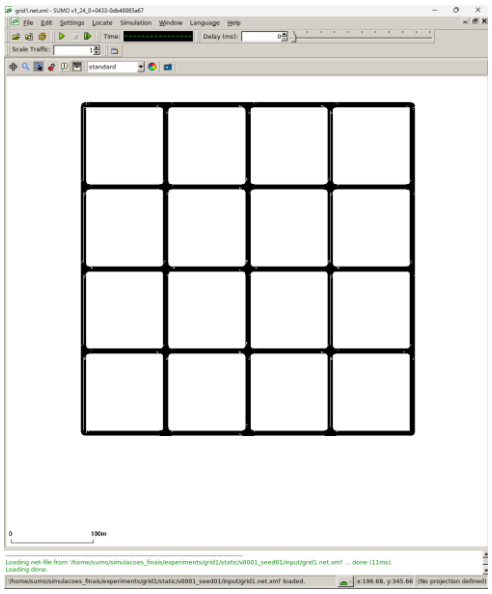
As redes sintéticas foram modeladas como malhas ortogonais em grade, com o objetivo de criar um ambiente experimental controlado, no qual seja possível isolar variáveis estruturais e analisar o comportamento do tráfego de forma sistemática.

Grid 1

A rede denominada Grid1 consiste em uma malha regular, com conectividade uniforme entre os nós e características homogêneas ao longo de toda a estrutura. As vias apresentam parâmetros padronizados de operação, como velocidade e geometria, e não possuem controle semafórico, permitindo observar diretamente os efeitos da interação entre veículos e da distribuição de fluxo.

A figura 8 mostra uma imagem da malha Grid1 utilizada nos experimentos desse trabalho.

Figura 8 – Imagem da rede Grid 1



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

Essa configuração funciona como cenário base do experimento, permitindo avaliar o comportamento do sistema sob diferentes níveis de demanda em um

ambiente totalmente controlado.

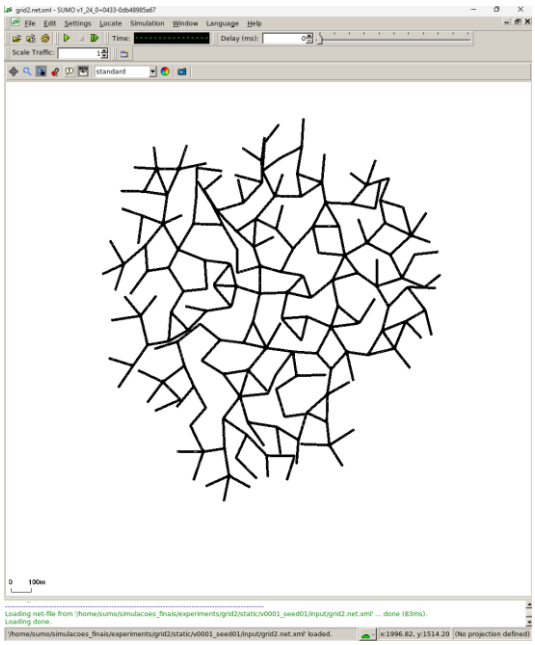
Grid 2

A rede Grid2 foi concebida como uma variação da malha sintética, apresentando alterações estruturais em relação ao Grid1. Embora mantenha o caráter de rede controlada, essa configuração introduz diferenças na conectividade e na organização das vias, permitindo analisar o impacto da topologia sobre o desempenho do sistema.

Diferentemente do Grid1, cuja estrutura apresenta elevada regularidade geométrica e múltiplos caminhos equivalentes, o Grid 2 foi construído com alterações na conectividade entre arestas e interseções, reduzindo parcialmente a redundância de rotas disponíveis. Essa configuração busca representar uma malha menos homogênea, permitindo avaliar de que forma características topológicas influenciam o desempenho do sistema e a eficácia das estratégias de roteamento.

A figura 9 mostra uma imagem da malha Grid2 utilizada nos experimentos desse trabalho.

Figura 9 – Imagem da rede Grid 2



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

A utilização de duas redes sintéticas distintas possibilita verificar se os padrões observados são dependentes de uma configuração específica ou se

representam comportamentos mais gerais do sistema viário.

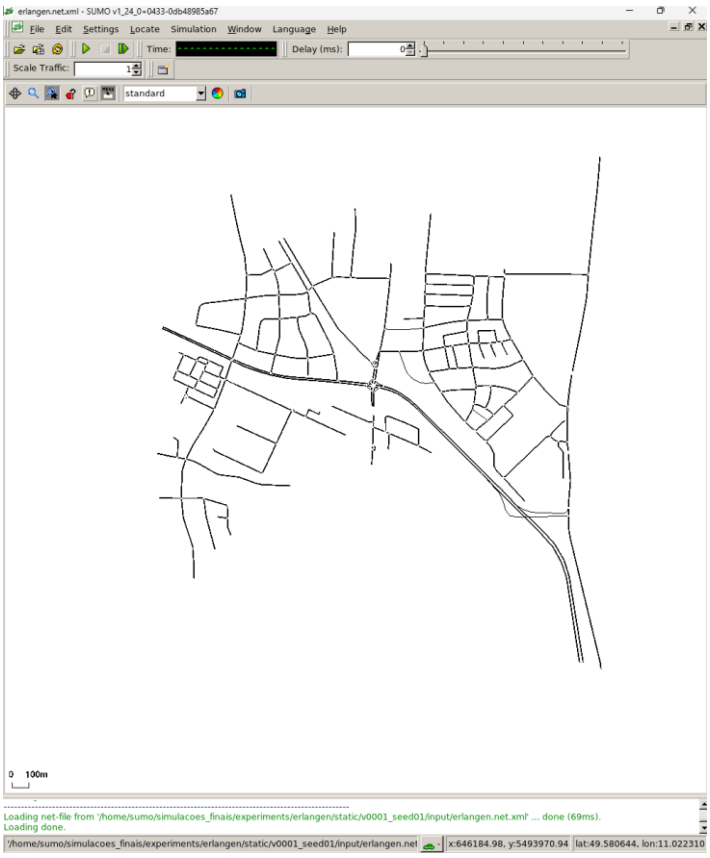
Esse tipo de modelagem permite o isolamento de variáveis estruturais e facilita a identificação de padrões sistêmicos, sendo amplamente utilizado em estudos de tráfego (XIE; LEVINSON, 2007).

4.5.3 Rede real (Erlangen)

Além das redes sintéticas, foi utilizada uma rede real baseada na cidade de Erlangen, Alemanha, amplamente empregada como referência em estudos com o simulador SUMO.

A figura 10 mostra uma imagem da malha Erlangen utilizada nos experimentos desse trabalho.

Figura 10 – Imagem da rede Erlangen



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

Diferentemente das redes sintéticas, essa configuração apresenta

características típicas de ambientes urbanos reais, incluindo:

- geometria irregular das vias;
- presença de interseções complexas;
- controle semafórico;
- heterogeneidade estrutural.

A inclusão dessa rede permite avaliar, de forma qualitativa, a aderência dos padrões observados nas redes sintéticas a um cenário mais próximo da realidade.

Assim, a combinação entre redes sintéticas e rede real possibilita uma análise em dois níveis: controle experimental e validação externa.

4.6 Definição dos cenários experimentais

Os cenários experimentais foram estruturados de forma sistemática, combinando diferentes níveis de demanda, estratégias de roteamento e condições operacionais da rede, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema viário sob diferentes níveis de carga e restrição.

4.6.1 Configuração da demanda

Foram definidos cinco níveis de demanda, representando diferentes condições de carregamento da rede:

- 1 veículo (cenário de referência, fluxo livre);
- 100 veículos;
- 500 veículos;
- 1000 veículos;
- 3000 veículos.

A geração de tráfego foi realizada por meio da definição manual das rotas no cenário estático, garantindo controle sobre a origem e destino dos veículos. Essa abordagem permitiu estabelecer uma base consistente para comparação com os cenários de roteamento dinâmico.

Todos os cenários foram executados durante 3600 segundos de tempo simulado. Esse horizonte temporal foi adotado por proporcionar tempo suficiente para que as diferentes configurações de demanda atingissem um regime operacional representativo, permitindo que os efeitos das estratégias de roteamento e das

intervenções estruturais se manifestassem de forma consistente. Além disso, a adoção de um tempo de simulação padronizado garantiu condições equivalentes para comparação entre todos os experimentos.

4.6.2 Execuções e variabilidade (seeds)

Para cada configuração de demanda e cenário, foram realizadas cinco execuções independentes, utilizando diferentes sementes aleatórias (*seeds*), correspondentes aos valores iniciais do gerador de números pseudoaleatórios. Esse gerador é um algoritmo que produz sequências reproduzíveis de números com comportamento estatístico semelhante ao aleatório. A utilização de diferentes sementes introduz pequenas variações estocásticas entre as execuções, permitindo avaliar a consistência dos resultados e reduzir a influência da aleatoriedade em uma única simulação.

O uso de múltiplas execuções permite introduzir variabilidade estocástica no sistema, reduzindo o risco de resultados determinísticos e aumentando a robustez das análises (TREIBER; KESTING, 2013). Essa estratégia é particularmente importante em simulações microscópicas, nas quais pequenas variações podem impactar significativamente o comportamento global do sistema.

A combinação entre níveis de demanda, estratégias de roteamento e condições de bloqueio resultou em aproximadamente 300 simulações, formando um conjunto de dados amplo para análise comparativa.

4.6.3 Estratégias de roteamento

Foram consideradas duas abordagens distintas de roteamento:

Roteamento estático

No roteamento estático, as rotas são previamente definidas e permanecem fixas ao longo da simulação, sem adaptação às condições de tráfego. Essa abordagem representa um cenário no qual os veículos seguem trajetos preestabelecidos, independentemente da ocorrência de congestionamentos.

Roteamento dinâmico

No roteamento dinâmico, as rotas são ajustadas ao longo da simulação com

base nas condições atuais da rede, permitindo redistribuição do fluxo em resposta ao congestionamento. A implementação foi realizada utilizando os mecanismos nativos de rerroteamento do SUMO, com atualização periódica das rotas a partir das estimativas de custo de deslocamento nas vias. Essa abordagem permite que os veículos adaptem seus trajetos ao longo da execução da simulação, buscando caminhos alternativos diante de alterações nas condições operacionais da rede.

4.6.4 Cenários com bloqueio de vias

Além dos cenários base, foram implementadas configurações com restrição de vias, com o objetivo de avaliar o impacto de intervenções estruturais sobre o desempenho do sistema.

O bloqueio foi realizado por meio da inserção de veículos estáticos posicionados em múltiplas arestas da rede, ocupando todas as faixas disponíveis e impedindo a circulação nesses trechos. Os pontos de bloqueio foram definidos em regiões centrais das malhas sintéticas, de forma a maximizar seu impacto sobre o fluxo e induzir a necessidade de redistribuição do tráfego.

A figura 11 mostra a interface gráfica de usuário do SUMO durante um momento de pausa durante uma das simulações, identificando os elementos gráficos que representam os veículos envolvidos na simulação.

Figura 11 – Imagem de uma simulação com destaque aos veículos utilizados como bloqueio das faixas de rodagem.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

Essa abordagem simula situações reais como:

- interdições por obras;
- acidentes;
- restrições operacionais temporárias.

Além disso, permite investigar efeitos sistêmicos decorrentes da redução da capacidade da rede, incluindo a reorganização do fluxo e possíveis ganhos de eficiência em determinadas configurações.

Verificou-se que os veículos utilizados para simular o bloqueio das vias não interferem nos arquivos tripinfo.xml, mas aparecem nos arquivos emissions.xml dos cenários com bloqueio. Por esse motivo, esses veículos foram excluídos das análises ambientais, a fim de evitar distorções nas métricas agregadas de emissão e consumo.

4.6.5 Síntese dos cenários

Os experimentos foram estruturados a partir da combinação das seguintes variáveis:

- três configurações de rede (Grid 1, Grid 2 e Erlangen);
- cinco níveis de demanda (1,100, 500, 1000 e 3000 veículos);
- duas estratégias de roteamento (estático e dinâmico);
- duas condições operacionais (com e sem bloqueio);
- cinco execuções por cenário (seeds).

Essa combinação resultou em um conjunto abrangente de simulações, permitindo analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições e identificar padrões consistentes entre os cenários avaliados.

4.7 Métricas de avaliação

A análise dos resultados foi baseada em métricas quantitativas amplamente utilizadas em estudos de mobilidade urbana e simulação de tráfego, permitindo avaliar diferentes aspectos do desempenho operacional da rede viária:
tempo médio de viagem;

tempo médio de espera;

perda de tempo (timeLoss);

velocidade média;

taxa de conclusão de viagens;

emissões (CO_2).

O tempo médio de viagem corresponde ao tempo total necessário para que um veículo complete seu trajeto entre origem e destino. No SUMO, essa métrica é representada pelo atributo duration, definido como o tempo necessário para que o veículo conclua sua rota (“the time the vehicle needed to accomplish the route”) (SUMO Documentation, 2024). Essa métrica representa a eficiência global do deslocamento na rede, sendo amplamente utilizada para avaliar o impacto de congestionamentos e intervenções viárias sobre a mobilidade urbana.

O tempo médio de espera é derivado do atributo waitingTime, definido pelo SUMO como o período em que a velocidade do veículo permanece inferior ou igual a 0,1 m/s, desconsiderando paradas programadas (“the time in which the vehicle speed was below or equal 0.1 m/s”) (SUMO Documentation, 2024). Essa métrica está diretamente relacionada à formação de filas, retenções e saturação do sistema viário.

Já a perda de tempo (timeLoss) representa o tempo adicional gasto em relação a uma condição ideal de deslocamento em fluxo livre. Segundo a documentação oficial do SUMO, essa métrica corresponde ao “tempo perdido devido à condução abaixo da velocidade ideal” (“time lost due to driving below the ideal speed”) (SUMO Documentation, 2024). Dessa forma, permite avaliar a penalização operacional causada por congestionamentos, conflitos de tráfego e restrições impostas pela infraestrutura viária.

Além dessas métricas principais, também foram utilizadas medidas complementares, como velocidade média, taxa de conclusão de viagens e emissões de CO_2, permitindo analisar o desempenho do sistema sob perspectivas operacionais e ambientais.

Essas métricas permitem avaliar o desempenho do sistema sob diferentes perspectivas, incluindo eficiência operacional e impacto ambiental (BARCELÓ,

2010).

4.8 Execução das simulações e coleta de dados

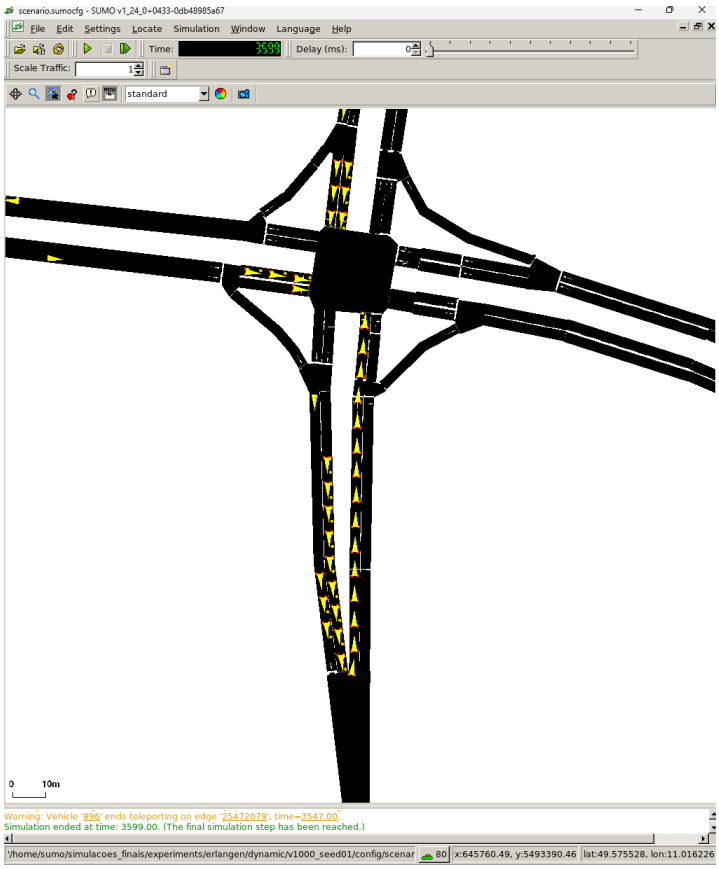
As simulações foram realizadas em duas etapas complementares:

- Validação em ambiente gráfico (SUMO-GUI)

Utilizada para verificação visual da consistência dos cenários e comportamento do tráfego.

A figura 12, de forma semelhante a figura 11, mostra a interface gráfica do SUMO durante momento de pausa efetuada em uma simulação via SUMO-GUI (*SUMO graphical user interface*).

Figura 12 – Imagem de simulação rodando em modo gráfico



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

- Execução em modo batch

Realizada sem interface gráfica, permitindo a execução automatizada de múltiplos cenários.

Durante as simulações, foram gerados arquivos de saída contendo dados detalhados, incluindo:

- tripinfo.xml;
- summary.xml;
- emissions.xml.

Esses dados foram posteriormente processados e consolidados para análise comparativa.

Após a execução das simulações, os arquivos de saída foram processados por scripts em Python, que extraíram e consolidaram as métricas de interesse. Em seguida, os dados consolidados foram analisados em ambiente Jupyter Lab, permitindo a construção de tabelas e gráficos comparativos entre os diferentes cenários.

A figura 13 mostra o *dashboard (*painel de dados) gerado pelo Jupyter Lab.

Figura 13 – Imagem das tabelas e gráficos do Jupyter Lab



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor

4.9 Reprodutibilidade

A metodologia foi estruturada de forma a permitir replicação dos experimentos, com definição clara de parâmetros, organização dos cenários e utilização de ferramentas abertas.

O uso do SUMO reforça a transparência e a possibilidade de reprodução dos resultados em diferentes contextos (KRAJZEWICZ *et al*., 2012).

Tabela 1- Resumo e quantidade de testes

Rede	**Sem bloqueio**		**Com bloqueio**		**Total**
	Roteamento estático	**Roteamento dinâmico**	**Roteamento estático**	**Roteamento dinâmico**	
Erlangen	25	25	25	25	100
Grid 1	25	25	25	25	100
Grid 2	25	25	25	25	100
Total Geral	75	75	75	75	300

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

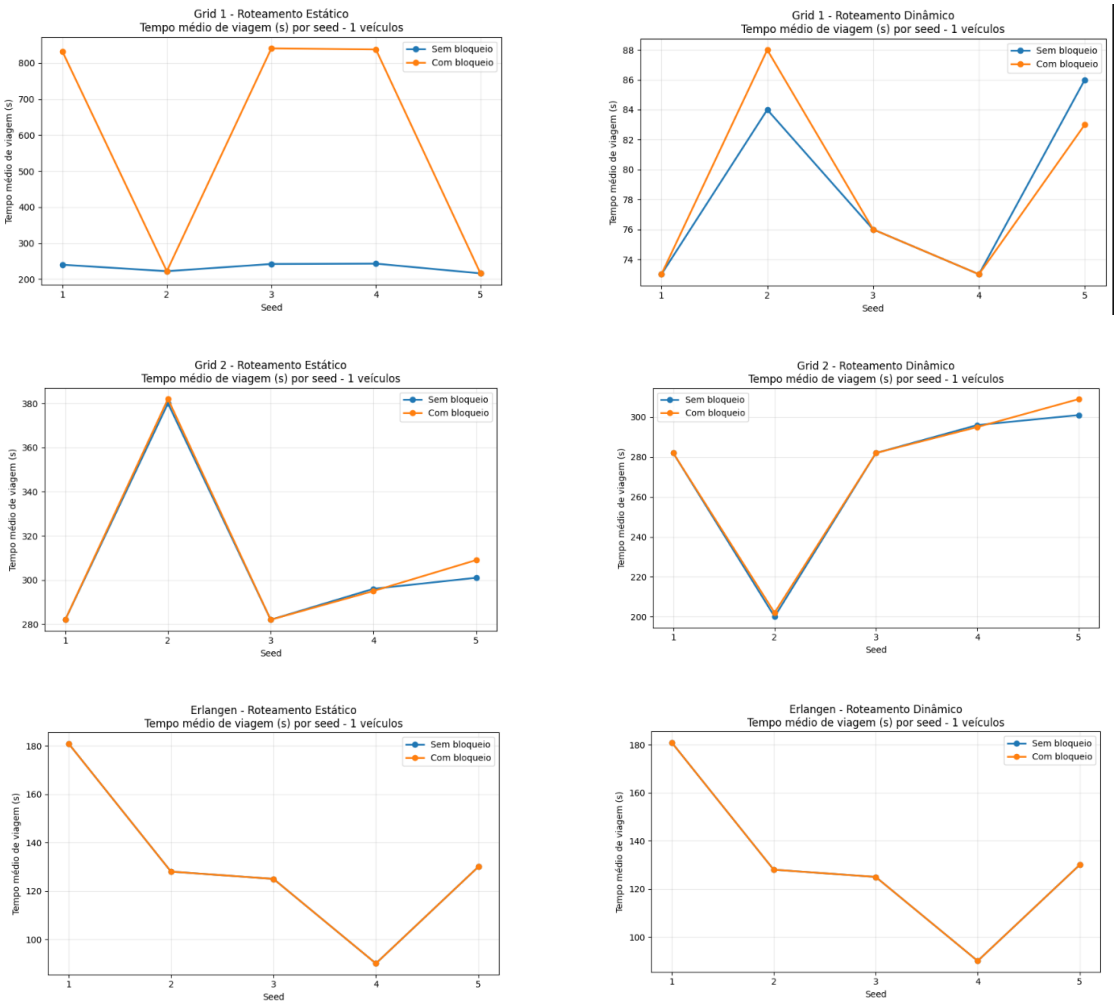
5.1 Validação do comportamento base da rede

A análise inicial dos resultados teve como objetivo verificar se as redes simuladas reproduziam um comportamento coerente com a lógica esperada para sistemas viários sob diferentes níveis de demanda. Essa etapa é importante porque estabelece a confiabilidade do modelo antes da comparação entre cenários mais complexos, como aqueles com bloqueios e diferentes estratégias de roteamento.

Nos cenários de demanda muito baixa, representados pelos experimentos com apenas um veículo, observou-se comportamento compatível com regime de fluxo livre. No cenário Grid 1, static, os valores de tempo médio de viagem variaram entre 216 e 243 segundos, sem registro de tempo de espera, indicando ausência de interferência entre veículos e inexistência de congestionamento. Nessas condições, a rede opera de forma praticamente ideal, com deslocamento determinado apenas pelas características geométricas e operacionais da malha.

A figura 14 mostra os gráficos gerados pelo Jupyter Lab com a análise dos Tempo médio de viagem na simulações com demanda de 1 veículo.

Figura 14 – Tempo médio de viagem com 1 veículo trafegando no cenário.

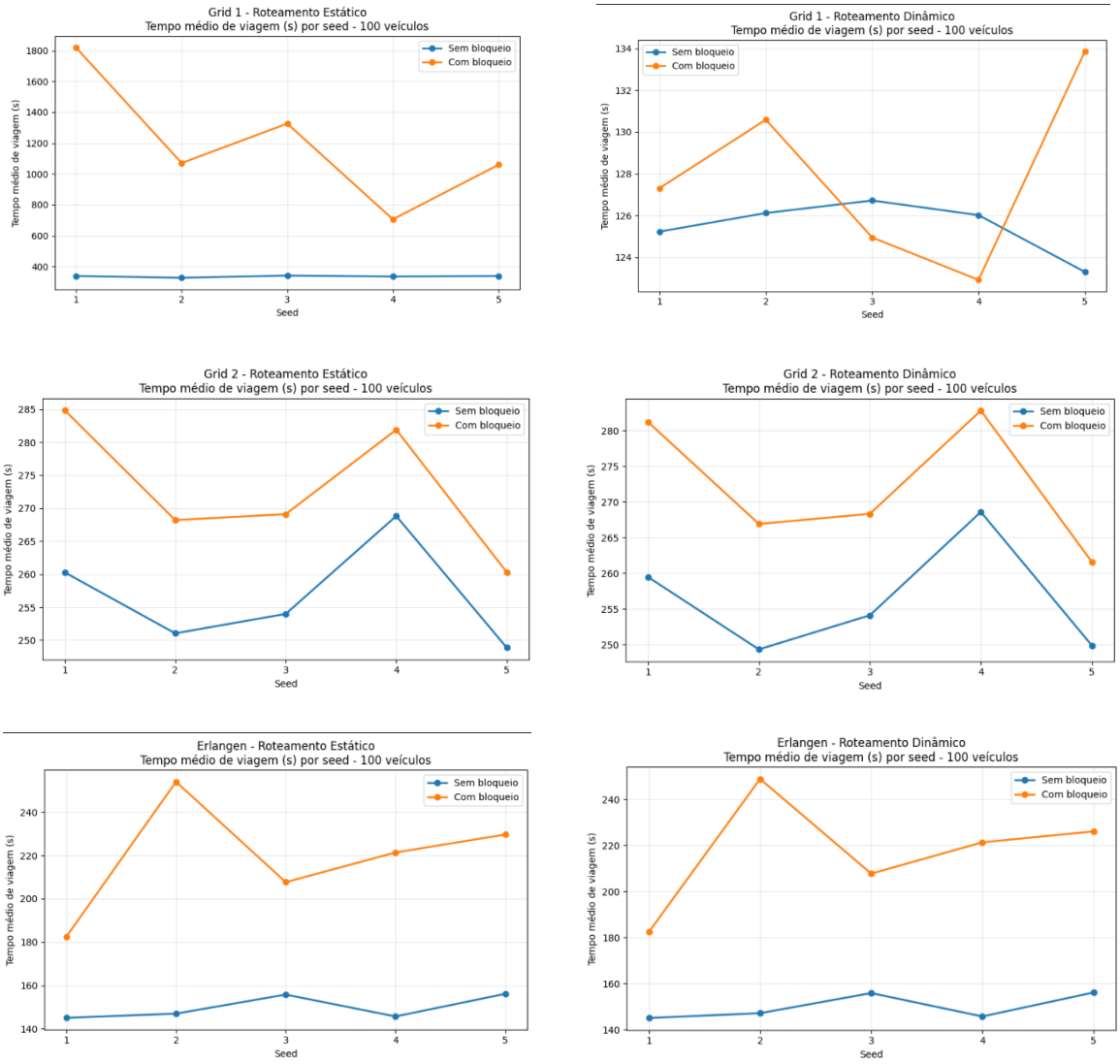


Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

À medida que a demanda aumenta, mesmo em níveis ainda moderados, surgem sinais claros de interação entre os fluxos e de deterioração do desempenho global da rede. Nos experimentos com demanda de 100 veículos, observam-se aumentos relevantes no tempo de viagem e na perda de tempo, indicando a formação de congestionamentos localizados, fenômeno associado à limitação de capacidade da rede e à interação entre veículos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

A figura 15 mostra os gráficos gerados pelo Jupyter Lab com a análise dos Tempo médio de viagem na simulações com demanda de 100 veículos.

Figura 15 – Tempo médio de viagem com 100 veículos trafegando no cenário.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

Esse comportamento confirma que o modelo é sensível ao crescimento da demanda e reproduz a dinâmica esperada de redes urbanas. A rede sintética não responde de forma linear ao acréscimo de veículos, comportamento característico de sistemas complexos, nos quais pequenas variações nas condições iniciais podem gerar impactos significativos no desempenho global (HELBING, 2001; STERMAN, 2000).

A validação do comportamento base também é observada nos cenários com bloqueio. Mesmo com restrições estruturais, em baixa demanda o sistema mantém comportamento próximo ao fluxo livre, enquanto em demandas moderadas passa a

apresentar interação entre fluxos, indicando coerência operacional do modelo.

Assim, os resultados demonstram que o modelo reproduz adequadamente o regime de fluxo livre e a transição para estados de congestionamento, validando sua utilização nas análises subsequentes.

5.2 Resultados sem bloqueio

A análise dos cenários sem bloqueio tem como objetivo caracterizar o comportamento natural das redes sob diferentes níveis de demanda.

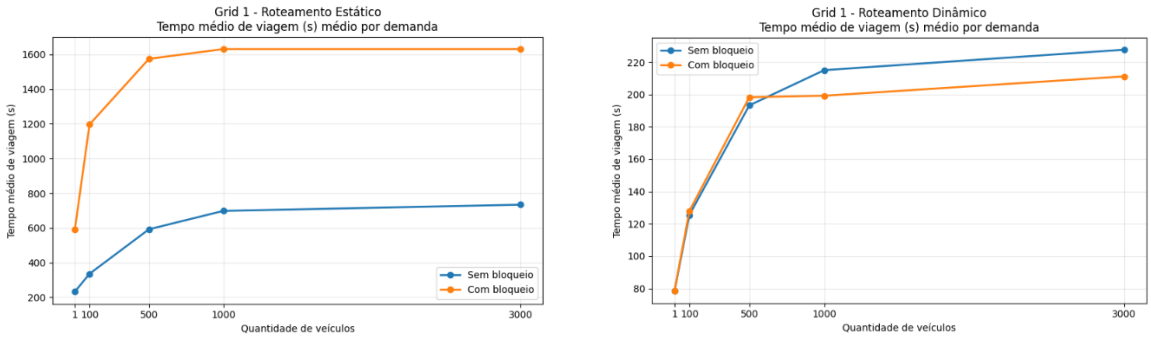
5.2.1 Grid 1

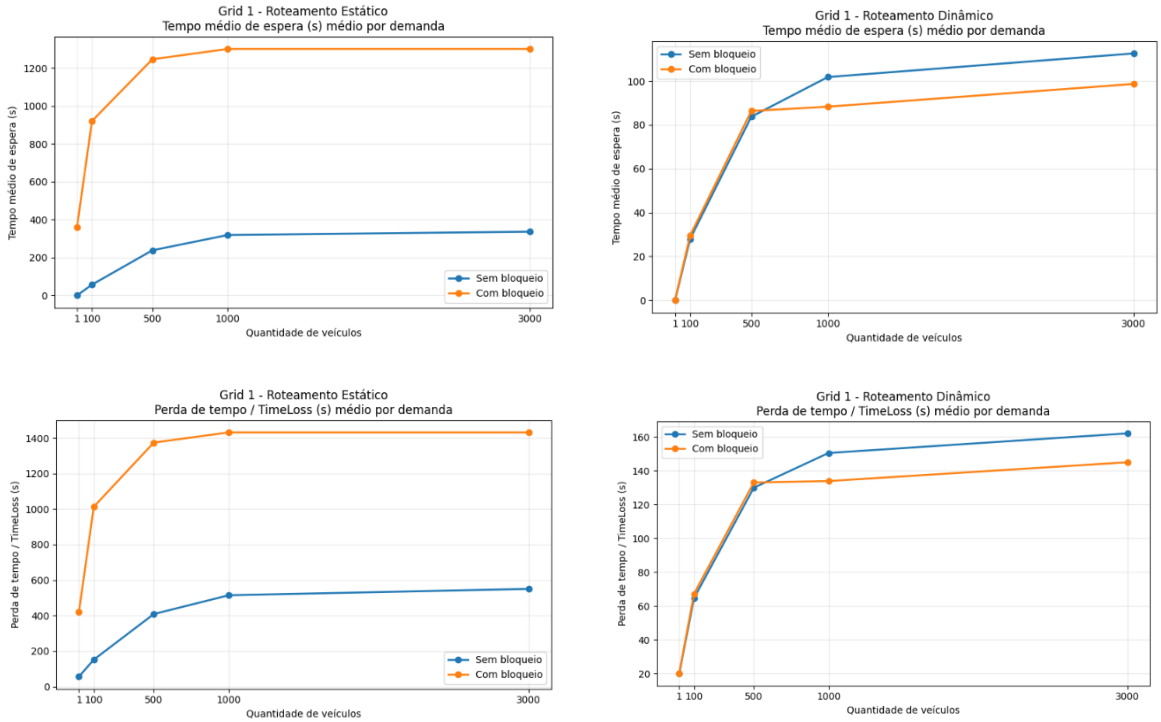
Nos cenários da rede Grid 1, o aumento progressivo da demanda resulta em degradação consistente dos indicadores de desempenho. Para demandas moderadas, observa-se aumento do tempo de viagem, do tempo de espera e da perda de tempo, evidenciando a formação de congestionamentos localizados, fenômeno amplamente descrito na literatura de tráfego urbano (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

À medida que a demanda se aproxima de níveis mais elevados, o sistema apresenta comportamento não linear, com crescimento acelerado dos tempos de viagem e redução da eficiência global. Esse padrão caracteriza a transição para um regime de saturação, no qual a rede perde capacidade de absorver novos fluxos de forma eficiente (HELBING, 2001).

A figura 16 mostra os gráficos gerados pelo Jupyter Lab com as análises das variações no aumento da demanda dos veículos utilizadas na rede Grid1.

Figura 16 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para o Grid 1.





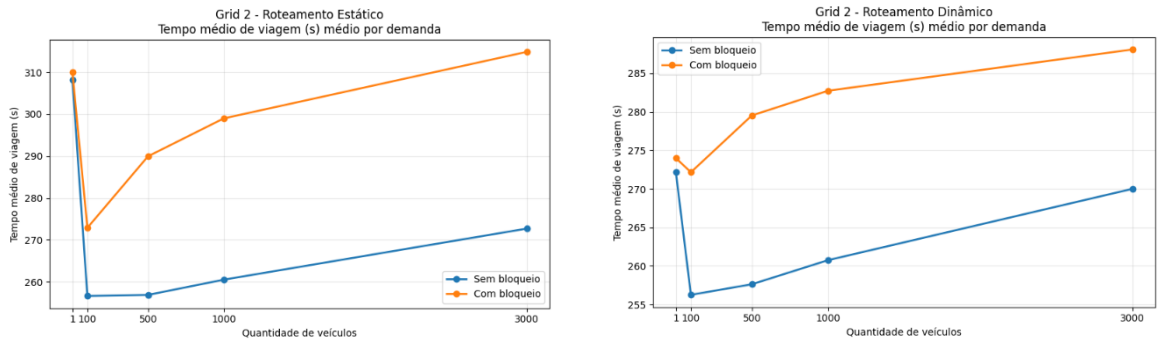
Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

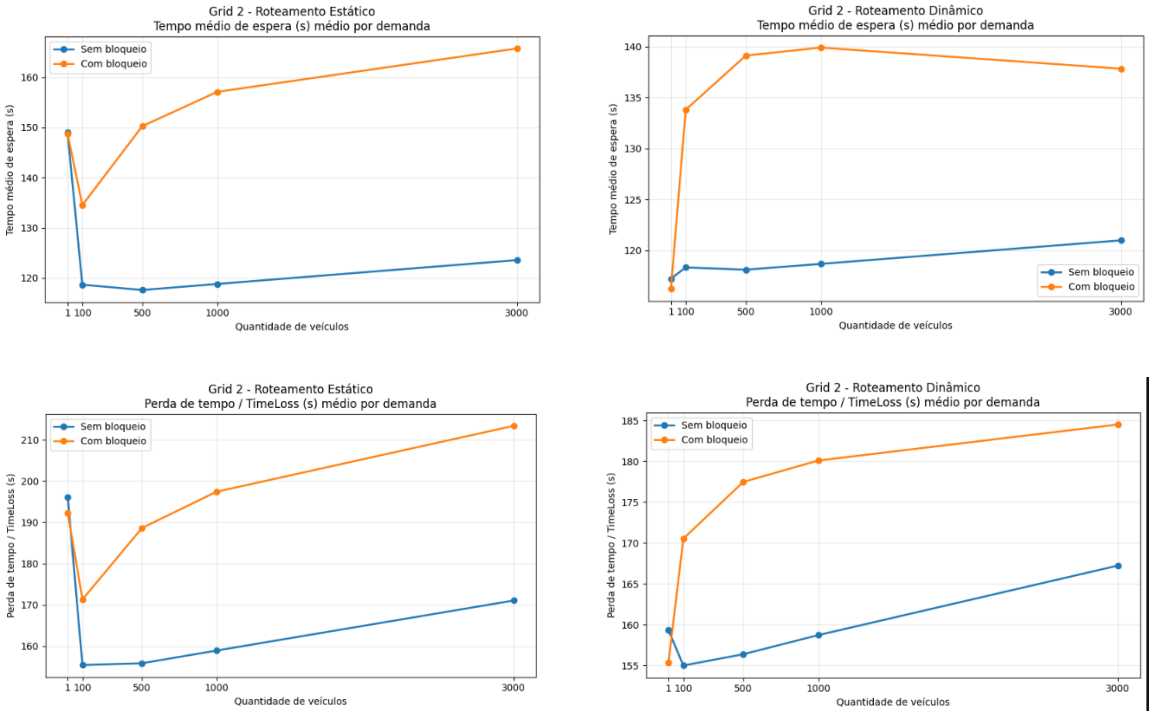
5.2.2 Grid 2

Na rede Grid 2, observa-se comportamento semelhante, porém influenciado pela topologia da malha. A conectividade e a redundância de caminhos afetam diretamente a formação de gargalos e a propagação do congestionamento, indicando que o desempenho não depende apenas do volume de veículos, mas também da estrutura da rede (Rodrigue *et al.*, 2020).

A figura 17 mostra os gráficos gerados pelo Jupyter Lab com as análises das variações no aumento da demanda dos veículos utilizadas na rede Grid2.

Figura 17 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para o Grid 2.





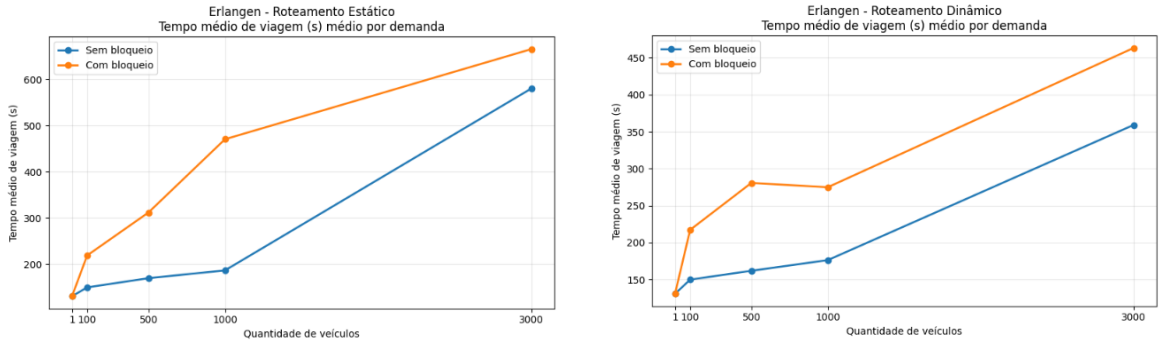
Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

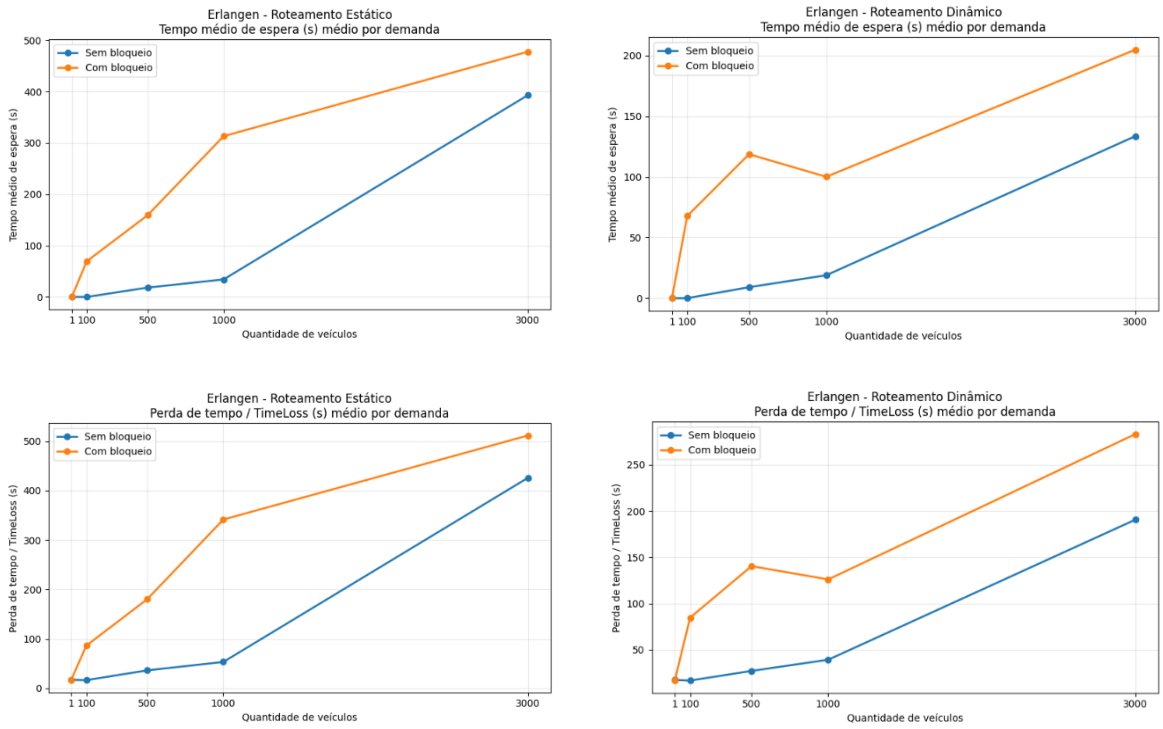
5.2.3 Erlangen

Na rede real de Erlangen, a heterogeneidade estrutural introduz maior variabilidade nos resultados. O aumento da demanda leva à deterioração do desempenho, porém de forma menos uniforme, refletindo diferenças locais de capacidade e controle de tráfego.

A figura 18 mostra os gráficos gerados pelo Jupyter Lab com as análises das variações no aumento da demanda dos veículos utilizadas na rede Erlangen.

Figura 18 – Variações encontradas no aumento da demanda de veículos para Erlangen.





Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

5.3 Resultados com bloqueio

A introdução de bloqueios simula intervenções estruturais que restringem caminhos disponíveis.

5.3.1 Grid 1 com bloqueio

Nos cenários com bloqueio e roteamento dinâmico, observa-se comportamento distinto. Em demandas moderadas, há melhoria significativa no desempenho quando comparado ao cenário sem bloqueio. Esse resultado indica que a restrição de caminhos pode induzir redistribuição mais eficiente do fluxo, reduzindo gargalos.

Esse comportamento é consistente com estudos que demonstram que intervenções estruturais podem influenciar positivamente a organização do tráfego (Nagurney, 2000).

5.3.2 Grid 2 com bloqueio

Na rede Grid 2, o bloqueio também promove redistribuição do fluxo, com efeitos variáveis conforme a topologia da rede, reforçando a importância da estrutura na dinâmica do tráfego.

5.3.3 Erlangen com bloqueio

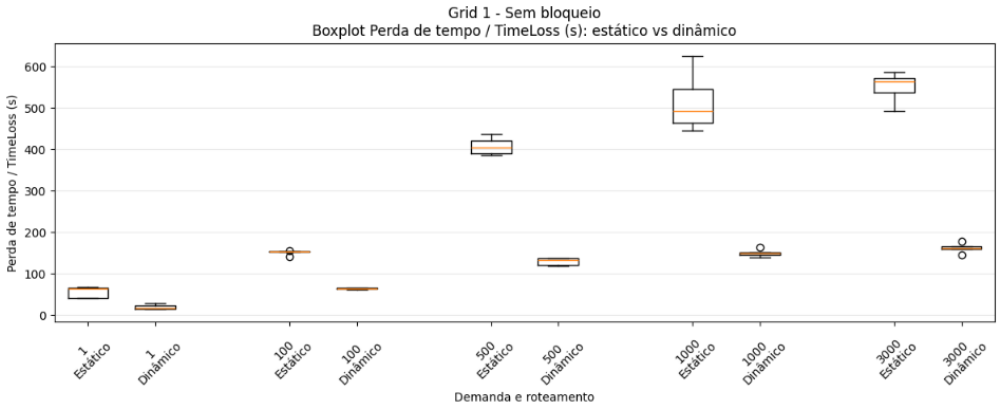
Na rede real, os efeitos dependem da localização do bloqueio, evidenciando que intervenções estruturais devem considerar a importância funcional das vias na malha.

5.4 Comparação: estático *versus* dinâmico

O roteamento dinâmico permite adaptação das rotas com base nas condições da rede, promovendo redistribuição de fluxo e redução de gargalos. Esse comportamento resulta em melhoria dos indicadores de desempenho em relação ao roteamento estático, especialmente em cenários de demanda moderada (BEN-AKIVA *et al.*, 2012).

A figura 19 mostra a variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico nas simulações efetuadas na rede GRID1.

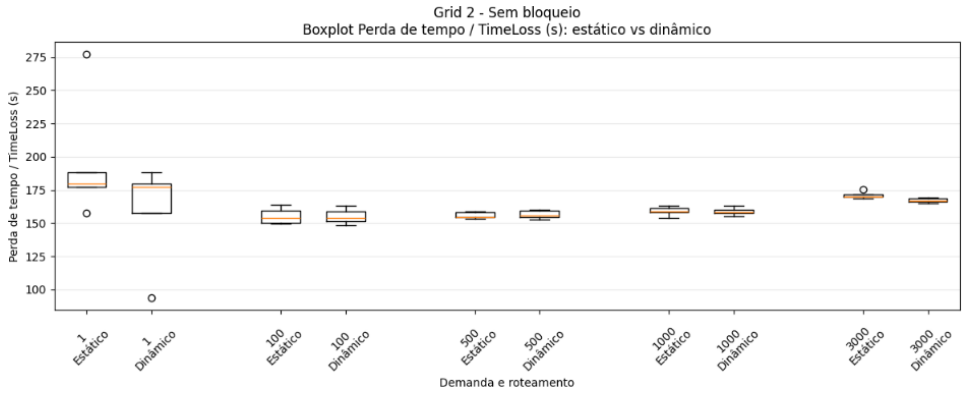
Figura 19 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

A figura 20 mostra a variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico nas simulações efetuadas na rede GRID2.

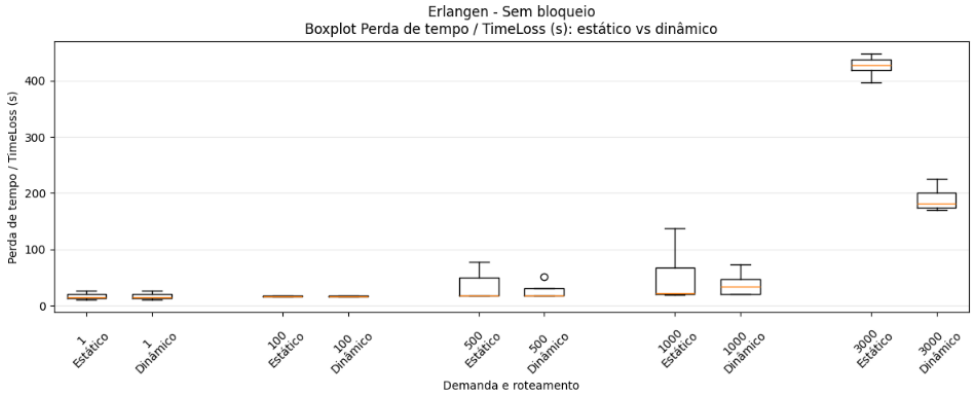
Figura 20 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

A figura 21 mostra a variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico nas simulações efetuadas na rede Erlangen.

Figura 21 – Variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

Entretanto, em altas demandas, os ganhos tornam-se limitados, indicando que o roteamento atua como mecanismo de mitigação, mas não elimina a saturação.

A Tabela 2 apresenta o ganho percentual médio obtido pelo roteamento dinâmico em relação ao roteamento estático para a métrica de perda de tempo (timeLoss)

Tabela 2 - Ganho percentual do roteamento dinâmico

Rede	**Veículos**	**Dinâmico**	**Estático**	**Ganho do dinâmico (%)**
Erlangen	1	17,31	17,31	0

Erlangen	100	16,64	16,58	-0,36
Erlangen	500	27,07	36,37	25,56
Erlangen	1000	39,17	53,42	26,67
Erlangen	3000	190,55	425,82	55,25
Grid 1	1	19,96	56,2	64,49
Grid 1	100	64,65	151,95	57,45
Grid 1	500	129,98	408,72	68,2
Grid 1	1000	150,52	514,49	70,74
Grid 1	3000	162,13	550,35	70,54
Grid 2	1	159,34	196,06	18,73
Grid 2	100	155,01	155,42	0,27
Grid 2	500	156,39	155,84	-0,35
Grid 2	1000	158,73	158,91	0,12
Grid 2	3000	167,24	171,03	2,22

Verifica-se que os ganhos mais expressivos ocorreram em cenários de demanda intermediária, enquanto em condições próximas da saturação os benefícios tornam-se menos significativos.

Os ganhos observados na rede Grid 1 foram significativamente superiores aos demais cenários, possivelmente em função da elevada regularidade topológica e da maior disponibilidade de caminhos alternativos equivalentes, favorecendo a redistribuição do fluxo pelo roteamento dinâmico.

Diferentemente do observado no Grid 1, a rede Grid 2 apresentou ganhos reduzidos ou praticamente nulos em diversos cenários. Esse comportamento sugere que a eficácia do roteamento dinâmico depende fortemente das características estruturais e topológicas da rede analisada.

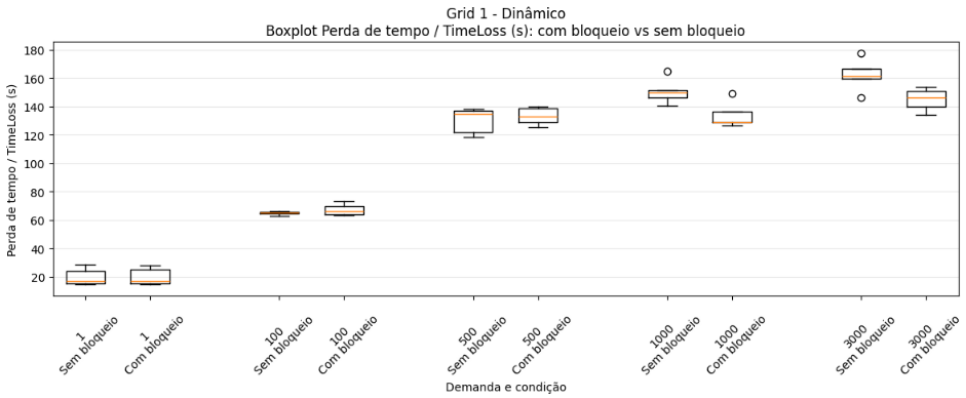
5.5 Comparação: com bloqueio versus sem bloqueio

De forma contraintuitiva, a introdução de bloqueios, combinada com

roteamento dinâmico, em alguns casos, pode melhorar o desempenho global da rede. Esse resultado indica que a remoção de determinadas rotas pode evitar escolhas subótimas que levam à sobrecarga do sistema.

A figura 22 mostra a variação na métrica “Perda de tempo” nos cenários estático e dinâmico nas simulações efetuadas na rede GRID1.

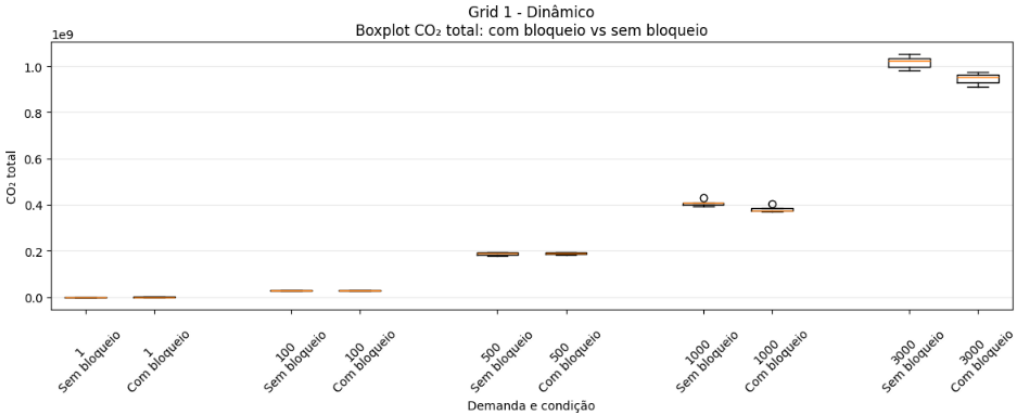
Figura 22 – Variação na métrica “Perda de tempo” no cenário dinâmico no Grid 1.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

A figura 23 mostra a variação na métrica “Emissão de CO2” nos cenários estático e dinâmico nas simulações efetuadas na rede GRID1.

Figura 23 – Variação na métrica “Emissão de CO2” no cenário dinâmico no Grid 1.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

Esse comportamento está alinhado com estudos sobre organização do tráfego e eficiência sistêmica (Nagurney, 2000).

A Tabela 3 apresenta o ganho percentual observado nos cenários com

bloqueio em comparação aos cenários sem bloqueio para o roteamento dinâmico.

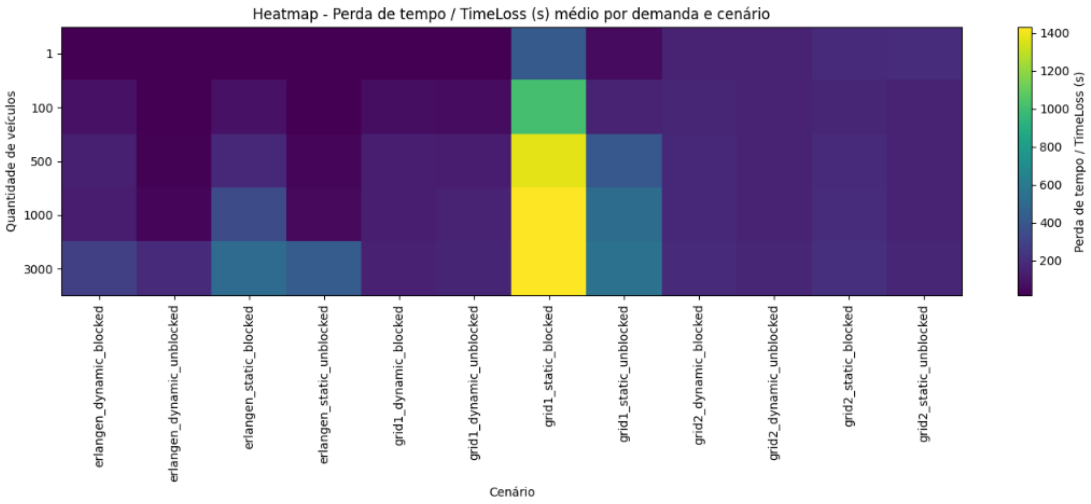
Tabela 3 - Ganho percentual na “Perda de tempo” nos cenários com bloqueio em comparação com cenários sem bloqueio para o roteamento dinâmico.

Rede	**Veículos**	**Com bloqueio**	**Sem bloqueio**	**Ganho com bloqueio (%)**
Erlangen	1	17,26	17,31	0,27
Erlangen	100	84,64	16,64	-408,60
Erlangen	500	140,37	27,07	-418,53
Erlangen	1000	125,99	39,17	-221,67
Erlangen	3000	283,11	190,55	-48,58
Grid 1	1	20,09	19,96	-0,70
Grid 1	100	67,23	64,65	-3,99
Grid 1	500	133,07	129,98	-2,38
Grid 1	1000	133,91	150,52	11,03
Grid 1	3000	145,03	162,13	10,55
Grid 2	1	155,39	159,34	2,48
Grid 2	100	170,54	155,01	-10,02
Grid 2	500	177,49	156,39	-13,49
Grid 2	1000	180,10	158,73	-13,47
Grid 2	3000	184,51	167,24	-10,33

Em determinados cenários, a introdução de bloqueios resultou em melhoria do desempenho global da rede, indicando reorganização mais eficiente dos fluxos veiculares.

A figura 24 mostra o gráfico de calor da métrica “Perda de tempo” por demanda e cenário.

Figura 24 – Mapa de calor da métrica “Perda de tempo” por demanda e cenário.



Fonte: Captura de tela do Jupyter Lab efetuada pelo autor.

O mapa de calor evidencia concentração dos maiores valores de perda de tempo nos cenários de alta demanda, especialmente sob roteamento estático, reforçando a existência de regimes de saturação e degradação não linear do desempenho.

5.6 Análise do comportamento da rede

Os resultados evidenciam comportamento não linear, presença de gargalos locais e efeitos de saturação. O desempenho global é fortemente influenciado por pontos críticos que limitam o escoamento do fluxo.

A dinâmica observada é típica de sistemas complexos, nos quais o comportamento global emerge da interação entre agentes locais (HELBING, 2001; STERMAN, 2000).

5.7 Interpretação teórica

Os resultados podem ser interpretados à luz do Equilíbrio de Wardrop (WARDROP, 1952) e do Paradoxo de Braess (BRAESS, 2005).

O roteamento dinâmico aproxima o sistema de uma distribuição mais equilibrada (BEN-AKIVA *et al.*, 2012), enquanto o efeito positivo dos bloqueios sugere compatibilidade com o Paradoxo de Braess, no qual a redução de caminhos pode melhorar o desempenho global (Nagurney, 2000).

5.8 Síntese dos resultados

Os resultados confirmam que o comportamento do tráfego é não linear e dependente da interação entre agentes. O roteamento dinâmico melhora o desempenho, e, de forma contraintuitiva, a restrição de caminhos pode aumentar a eficiência do sistema, comportamento compatível com a literatura (HELBING, 2001; BRAESS, 2005).

A Tabela 4 apresenta uma síntese quantitativa dos principais resultados observados nos experimentos, destacando os cenários de maior ganho operacional obtidos com o roteamento dinâmico e com a introdução de bloqueios controlados na rede.

Tabela 4 - Síntese

Análise	**Rede**	**Demanda**	**Métrica**	**Resultado (%)**
Maior ganho do roteamento dinâmico	Grid 1	1000	Perda de tempo	70,744
Pior desempenho relativo do roteamento dinâmico	Erlangen	100	Perda de tempo	-0,36
Maior ganho com bloqueio no roteamento dinâmico	Grid 1	1000	Perda de tempo	11,03
Pior efeito do bloqueio no roteamento dinâmico	Erlangen	500	Perda de tempo	-418,53

Observa-se que os maiores ganhos ocorreram em cenários de demanda intermediária, nos quais o roteamento dinâmico ainda consegue redistribuir eficientemente os fluxos da rede. Em contrapartida, nos cenários de alta saturação, os benefícios tornam-se progressivamente menores, indicando limitação estrutural da capacidade viária.

6. CONCLUSÃO

6.1 Atendimento aos objetivos

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de simulações

computacionais em malhas viárias sintéticas, como o aumento progressivo da demanda e o uso de roteamento dinâmico influenciam o desempenho do sistema viário urbano.

Os resultados obtidos permitem afirmar que o objetivo geral foi atingido, uma vez que foi possível observar, de forma sistemática, o comportamento das redes simuladas sob diferentes níveis de demanda, bem como analisar o impacto de estratégias de roteamento e intervenções estruturais no desempenho global do sistema.

Da mesma forma, os objetivos específicos foram atendidos. As redes sintéticas foram modeladas e simuladas com sucesso no ambiente SUMO, possibilitando o controle dos fluxos e a análise progressiva do aumento da demanda. Foram identificados gargalos estruturais nas redes, observada a transição entre regimes de fluxo livre e congestionado, e comparados cenários com diferentes estratégias operacionais.

Os resultados obtidos reforçam o potencial da simulação computacional como ferramenta de apoio à compreensão do comportamento sistêmico do tráfego urbano, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de mobilidade mais eficientes, adaptativas e baseadas em evidências.

6.2 Principais achados

Os resultados demonstraram que o comportamento do sistema viário não segue uma relação linear com o aumento da demanda. Observou-se a existência de pontos de ruptura, nos quais pequenos acréscimos no volume de veículos resultam em degradação significativa do desempenho, caracterizando a transição para estados de saturação, comportamento consistente com a literatura de sistemas complexos aplicados ao tráfego (HELBING, 2001; STERMAN, 2000).

A aplicação do roteamento dinâmico mostrou-se eficaz na mitigação de congestionamentos, especialmente em cenários de demanda moderada, ao promover a redistribuição dos fluxos e reduzir a sobrecarga em trechos críticos (BEN-AKIVA *et al*., 2012).

O principal achado do trabalho, entretanto, está relacionado aos cenários com bloqueio. De forma contraintuitiva, verificou-se que a restrição de determinadas vias, quando combinada com o roteamento dinâmico, pode resultar em melhoria significativa dos indicadores de desempenho. Esse resultado apresenta comportamento compatível com o fenômeno descrito no Paradoxo de Braess, no qual a redução de caminhos disponíveis pode levar a ganhos sistêmicos (BRAESS, 2005; NAGURNEY, 2000).

6.3 Contribuições do trabalho

Este trabalho contribui para a área de mobilidade urbana sob três perspectivas principais.

Do ponto de vista científico, reforça a compreensão do tráfego urbano como um sistema complexo, caracterizado por comportamento emergente, não linear e altamente dependente da interação entre agentes (HELBING, 2001).

Do ponto de vista metodológico, propõe o uso de redes sintéticas como ferramenta para análise de padrões estruturais do comportamento do tráfego, alinhando-se a abordagens amplamente utilizadas em simulação de sistemas urbanos (KRAJZEWICZ *et al*., 2012). O trabalho também contribui ao estruturar um fluxo replicável de simulação, extração, consolidação e análise de dados, com apoio de ferramentas abertas como SUMO, Python e Jupyter Lab.

A metodologia proposta também contribui ao integrar modelagem, execução automatizada dos experimentos, consolidação de métricas e geração de análises quantitativas em um fluxo estruturado e reprodutível, permitindo a replicação dos cenários e adaptação da abordagem para diferentes contextos urbanos.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que intervenções estruturais, como bloqueios de vias, quando combinadas com estratégias de roteamento adequadas, podem contribuir para a melhoria do desempenho do sistema, oferecendo subsídios para o planejamento urbano e a gestão da mobilidade (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

6.4 Limitações do estudo

Apesar dos resultados obtidos, este estudo apresenta limitações que devem

ser consideradas.

As simulações foram realizadas majoritariamente em redes sintéticas, que, embora permitam controle experimental e identificação de padrões, não capturam integralmente a complexidade de sistemas reais (Rodrigue *et al*., 2020). Além disso, o modelo adotado não incorpora fatores como comportamento heterogêneo dos motoristas, variações temporais da demanda e eventos externos. Para incorporar diferentes comportamentos, podemos configurar veículos com comportamentos diferentes entre si, simulando comportamentos diferentes dos motoristas.

Outra limitação relevante é a ausência de controle em tempo real por meio de integração com ferramentas como TRACI, o que restringe a aplicação de estratégias mais avançadas de gerenciamento adaptativo (BEN-AKIVA *et al*., 2012).

Além disso, os resultados observados dependem das características específicas das topologias analisadas, não sendo possível generalizar diretamente os ganhos obtidos para qualquer configuração de rede urbana.

6.5 Trabalhos futuros

Como continuidade desta pesquisa, sugere-se a ampliação do modelo para cenários mais próximos da realidade, incluindo redes urbanas completas e dados reais de demanda.

Como trabalho futuro, recomenda-se a realização de estudos de ablação, nos quais diferentes componentes do experimento sejam isolados e avaliados separadamente. No caso dos bloqueios viários, essa abordagem poderia envolver a seleção sistemática de vias com diferentes níveis de importância funcional na rede, considerando métricas como centralidade, conectividade, volume de fluxo e posição topológica. A comparação entre cenários equivalentes, alterando apenas a localização do bloqueio, permitiria quantificar de forma mais precisa o impacto individual dessa variável sobre o desempenho global do sistema.

A utilização de ferramentas de controle em tempo real pode permitir a implementação de estratégias mais sofisticadas de roteamento adaptativo e gestão do tráfego, ampliando a capacidade de resposta do sistema a condições dinâmicas (PEETA; ZILIASKOPOULOS, 2001).

Além disso, futuras investigações podem explorar o impacto de políticas públicas específicas, como restrições de velocidade, alterações de infraestrutura e integração com transporte público, bem como a aplicação de técnicas de inteligência artificial para otimização do fluxo veicular.

7. REFERÊNCIAS

STERMAN, J. D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

BATTY, M. Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge: MIT Press, 2005.

BATTY, M. *et al*. Smart cities of the future. European Physical Journal Special Topics, v. 214, n. 1, p. 481-518, 2012.

HELBING, D. Traffic and related self-driven many-particle systems. Reviews of Modern Physics, v. 73, n. 4, p. 1067–1141, 2001.

RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. The geography of transport systems. 5. ed. New York: Routledge, 2020.

BRASIL. Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN). Frota de veículos 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran> . Acesso em: jun/2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Projeção da população 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html> . Acesso em: jun/2025

SUMO DOCUMENTATION. SUMO User Documentation. Disponível em: <https://sumo.dlr.de/docs/>. Acesso em: jun. 2025.

ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. *Modelling transport*. 4. ed. Chichester: Wiley, 2011.

BARCELÓ, J. (ed.). *Fundamentals of traffic simulation*. New York: Springer, 2010.

LAW, A. M. *Simulation modeling and analysis*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

XIE, F.; LEVINSON, D. *Measuring the structure of road networks*. Geographical Analysis, v. 39, n. 3, p. 336–356, 2007.

KRAJZEWICZ, D. *et al*. *Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility*. International Journal On Advances in Systems and Measurements, v. 5, n. 3-4, p. 128–138, 2012.

KESTING, A.; TREIBER, M.; HELBING, D. Agents for traffic simulation. In: KLÜGL, F. *et al*. (ed.). *Multi-agent systems: simulation and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 325–356.

ZHOU, M.; TAYLOR, M. A. P.; HOLGUÍN-VERAS, J. Saturation flow and access management in urban grid networks: experimental insights from island-based modeling. Journal of Advanced Transportation, v. 2019, p. 1-12, 2019.

BEN-AKIVA, M. *et al*. *Dynamic traffic assignment: a primer*. In: RAN, B.; BOYCE, D. (ed.). *Dynamic urban transportation network models*. Berlin: Springer, 2012.

PEETA, S.; ZILIASKOPOULOS, A. K. Foundations of dynamic traffic assignment: the past, the present and the future. *Networks and Spatial Economics*, v. 1, n. 3-4, p. 233–265, 2001.

BRAESS, D. On a paradox of traffic planning. Transportation Science, v. 39, n. 4, p. 446–450, 2005.

NAGURNEY, A. *Congested urban transportation networks and emission paradoxes*. Northampton: Edward Elgar Publishing, 2000.

YOUN, H.; GASTNER, M. T.; JEONG, H. Price of anarchy in transportation networks: efficiency and optimality control. *Physical Review Letters*, v. 101, n. 12, p. 128701, 2008.

DAGANZO, C. F. *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Oxford: Pergamon, 1997.

BEHRISCH, M. *et al*. SUMO – Simulation of Urban MObility: an overview. In: *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. Barcelona: IARIA, 2011. p. 63–68.

WARDROP, J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 1, n. 3, p. 325–378, 1952.

TREIBER, M.; KESTING, A. Traffic flow dynamics: data, models and simulation. Berlin: Springer, 2013.