

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Loredana Romano Devico

**Análise e Simulação de Tráfego Urbano com  
Dados Municipais: Um Estudo de Caso na  
Região Central de Uberlândia**

**Uberlândia, Brasil**

**2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Loredana Romano Devico

**Análise e Simulação de Tráfego Urbano com Dados Municipais: Um Estudo de Caso na Região Central de Uberlândia**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Professor Doutor Leandro Nogueira Couto

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Uberlândia, Brasil

2025

Loredana Romano Devico

## **Análise e Simulação de Tráfego Urbano com Dados Municipais: Um Estudo de Caso na Região Central de Uberlândia**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção título de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 25 de setembro de 2025:

---

**Professor Doutor Leandro Nogueira  
Couto  
Orientador**

---

**Professora Doutora Fernanda Maria  
da Cunha Santos**

---

**Professor Doutor Renato Aparecido  
Pimentel da Silva**

Uberlândia, Brasil  
2025

*A jornada acadêmica pode ser solitária, mas se transforma com a presença de quem amamos. Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos, que me fizeram nunca me sentir só neste processo. E, parafraseando o poeta Fernando Pessoa, dedico este trabalho ao que fui para chegar ao que sou, sabendo que vocês são a força e o amor que me impulsionam em direção ao que serei a partir de agora.*

# Agradecimentos

Agradeço meus pais, minha mamãe Elina e meu papai Luiz, que me deram a primeira e mais importante lição: a do amor incondicional. Vocês que guiaram meus passos e abriraram o caminho sob o sol para que eu pudesse caminhar na sombra, sempre reforçando que todas as outras portas seriam abertas pela educação e pela minha própria determinação. À Katia e à Bia, por me acolherem com tanto afeto. Ao Marcelo, por me receber e me tratar com genuíno carinho.

Ao meu irmão, meu primeiro amigo, confidente e parceiro de vida. Você é minha mais sólida referência de amizade. Obrigado por me ensinar sobre persistência, por me acompanhar e por me mostrar, além de muitos jogos e vídeos engraçados, que o amor fraternal é um dos maiores presentes da vida.

À vovó Afra (in memoriam), minha primeira referência de professora e mestre no sudoku. À Bete, que considero uma segunda mãe, e à Tia Elô, pelo apoio constante e presença, mesmo que distante. Às minhas gatas, Didi, Thea e Luna, que já se foram, mas que sempre serão parte da família também.

Aos meus amigos que se tornaram família, sendo alicerce e alegria em todas as etapas da minha trajetória. Aos amigos de longa data do Colégio Adventista, em especial à Nathalia, minha irmã de outra mãe. Aos amigos do IF, destacadamente Mateus, Joviane e Jaltair, que me alegram com suas presenças há quase dez anos. Aos meus companheiros de Overwatch, em especial ao André, Ayrton, Heitor, Kauã e Vínius, por quase uma década de amizade virtual que transcendeu telas. Ao meu namorado, Henrique, que surgiu no meio da minha jornada e se tornou uma companhia indispensável na minha vida, e ao nosso círculo de amizades, por fazerem parte do meu presente e me oferecerem um futuro repleto de leveza.

À UFU e ao IF, por me proporcionarem a oportunidade de crescer e descobrir novos horizontes. Em especial, ao meu orientador, Professor Leandro Nogueira Couto, por sua paciência, sabedoria e excelência durante todo este processo. A ele, minha eterna gratidão.

A todos os professores que, com paixão pelo ensino, me conduziram por caminhos desconhecidos, revelando-me a beleza do conhecimento. Especialmente aos meus amigos professores Robson e Gabriel, por me explicarem que a programação, apesar de ser um mergulho no desconhecido, se revela um universo de possibilidades infinitas.

Por fim, a todos os encontros momentâneos que cruzaram meu caminho, trazendo ensinamentos, sorrisos e presença. Cada um de vocês, de alguma forma, contribuiu para

que eu chegasse até aqui.

Este trabalho não é apenas meu, é nosso. Ele carrega um pouco de cada pessoa que acreditou em mim quando eu mesma duvidei, que me estendeu a mão quando tropecei e que celebrou comigo cada pequena vitória. Agradeço a todos que transformaram este caminho árduo em algo mais leve e significativo. Se hoje posso dizer que cheguei ao fim desta jornada, é porque nunca caminhei sozinha.

*“It is good to have an end to journey toward;  
But it is the journey that matters, in the end.”*

— Ernest Hemingway

# Resumo

O crescimento da frota veicular em Uberlândia tem intensificado o congestionamento urbano na região central. Para diagnosticar este problema e o efeito de propagação do trânsito, este trabalho desenvolve uma metodologia integrada de análise e simulação do tráfego urbano utilizando dados reais do Departamento de Trânsito Municipal. A abordagem combina análise exploratória, Teoria das Filas (Lei de Little), Cadeias de Markov e simulação Monte Carlo de rede viária. Os resultados da análise de 12 cruzamentos revelaram saturação do sistema em 41,7% do tempo durante dias úteis, com alta persistência do congestionamento. Concomitantemente, a simulação validou os gargalos identificados e seus impactos sobre os cruzamentos adjacentes, demonstrando que, embora a rotatividade de veículos seja fator dominante na eficiência operacional, a capacidade física das vias representa o limitante estrutural do sistema. Como contribuição prática, a metodologia oferece ferramenta diagnóstica acessível para cidades médias brasileiras, fornecendo base técnica para decisões de investimento em mobilidade urbana.

**Palavras-chave:** Simulação de Tráfego; Processos Estocásticos; Teoria das Filas; Cadeias de Markov; Mobilidade Urbana.

# Abstract

The growth of the vehicle fleet in Uberlândia has intensified urban congestion in the city's central region. To diagnose this problem and the resulting traffic propagation effect, this work develops an integrated methodology for urban traffic analysis and simulation using real data from the Municipal Transit Department. The approach combines exploratory analysis, Queuing Theory (Little's Law), Markov Chains, and Monte Carlo simulation of a road network. The results from analyzing 12 intersections revealed system saturation 41.7% of the time during weekdays, with high congestion persistence. Concomitantly, the simulation validated the identified bottlenecks and their impacts on adjacent intersections, demonstrating that, although vehicle turnover (exit rate) is the dominant factor in operational efficiency, the physical capacity of the roadways represents the system's structural constraint. As a practical contribution, the methodology offers an accessible diagnostic tool for medium-sized Brazilian cities, providing a technical basis for urban mobility investment decisions.

**Keywords:** Traffic Simulation; Stochastic Processes; Queuing Theory; Markov Chains; Urban Mobility.

# **Lista de ilustrações**

Figura 1 – Aumento da Frota Veicular e Variação da Taxa de Crescimento Anual em Uberlândia (2001-2024) . . . . .	15
Figura 2 – Interface principal do sistema de monitoramento de tráfego da Prefeitura de Uberlândia, que mostra intensidade do fluxo veicular por cores em vias de parte dos bairros Centro, Nossa Sra. Aparecida e Saraiva. . . . .	27
Figura 3 – Interface secundária do sistema de monitoramento de tráfego da Prefeitura de Uberlândia, focada em uma área da região central da cidade, que mostra valores atualizados de veículos previstos por hora e sentido de fluxo, medidos em sensores de contagem. . . . .	28
Figura 4 – Exemplo da divisão de padrões de temporizadores de semáforos aplicados em um dia, alterados por medição do fluxo veicular por minuto e horário local no sistema de monitoramento. . . . .	29
Figura 5 – Arquitetura em grafo da rede viária implementada, baseada na topologia real do sistema de monitoramento municipal. . . . .	36
Figura 6 – Fluxo Médio por Hora . . . . .	40
Figura 7 – Fluxo Médio por Cruzamento . . . . .	40
Figura 8 – Fluxo Médio de Veículos por Horário de Dia . . . . .	41
Figura 9 – Fluxo Horário (Dias Úteis) . . . . .	41
Figura 10 – Comparação Média: Dias Úteis vs Final de Semana . . . . .	42
Figura 11 – Comparação: Dias Úteis vs Final de Semana (Por Cruzamento) . . . . .	42
Figura 12 – Mapa de Calor (Segunda-feira) . . . . .	43
Figura 13 – Mapa de Calor (Sexta-feira) . . . . .	44
Figura 14 – Mapa de Calor (Sábado) . . . . .	45
Figura 15 – Mapa de Calor (Média dos Dias Úteis) . . . . .	46
Figura 16 – Distribuição de Horários de Pico . . . . .	47
Figura 17 – Razão da Variação Pico/Vale . . . . .	48
Figura 18 – Taxa de Chegada vs Capacidade . . . . .	49
Figura 19 – Eficiência vs Demanda . . . . .	49
Figura 20 – Nível de Serviço por Horário . . . . .	50
Figura 21 – Proporção de Horários Congestionados . . . . .	50
Figura 22 – Taxa de Chegada vs Capacidade (Final de Semana) . . . . .	51
Figura 23 – Eficiência vs Demanda (Final de Semana) . . . . .	51
Figura 24 – Nível de Serviço por Horário (Final de Semana) . . . . .	52
Figura 25 – Proporção de Horários Congestionados (Final de Semana) . . . . .	52
Figura 26 – Matriz de Probabilidade de Transição . . . . .	53
Figura 27 – Evolução dos Estados da Cadeia de Markov em 168 Passos . . . . .	54

Figura 28 – Distribuição dos Estados da Simulação . . . . .	54
Figura 29 – Comparação entre Real e Modelada . . . . .	55
Figura 30 – Evolução do tamanho da fila no cruzamento crítico isolado. . . . .	56
Figura 31 – Chegadas, saídas e rejeições por hora no cruzamento isolado. . . . .	57
Figura 32 – Análise da distribuição do fluxo no cruzamento crítico isolado. . . . .	57
Figura 33 – Evolução do Tráfego nos Experimentos 1 e 2 . . . . .	59
Figura 34 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 1 . . . . .	60
Figura 35 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 2 . . . . .	60
Figura 36 – Comparação da distribuição do congestionamento (Experimentos 1 e 2) .	61
Figura 37 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 1 . . . . .	61
Figura 38 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 2 . . . . .	62
Figura 39 – Comparação de Volume por Cruzamento entre os Experimentos 1 e 2. .	63
Figura 40 – Evolução do Tráfego nos Experimentos 3 e 4. . . . .	63
Figura 41 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 3 . . . . .	64
Figura 42 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 4 . . . . .	64
Figura 43 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 3 . . . . .	65
Figura 44 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 4 . . . . .	65
Figura 45 – Comparação da distribuição do congestionamento (Experimentos 3 e 4). .	66
Figura 46 – Comparação de Volume por Cruzamento entre os Experimentos 3 e 4. .	67
Figura 47 – Evolução do Tráfego nos Experimentos 2 e 5. . . . .	67
Figura 48 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Exp. 2 (Fila 120) . . . . .	68
Figura 49 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Exp. 5 (Fila 60) . . . . .	68
Figura 50 – Comparação da distribuição do congestionamento (Experimentos 2 e 5). .	69
Figura 51 – Comparação de Volume por Cruzamento entre os Experimentos 2 e 5. .	69
Figura 52 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 2 (Fila 120) . . . . .	70
Figura 53 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 5 (Fila 60). . . . .	70
Figura 54 – Mapa de Calor - Domingo . . . . .	82
Figura 55 – Mapa de Calor - Terça-feira . . . . .	83
Figura 56 – Mapa de Calor - Quarta-feira . . . . .	84
Figura 57 – Mapa de Calor - Quinta-feira . . . . .	85

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Trecho de dados horários da contagem de veículos para o cruzamento entre a Avenida Afonso Pena e a Rua Silviano Brandão (Sentido Norte) do arquivo utilizado no trabalho. . . . .	30
Tabela 2 – Configurações dos experimentos realizados na simulação da rede viária.	55
Tabela 3 – Comparação de performance entre todos os experimentos realizados. .	56

# Listas de símbolos

$\lambda$	Letra grega minúscula lambda
$\mu$	Letra grega minúscula mu
<b>P</b>	Letra P em negrito, usada para a matriz de transição
$P_{ij}$	Elemento da matriz de transição P, probabilidade de transição do estado i para o estado j
$\pi$	Letra grega pi em negrito, usada para a distribuição de estado estacionário
$\pi_j$	Elemento da distribuição de estado estacionário pi, probabilidade de estar no estado j
$L$	Número médio de entidades no sistema
$W$	Tempo médio que cada entidade gasta no sistema
$\in$	Pertence

# Sumário

<b>Lista de ilustrações</b>	9
<b>Lista de tabelas</b>	10
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1 Motivação</b>	15
<b>1.2 Objetivo Geral</b>	16
<b>1.3 Objetivos Específicos</b>	16
<b>1.4 Organização do Documento</b>	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	19
<b>2.1 Simulação, Tráfego Urbano e Seus Modelos</b>	20
<b>2.2 Teoria das Filas e a Lei de Little</b>	21
<b>2.3 Grafos, Processos Estocásticos e Redes de Filas</b>	22
<b>2.4 Trabalhos Correlatos</b>	24
2.4.1 Sistemas de Sensoriamento e Coleta de Dados	24
2.4.2 Algoritmos de Otimização e Controle Inteligente	25
2.4.3 Simulação e Modelagem de Redes de Tráfego	25
2.4.4 Lacunas Identificadas e Posicionamento da Pesquisa	26
<b>3 METODOLOGIA</b>	27
<b>3.1 Sistema de Monitoramento de Tráfego</b>	27
<b>3.2 Processo de Coleta e Pré-processamento de Dados</b>	29
3.2.1 Tratamento de Dados Ausentes	30
<b>3.3 Tecnologias e Metodologia de Desenvolvimento</b>	31
3.3.1 Tecnologias Utilizadas	31
<b>3.4 Arquitetura do Sistema</b>	32
<b>3.5 Análise e Diagnóstico</b>	32
3.5.1 Carregamento de Dados	32
3.5.2 Calibração de Parâmetros e Fator de Hora de Pico	33
3.5.3 Análise de Fila com Lei de Little	34
3.5.4 Análise Probabilística com Cadeia de Markov	35
3.5.5 Visualizações Geradas pelo Módulo	35
<b>3.6 Metodologia da Simulação de Rede Viária</b>	36
3.6.1 Arquitetura da Representação em Grafo	36
3.6.2 Parâmetros Variáveis e Constantes	37

3.6.3	Lógica da Simulação e Metodologia Experimental . . . . .	37
3.6.4	Calibração e Análise de Dados . . . . .	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados do Módulo 1: Análise e Diagnóstico . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1.1	Análise do fluxo por cruzamento e por período . . . . .	39
4.1.1.1	Análise de Horários de Pico . . . . .	46
4.1.2	Análise com Teoria de Filas . . . . .	48
4.1.2.1	Análise Teórica de Congestionamento nos Dias Úteis (Lei de Little) . . . . .	48
4.1.2.2	Análise Teórica de Congestionamento nos Finais de Semana (Lei de Little) . . . . .	51
4.1.3	Análise Preditiva e de Longo Prazo Utilizando Cadeia de Markov . . . . .	52
<b>4.2</b>	<b>Resultados do Módulo 2: Simulação da Rede Viária . . . . .</b>	<b>55</b>
4.2.1	Metodologia e Configuração dos Experimentos . . . . .	55
4.2.2	Experimento 0: Validação do Gargalo Crítico . . . . .	56
4.2.3	Comparativo 1: O Impacto da Taxa de Saída (Exp. 1 vs. Exp. 2) . . . . .	58
4.2.4	Comparativo 2: O Impacto do Padrão de Distribuição (Exp. 3 vs. Exp. 4) . . . . .	63
4.2.5	Comparativo 3: O Impacto da Capacidade Física (Exp. 2 vs. Exp. 5) . . . . .	67
4.2.6	Avaliação dos Experimentos . . . . .	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Principais Contribuições . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>5.2</b>	<b>Diagnóstico da Rede Viária Central . . . . .</b>	<b>72</b>
5.2.1	Identificação de Gargalos Críticos . . . . .	73
<b>5.3</b>	<b>Limitações Identificadas e Validação dos Resultados . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>5.4</b>	<b>Trabalhos Futuros e Aplicações Práticas . . . . .</b>	<b>74</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE A – MAPAS DE CALOR COMPLETOS POR DIA DA SEMANA . . . . .</b>	<b>81</b>

# 1 Introdução

O crescimento acelerado das cidades (EL-SAID, 2025) e o aumento constante do número de veículos (CHAMARELLI, 2020) têm-se tornado grandes desafios para a mobilidade urbana. Esta, em particular, tornou-se ponto central de atenção de gestores públicos, planejadores e da população em geral, à medida que os congestionamentos se tornam mais frequentes e seus impactos afetam a qualidade de vida e a esfera econômica (PERDICHIZZI, 2022).

No contexto local, a cidade de Uberlândia-MG, que registrou em setembro de 2024 uma frota total de 532.938 veículos, e que apresenta um crescimento contínuo desde 2005<sup>1</sup>, também enfrenta este desafio. A análise histórica da frota automotiva do município, conforme dados da prefeitura, revela um crescimento persistente, mesmo com variações percentuais anuais. Essa crescente frota, portanto, exerce pressão sobre a infraestrutura viária existente, tornando a capacidade de compreender, prever e gerenciar o fluxo de veículos nas redes urbanas um diferencial para o desenvolvimento e a sustentabilidade da cidade.

Com isso, a aplicação de ferramentas tecnológicas para a gestão inteligente do tráfego, como a modelagem e simulação, surge como uma aliada essencial (PERDICHIZZI, 2022). Tais abordagens superam a observação puramente empírica e se afastam da dependência das intervenções reativas, oferecendo um ambiente controlado para o estudo das interações entre veículos, infraestrutura e sistemas de controle. Ao simular o comportamento do tráfego sob diferentes condições, é possível não só diagnosticar problemas atuais, mas também explorar cenários futuros e validar a eficácia de soluções propostas antes de sua implementação prática.

Considerando essa situação, o presente trabalho se insere na perspectiva de contribuir com o enfrentamento deste problema, propondo o desenvolvimento e a aplicação de modelos computacionais para a análise do tráfego urbano, como teoria de filas, teoria de grafos e redes de filas. A pesquisa se concentra na rede viária central da cidade de Uberlândia-MG, um estudo de caso significativo, dado seu contínuo crescimento veicular. Por meio da integração de dados reais do trânsito e técnicas de simulação, o trabalho visa contribuir com uma melhor compreensão da dinâmica do congestionamento local, fornecendo subsídios para futuras tomadas de decisão que busquem aprimorar a mobilidade urbana da cidade.

---

<sup>1</sup> Dados sobre a frota veicular e seu crescimento contínuo foram obtidos com a Prefeitura Municipal de Uberlândia, da Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SETTRAN), em novembro de 2024.

## 1.1 Motivação

A piora do trânsito é um problema crônico e crescente em todas as cidades em expansão - e em Uberlândia isso se tornou visível nos últimos anos, tornando-se o motivo principal para o interesse no presente estudo. O impacto do congestionamento e suas consequências diretas em tempo real na rotina da cidade, como filas e paralisações frequentes, foi fundamental para a elaboração deste trabalho, juntamente com os dados cedidos pelo Departamento de Trânsito de Uberlândia, que reafirmaram o aumento na frota veicular, como visto abaixo<sup>2</sup>:

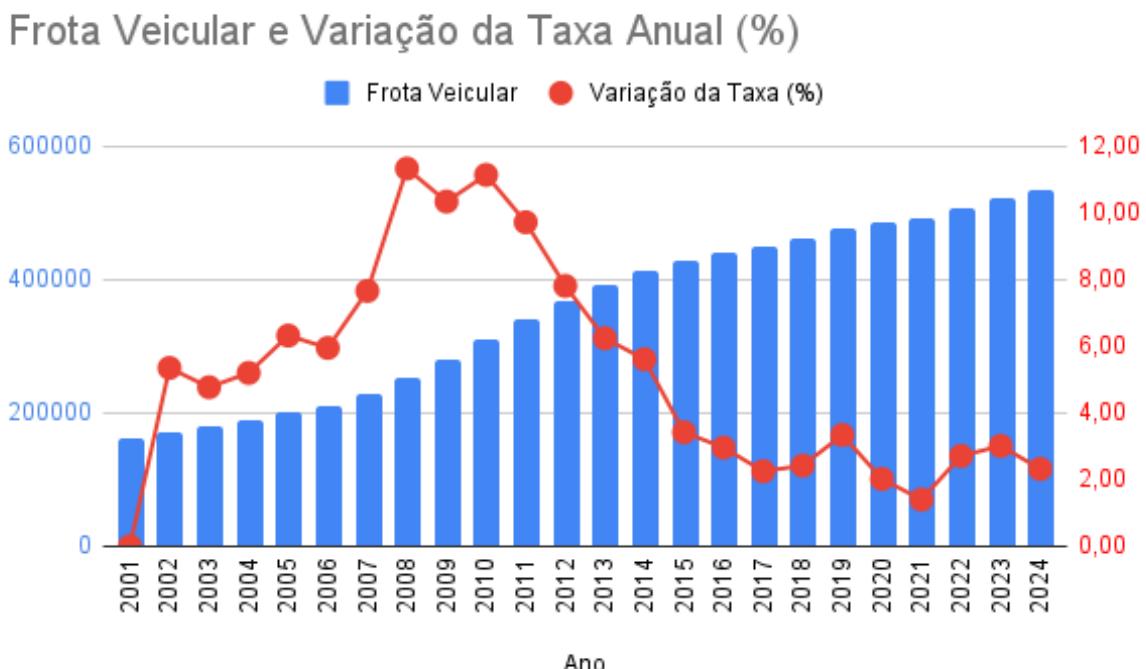


Figura 1 – Aumento da Frota Veicular e Variação da Taxa de Crescimento Anual em Uberlândia (2001-2024)

A análise dos dados revela um crescimento total de 229,3% da frota veicular entre 2001 e 2024, passando de 161.842 para 532.938 veículos. Este crescimento apresentou dois segmentos distintos: uma primeira fase de expansão acelerada, com taxa média anual de 7,8% entre 2001-2015, seguida por um período de estabilização com crescimento médio de 2,7% anual. Mesmo neste intervalo de aparente estabilização, observa-se uma recuperação entre 2021 e 2022, quando a taxa saltou de 1,40% para 2,71% - um aumento de quase 100% na velocidade de crescimento, embora ainda abaixo das médias históricas.

A própria [Prefeitura de Uberlândia \(2022\)](#) reconhece o crescimento, tendo caracterizado como "exponencial" o período 2021-2022, destacando que Uberlândia "tem a

<sup>2</sup> Dados sobre a frota veicular e seu crescimento contínuo foram obtidos com a Prefeitura Municipal de Uberlândia, da Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SETTRAN), em novembro de 2024.

segunda maior frota de Minas Gerais, com mais de 500 mil veículos". Contudo, fica evidente a necessidade de investimentos de grande porte na infraestrutura atual frente ao crescimento da demanda. Em 2024, o município foi pré-selecionado no programa federal "Avançar Cidades – Mobilidade Urbana" com projeto orçado em mais de R\$ 400 milhões, contemplando 130 quilômetros de pavimentação e mais de 1 milhão de metros quadrados de recapeamento ([PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2025](#)), o que reflete o reconhecimento do gargalo infraestrutural enfrentado pelo município.

Contudo, apesar dos investimentos significativos realizados entre 2021 e 2022 - incluindo viadutos, elevados e pavimentação -, estas intervenções não contemplaram a região central, objeto deste estudo, concentrando-se predominantemente em áreas periféricas e conexões entre setores. Consequentemente, esta área concentra uma demanda crescente em infraestrutura dimensionada para volumes de tráfego significativamente menores, criando um descompasso entre oferta e demanda.

Este cenário evidencia uma lacuna importante: embora recursos substanciais sejam destinados à expansão física da infraestrutura, há carência de ferramentas e diagnósticos que identifiquem gargalos e orientem investimentos de forma mais estratégica e eficiente. A ausência de análises quantitativas precisas pode resultar em investimentos que não abordam os pontos críticos da rede viária.

É dessa junção entre a experiência diária dos problemas de trânsito em Uberlândia e a necessidade de uma base técnica para encontrar soluções que surge a motivação deste trabalho. O objetivo é apresentar uma análise estatística dos dados históricos do município com simulação computacional utilizando Monte Carlo, permitindo identificar gargalos e quantificar os problemas de saturação na rede viária central de maneira a oferecer subsídios para a priorização de investimentos futuros e aprimoramento da mobilidade urbana no município.

## 1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho visa analisar o tráfego urbano atual de Uberlândia, utilizando uma metodologia de identificação e quantificação de gargalos de congestionamento na região central da cidade. Utilizando dados históricos do tráfego e a simulação de uma rede viária urbana, o intuito é identificar padrões de fluxo, prever cenários de congestionamento em cascata e avaliar o desempenho da mobilidade em áreas críticas.

## 1.3 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, o projeto compreendeu os seguintes objetivos específicos:

1. Implementação de um módulo de análise de dados que utiliza uma base de dados reais de contagem veicular para, por meio da análise exploratória de dados, diagnosticar as condições de tráfego, identificando horários de pico e cruzamentos críticos.
2. Aplicação da Teoria de Filas e Lei de Little para estimar tempos de espera, tamanhos de fila em cruzamentos e sinalizar períodos de saturação.
3. Construção de um modelo de Cadeia de Markov para prever a evolução probabilística dos estados de tráfego em cruzamentos específicos ao longo do tempo.
4. Implementar uma simulação de tráfego em rede utilizando um grafo direcionado, que representa os cruzamentos do centro da cidade, permitindo a propagação de filas e congestionamentos de forma dinâmica.
5. Calibração dos parâmetros da simulação com base em dados reais do trânsito de Uberlândia e observações empíricas sobre o comportamento do congestionamento na cidade.
6. Geração de relatórios e visualizações interativas que apresentem os resultados das análises e simulações de forma clara e intuitiva, auxiliando na compreensão dos fenômenos de tráfego.

## 1.4 Organização do Documento

Este documento está estruturado em cinco capítulos, que abordam desde a fundamentação teórica até os resultados e conclusões do trabalho.

1. Capítulo 1: Este capítulo apresenta o contexto do estudo, a motivação por trás do projeto e os objetivos que guiam a pesquisa, além de detalhar a própria organização do documento.
2. Capítulo 2: Aqui, exploram-se os conceitos e as teorias que dão suporte ao projeto, abrangendo desde a simulação de tráfego e a teoria das filas até as cadeias de Markov e a teoria dos grafos.
3. Capítulo 3: o Desenvolvimento do Projeto detalha a metodologia empregada, o processo de coleta e pré-processamento dos dados, a arquitetura dos módulos computacionais desenvolvidos e os algoritmos implementados.
4. Capítulo 4: aqui são apresentados os resultados obtidos a partir das análises e simulações, interpretando os gráficos e dados gerados em relação aos objetivos propostos e ao contexto do tráfego em Uberlândia.

5. Capítulo 5: a Conclusão sintetiza as principais descobertas do trabalho, o cumprimento dos objetivos, discute as limitações e sugere direções para pesquisas futuras.

## 2 Fundamentação Teórica

A análise de sistemas complexos como o trânsito urbano requer, acima de tudo, a representação fiel das interações entre os elementos envolvidos. Para isso, o presente estudo explora um conjunto de ferramentas matemáticas e conceituais que fornecem a base necessária para a modelagem e simulação da dinâmica veicular.

Assim, a compreensão dos diferentes modelos de tráfego é crucial para iniciar a abordagem da complexidade do fluxo veicular e do congestionamento, um fenômeno central no estudo da mobilidade urbana ([SILVA, 1994](#)). A estrutura da rede viária é então formalizada pela Teoria dos Grafos ([SZWARCFITER, 2014](#)), que representa os cruzamentos como nós e as ruas como arestas, muitas vezes direcionadas.

Conectando a estrutura física com o movimento dinâmico, a Teoria das Filas oferece a base para analisar a espera nos cruzamentos, utilizando conceitos como taxa de chegada ( $\lambda$ ), taxa de serviço ( $\mu$ ) e o Teorema da Lei de Little ([PRADO, 2014](#)). Por sua vez, os Processos Estocásticos, particularmente as Cadeias de Markov, são essenciais para modelar a evolução probabilística dos estados do tráfego ao longo do tempo, culminando na análise de padrões de longo prazo, como o Estado Estacionário.

Por isso, essas abordagens combinadas são essenciais para obter indicadores de desempenho, visando futuras melhorias na fluidez do trânsito na área estudada. Em Uberlândia-MG, o tráfego tem se intensificado <sup>1</sup> e, diante disso, a busca por estratégias que otimizem a infraestrutura viária torna-se uma prioridade.

Essa análise se torna ainda mais importante com o crescimento urbano e o aumento constante do número de veículos nas ruas. Esse cenário obriga os órgãos de trânsito a reavaliar e ajustar constantemente os tempos dos semáforos ([GUIDORIZZI et al., 2009](#)), uma vez que gerenciar adequadamente esses tempos para atender ao fluxo dinâmico de veículos é uma das principais dificuldades dos departamentos de trânsito. Isso acontece porque o funcionamento dos semáforos e a interação dos veículos com esses sistemas controlam diretamente a formação e dispersão de filas, sendo fatores determinantes do congestionamento.

Por essa razão, a simulação computacional se torna fundamental para lidar com essa complexidade ([LAW; KELTON, 1982](#)). Este trabalho aplica esses métodos matemáticos em dados reais de tráfego de Uberlândia, buscando gerar informações que contribuem para melhorar a mobilidade urbana da cidade.

---

<sup>1</sup> Dados sobre a frota veicular e seu crescimento contínuo foram obtidos com a Prefeitura Municipal de Uberlândia, da Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SETTRAN), em novembro de 2024.

## 2.1 Simulação, Tráfego Urbano e Seus Modelos

A gestão da mobilidade urbana é um dos principais desafios das cidades modernas. Para enfrentar essa questão, a simulação de tráfego se tornou uma ferramenta fundamental, permitindo compreender, prever e otimizar o fluxo de veículos através da experimentação de diferentes cenários sem custos de implementação física. Como explica [Portugal \(2005\)](#), a simulação reproduz o comportamento do tráfego e suas interações, possibilitando avaliar modificações antes de aplicá-las na prática e identificar melhorias na mobilidade urbana.

Para lidar com a complexidade do tráfego, foram desenvolvidos diferentes tipos de modelos, cada um com seu nível específico de detalhamento. Os modelos macroscópicos tratam o tráfego de forma agregada, como um fluxo contínuo, focando em variáveis como volume (número de veículos que passam por um ponto em determinado tempo) e densidade (quantidade de veículos por unidade de comprimento de via) ([ARIOTTI et al., 2004](#)). Essa abordagem é eficiente para análises de grandes áreas, mas desconsidera o comportamento individual dos motoristas.

No extremo oposto, os modelos microscópicos simulam cada veículo e motorista individualmente, detalhando comportamentos de direção, interações entre veículos e reações aos sinais de tráfego ([ARIOTTI et al., 2004](#)). Embora ofereçam alta precisão, são computacionalmente intensivos para redes extensas. Entre essas duas abordagens, os modelos mesoscópicos oferecem uma solução intermediária, tratando veículos como entidades discretas em situações específicas (como filas), mas utilizando taxas agregadas para chegadas e serviços ([ARAÚJO et al., 2019](#)). Essa estratégia busca equilibrar precisão e eficiência computacional.

Independentemente do modelo utilizado, todos precisam lidar com o fenômeno central dos sistemas viários: o congestionamento. Embora não exista uma definição universal para esse problema ([DOWNS, 2004; BERTINI, 2006](#)), ele se manifesta quando a demanda por deslocamento excede a capacidade de processamento da via, causando redução significativa de velocidade.

O congestionamento pode ser recorrente ou não recorrente, resultado dos padrões diários no trânsito ou por eventos imprevisíveis como acidentes, obras ou eventos especiais. As consequências vão além das filas extensas e do aumento dos tempos de deslocamento, incluindo maior consumo de combustível, aumento da poluição atmosférica e elevação dos níveis de estresse da população.

Para padronizar a análise e o dimensionamento de sistemas viários, o Highway Capacity Manual (HCM) estabelece metodologias amplamente aceitas para avaliar a capacidade e o nível de serviço de diferentes tipos de facilidades de transporte ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)). O manual fornece procedimentos analíticos

que permitem quantificar o desempenho operacional de interseções semaforizadas, constituindo uma referência fundamental para a avaliação de condições de fluxo e determinação de medidas de eficiência.

Quando a complexidade dos sistemas de tráfego torna impraticáveis as soluções analíticas exatas, os métodos de Monte Carlo emergem como uma ferramenta computacional fundamental. Esta classe de algoritmos emprega amostragem aleatória repetida para obter resultados numéricos através da simulação de processos estocásticos ([METROPOLIS; ULAM, 1949](#)). No contexto da engenharia de tráfego, os métodos de Monte Carlo permitem modelar a aleatoriedade inerente às chegadas de veículos, tempos de serviço variáveis e padrões de roteamento, fornecendo estimativas estatísticas robustas para métricas de desempenho de redes viárias complexas ([RUBINSTEIN; KROESE, 2016](#)).

Nesse cenário, os semáforos assumem papel estratégico como pontos de controle que regulam a interseção de múltiplos fluxos de tráfego. Através de ciclos e fases programados, eles controlam o acesso e definem prioridades ([XIAO, 2025](#)), sendo sua gestão eficaz determinante para a fluidez e segurança do sistema viário como um todo.

## 2.2 Teoria das Filas e a Lei de Little

Estudar as filas, ou o ato de esperar, é um pilar da matemática aplicada conhecido como Teoria das Filas, como apresentam [Hillier e Lieberman \(2013\)](#). O foco é analisar sistemas onde entidades, geralmente chamadas de "clientes", aguardam por um "serviço". O objetivo é otimizar esses sistemas, buscando diminuir os tempos de espera ou aumentar o uso dos recursos.

Ao modelar um sistema de filas, considera-se a população de entrada, que é de onde vêm os clientes. A taxa de chegada desses clientes ( $\lambda$ ) representa quantos entram em média por unidade de tempo e é frequentemente modelada por distribuição de Poisson, que considera as chegadas como eventos aleatórios e independentes ao longo do tempo ([MEYER, 2000](#)) e que é dada por:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (2.1)$$

onde:

- $P(X = k)$  é a probabilidade de ocorrerem exatamente  $k$  eventos
- $\lambda$  é a taxa média de chegada (número médio de eventos por unidade de tempo)
- $k$  é o número de eventos ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ )
- $e$  é a base do logaritmo natural ( $e \approx 2,718$ )

A fila possui sua capacidade (máximo de clientes que consegue armazenar) e sua disciplina, que define a ordem de atendimento - por exemplo, "primeiro a chegar, primeiro a ser atendido"(FIFO). O servidor, por sua vez, é a entidade ou recurso que presta o serviço, e sua taxa de serviço ( $\mu$ ) indica quantos clientes ele consegue processar, em média, por unidade de tempo. A relação entre essas taxas é expressa pelo fator de utilização ( $\rho = \lambda/\mu$ ), que representa a proporção da capacidade do servidor que está sendo utilizada e constitui um parâmetro fundamental para a análise do desempenho do sistema.

Nesse cenário, há ainda a relevância do Teorema da Lei de Little, que conecta três métricas importantes em qualquer sistema em estado estacionário - um ponto de equilíbrio onde as taxas de entrada e saída são iguais e as propriedades do sistema não mudam muito com o tempo. Essas métricas são: o número médio de entidades no sistema ( $L$ ), a taxa média de chegada destas ( $\lambda$ ) e o tempo médio que cada uma gasta no sistema ( $W$ ) (ADAN; RESING, 2002).

Essa relação é expressa por uma fórmula simples:

$$L = \lambda \times W$$

Essa fórmula é válida em condições variadas, sem depender da ordem da fila ou de como as chegadas e serviços acontecem. Para sistemas com um único servidor e taxa de serviço constante, o tempo médio no sistema pode ser calculado como:

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

O ponto principal da Lei de Little é que, para um sistema funcionar de forma estável, a taxa de chegada ( $\lambda$ ) precisa ser menor que a taxa de serviço ( $\mu$ ). Ou seja,  $\lambda < \mu$ . Quando a taxa de chegada se iguala ou passa da taxa de serviço ( $\lambda \geq \mu$ ), o sistema entra em colapso.

## 2.3 Grafos, Processos Estocásticos e Redes de Filas

Para entender como sistemas complexos como o tráfego evoluem e se distribuem no espaço urbano, é recomendado o uso de ferramentas que capturem padrões de tempo e de conexão. A Teoria dos Grafos oferece o simbolismo técnico para entender sistemas com partes conectadas (SKALNY, 2014): Uma rede de transporte é modelada como um grafo, que é uma estrutura matemática composta por um conjunto de nós (vértices), que representam os pontos de interesse como cruzamentos, e um conjunto de arestas (ligações), que simbolizam as ruas ou vias entre esses pontos. Formalmente, um grafo é denotado por  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é o conjunto de vértices e  $E$  é o conjunto de arestas.

No contexto do tráfego, frequentemente utilizamos um grafo direcionado (dígrafo), onde cada aresta possui um sentido definido, indicando a direção permitida do fluxo

veicular (HAN et al., 2020). Um dígrafo é formalmente definido como um par ordenado  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é o conjunto de vértices e  $E$  é o conjunto de arcos (ou arestas direcionadas). Se um arco é denotado por  $(u, v)$ , ele representa uma conexão orientada do vértice  $u$  para o vértice  $v$ . Essa abstração permite não apenas a representação topológica da rede urbana, mas também facilita a análise de caminhos e a identificação de rotas críticas. A simulação da propagação do congestionamento, por exemplo, pode ser visualizada como um fenômeno que se move ao longo das arestas do grafo, revelando o comportamento sistêmico do trânsito.

As Cadeias de Markov são um formalismo matemático, parte da teoria de Processos Estocásticos, para descrever sistemas que transitam entre diferentes estados ao longo do tempo. A ideia central de uma cadeia de Markov reside na sua propriedade de falta de memória: a probabilidade de transitar para um estado futuro depende exclusivamente do estado atual do sistema, e não de como ele chegou lá. Matematicamente, a probabilidade de o sistema estar no estado  $j$  no tempo  $t + 1$  dado que estava no estado  $i$  no tempo  $t$  é expressa como  $P(X_{t+1} = j | X_t = i)$ , e essa probabilidade é independente do histórico anterior.

As mudanças entre esses estados são controladas por uma Matriz de Probabilidade de Transição ( $\mathbf{P}$ ). Esta é uma matriz quadrada de ordem  $N \times N$ , onde  $N$  é o número de estados do sistema. Cada elemento  $P_{ij}$  dela representa a probabilidade condicional de o sistema mover-se do estado  $i$  para o estado  $j$  em um único passo de tempo. A soma das probabilidades em cada linha da matriz é sempre igual a 1, refletindo que o sistema transitará para algum estado. A probabilidade de o sistema estar em um estado específico pode ser calculada usando a equação de Chapman-Kolmogorov:

$$P_{ij}^{(k)} = \sum_{l=1}^N P_{il}^{(m)} \cdot P_{lj}^{(k-m)} \quad (2.2)$$

onde  $P_{ij}^{(k)}$  representa a probabilidade de transição do estado  $i$  para o estado  $j$  em  $k$  passos, para  $0 < m < k$ .

Uma aplicação fundamental das Cadeias de Markov é a análise de longo prazo, particularmente através do conceito de Estado Estacionário. A distribuição de estado estacionário ( $\pi$ ), onde  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$ , é um vetor de probabilidades que, uma vez alcançado, permanece constante ao longo do tempo. As probabilidades  $\pi_j$  (componentes de  $\pi$ ) indicam a proporção de tempo que o sistema passará em cada estado  $j$  no longo prazo, independentemente de seu estado inicial. Matematicamente, a distribuição de estado estacionário  $\pi$  é encontrada resolvendo o sistema de equações lineares  $\pi\mathbf{P} = \pi$  sujeito à condição de que a soma de todas as probabilidades  $\pi_j$  seja igual a 1 ( $\sum_{j=1}^N \pi_j = 1$ ).

Desta forma, é possível verificar a propensão de um sistema a se encontrar em um

determinado nível de desempenho em um espaço temporal estendido. Além disso, facilita a análise de caminhos, a checagem de como o congestionamento se espalha e a simulação de como as diferentes partes da rede interagem, revelando o comportamento geral do trânsito e fornecendo um valioso instrumento de previsão.

Uma aplicação particular dessa abordagem integrada entre teoria das filas e processos estocásticos é as Redes Jacksonianas, desenvolvidas por James Jackson ([JACKSON, 1957](#)). Essas redes modelam sistemas compostos por múltiplas filas interconectadas, onde os clientes podem se mover entre diferentes estações de serviço seguindo probabilidades de roteamento específicas ([KELLY, 2011](#)). No contexto do tráfego urbano, cada cruzamento semaforizado pode ser representado como uma estação de serviço, e os veículos transitam pela rede seguindo as rotas disponíveis.

A principal vantagem das redes jacksonianas é que, sob certas condições de estabilidade, cada fila na rede se comporta independentemente como uma fila M/M/1, permitindo a análise de sistemas complexos através da decomposição em componentes mais simples ([WALRAND, 1988](#)). Esta propriedade torna possível calcular métricas de desempenho para toda a rede através da análise individual de cada nó, facilitando significativamente a modelagem de sistemas de tráfego com múltiplas interseções.

## 2.4 Trabalhos Correlatos

A modelagem e a simulação de tráfego urbano têm sido amplamente estudadas com diferentes abordagens metodológicas, desde sistemas de sensoriamento inteligente até algoritmos de otimização em tempo real. Esta seção apresenta os principais trabalhos relacionados ao presente estudo, organizados por área de foco, destacando suas contribuições e limitações em relação ao contexto brasileiro de cidades médias.

### 2.4.1 Sistemas de Sensoriamento e Coleta de Dados

Nos últimos anos, o desenvolvimento de sistemas de sensoriamento para monitoramento de tráfego tem ganhado destaque na literatura. [Kumar et al. \(2024\)](#) propõem um algoritmo dinâmico de controle de semáforos baseado em redes neurais convolucionais (CNN) para maximizar o fluxo de tráfego veicular em cada fase das interseções. O trabalho utiliza um modelo de algoritmo de controle de distribuição de sinais (SDCA) para determinar valores de recompensa e novos estados em sistemas de filas multidirecionais.

[Solaiappan et al. \(2023\)](#) desenvolveram uma análise de fluxo de tráfego veicular focada na minimização do tempo de espera usando um algoritmo de controle de distribuição de sinais. Seus resultados demonstram a efetividade do sistema proposto quando comparado com sistemas de tráfego em tempo real, utilizando parâmetros de controle baseados em tempo e volume de veículos.

Embora estes trabalhos apresentem avanços tecnológicos significativos, requerem investimentos em infraestrutura que podem ser inviáveis para cidades médias brasileiras. Além disso, focam na coleta automatizada de dados, enquanto o presente trabalho utiliza dados de contagem já coletados rotineiramente por órgãos municipais, representando uma abordagem mais acessível para o contexto nacional.

### 2.4.2 Algoritmos de Otimização e Controle Inteligente

A otimização de sistemas semafóricos através de algoritmos inteligentes constitui uma outra área de pesquisa ativa. [Bernardo et al. \(2023\)](#) apresentam uma otimização de semáforos focada na segurança de pedestres, utilizando análise baseada em simulação e intervenções de campo na interseção da ponte de Jacareí, São Paulo. O trabalho demonstra melhorias na segurança através de ajustes nos tempos semafóricos. Já [Jang, Kim e Jang \(2015\)](#) propõem uma abordagem de otimização para redes urbanas supersaturadas baseada na equalização do crescimento de filas. Seu modelo consegue otimizar o timing de sinais de tráfego para interseções sinalizadas, considerando condições de alta demanda.

[Chai et al. \(2017\)](#) desenvolveram um sistema de roteamento dinâmico de tráfego em rede com controle adaptativo de sinais. Utilizando infraestrutura VANET (Veicular Ad hoc Network), o trabalho permite que condutores acessem informações de tráfego em tempo real através de comunicação V2V (Vehicle-to-Vehicle)/V2I (Vehicle-to-Infrastructure), resultando em redução significativa nos custos de viagem. Complementar, [Qadri et al. \(2024\)](#) apresentam uma abordagem semi-heurística utilizando algoritmos genéticos e um simulador SUMO (Simulation of Urban MObility) para otimização de timing de semáforos em interseções urbanas, demonstrando efetividade na redução de atrasos.

Estes trabalhos concentram-se em soluções de otimização que pressupõem infraestrutura tecnológica avançada e sistemas de controle centralizados. Nossa pesquisa adota uma perspectiva complementar, focando no diagnóstico de problemas existentes através da análise de dados históricos municipais, oferecendo informações úteis para gestores públicos, independentemente do nível tecnológico disponível.

### 2.4.3 Simulação e Modelagem de Redes de Tráfego

A simulação computacional também tem sido amplamente utilizada para análise de sistemas de tráfego. [Sánchez-Rico, García-Ródenas e Espinosa-Aranda \(2014\)](#) desenvolveram uma abordagem Monte Carlo para simular demanda estocástica em problemas de carregamento dinâmico contínuo de redes de tráfego. O trabalho foca na modelagem mesoscópica e simulação de fluxos de tráfego estocásticos. Paralelamente, [Du, Geng e Sun \(2009\)](#) apresentam um modelo de simulação baseado no método Monte Carlo para atribuição de tráfego em redes viárias de área local, oferecendo uma abordagem probabilística

para distribuição de fluxos.

Ainda com Monte Carlo, Jeon e Hong (2016) desenvolveram uma previsão de velocidade de tráfego usando a simulação com big data histórico, e seu modelo proposto alcançou alta precisão de previsão. Ainda, Eriskin, Terzi e Ceylan (2022) propõem o desenvolvimento de controle dinâmico de sinais de tráfego baseados em simulação. Seu algoritmo MCaST (Monte Carlo based Signal Timing) consegue redução de 30,2% nos atrasos durante horários de pico, utilizando cálculos de comprimento de fila e atraso na interseção.

Embora estes trabalhos apresentem modelos com abordagem Monte Carlo semelhante, geralmente focam em aspectos específicos (como comportamento microscópico e previsão de demanda) ou requerem dados detalhados nem sempre disponíveis em órgãos municipais. Nossa abordagem combina simplicidade metodológica com validação através de dados reais de contagem, oferecendo um compromisso entre precisão e praticidade para aplicação municipal.

#### 2.4.4 Lacunas Identificadas e Posicionamento da Pesquisa

Os estudos sobre modelos de tráfego urbanos apresentados se concentram majoritariamente em metrópoles com infraestrutura tecnológica avançada ou reduzidos apenas ao estudo de um cruzamento. Com isso, percebe-se que a literatura apresenta uma lacuna notável ao negligenciar cidades de médio porte, especialmente no contexto brasileiro, que possuem recursos e sistemas de coleta de dados diferentes. Esta falta de trabalhos focados em dados municipais de cidades médias representa uma oportunidade para desenvolver soluções adaptadas à realidade nacional.

Essa revisão revela que, embora existam avanços significativos em diversas frentes de pesquisa, faltam metodologias que combinem:

1. Simplicidade metodológica adequada a recursos limitados
2. Uso de dados municipais rotineiramente coletados
3. Foco diagnóstico para identificação de problemas específicos
4. Aplicabilidade em cidades médias brasileiras

Esta pesquisa se posiciona nesta lacuna, propondo uma metodologia que integra análise estatística de dados municipais com simulação de eventos discretos baseada em contagens reais de tráfego. Diferentemente dos trabalhos revisados, nosso enfoque é diagnóstico em vez de otimização, oferecendo uma ferramenta prática e aplicável no contexto brasileiro, sem comprometer a qualidade dos dados gerados para identificação de gargalos e, posteriormente, a tomada de decisão de gestores municipais.

### 3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho compreendeu a concepção e a implementação de dois módulos computacionais distintos, porém complementares, para o objetivo principal: análise e simulação do tráfego urbano do centro da cidade de Uberlândia.

#### 3.1 Sistema de Monitoramento de Tráfego

O estudo de tráfego que serve como base para este trabalho utiliza dados do sistema de monitoramento em tempo real do Departamento de Trânsito da Prefeitura Municipal de Uberlândia. A interface principal exibe um mapa da região mais movimentada da cidade, onde as vias são representadas por cores que indicam a intensidade do fluxo veicular em um determinado minuto. Uma visão geral do sistema é apresentada na Figura 2.



Figura 2 – Interface principal do sistema de monitoramento de tráfego da Prefeitura de Uberlândia, que mostra intensidade do fluxo veicular por cores em vias de parte dos bairros Centro, Nossa Sra. Aparecida e Saraiva.

Fonte: Foto da autora.

A interface de visualização, detalhada na Figura 3, apresenta o sentido das vias por meio de setas e as contagens de veículos por hora nos pontos monitorados. O sistema recebe dados de contagem a cada minuto e os converte para um fluxo horário. Vias que não possuem contadores diretos ou apresentam o valor 0 (zero) indicam a ausência de

registro de veículos, resultado de baixo fluxo ou de uma falha no sensor, como em casos de furto de cabos de cobre.

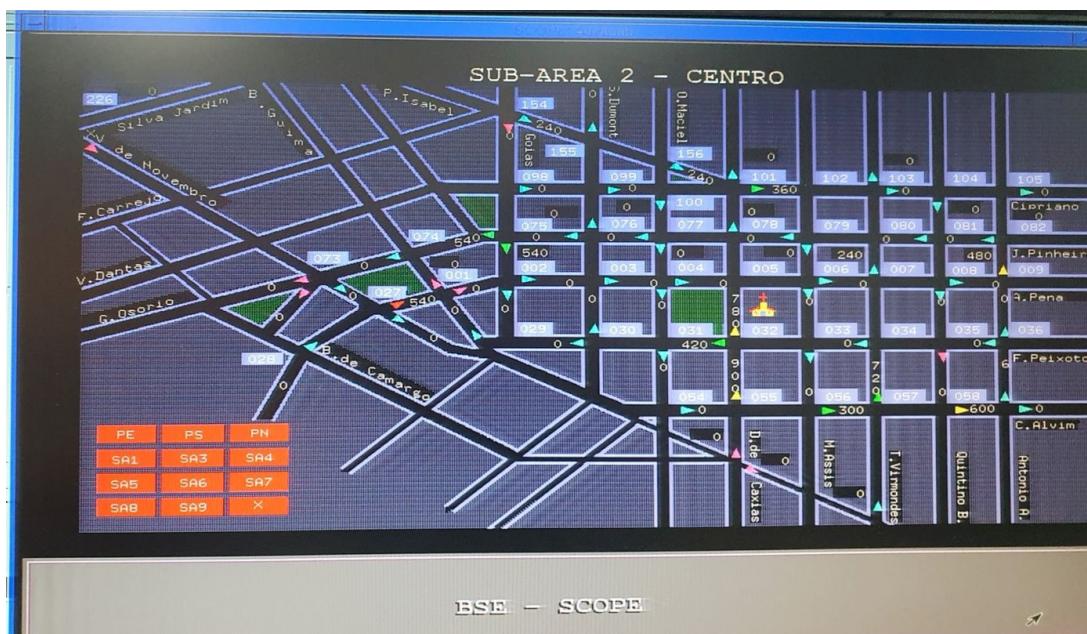


Figura 3 – Interface secundária do sistema de monitoramento de tráfego da Prefeitura de Uberlândia, focada em uma área da região central da cidade, que mostra valores atualizados de veículos previstos por hora e sentido de fluxo, medidos em sensores de contagem.

Fonte: Foto da autora.

Durante a visita técnica realizada ao SETTRAN de Uberlândia, foi possível compreender o funcionamento do sistema de monitoramento e obter informações sobre a infraestrutura de sensoriamento. Conforme explicado pelos técnicos responsáveis, o sistema não-inteligente opera com padrões de temporização semafórica pré-definidos. Os dados dos sensores de contagem são utilizados exclusivamente para seleção entre estes perfis pré-estabelecidos, determinando qual padrão de temporização deve ser ativado conforme o horário e o fluxo (Figura 4). Por exemplo, a partir da meia-noite, é ativado um padrão específico com determinados tempos de abertura. Esses valores foram estabelecidos por especialistas após um estudo feito há mais de duas décadas, cuja contagem de veículos manual levou a uma delimitação intuitiva dos "blocos" de intervalo dos temporizadores de semáforos e, desde então, não passou por revisões voltadas à otimização e à melhoria de fluxo.

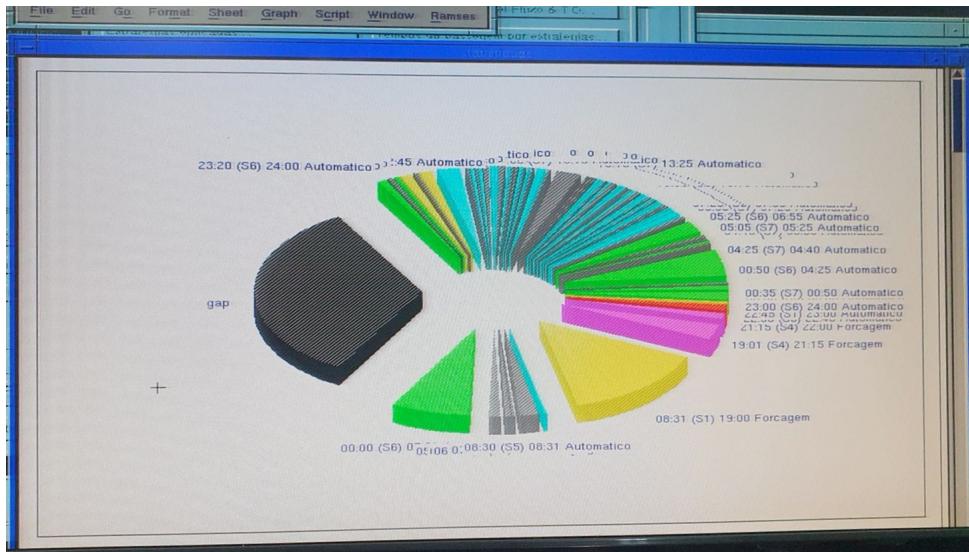


Figura 4 – Exemplo da divisão de padrões de temporizadores de semáforos aplicados em um dia, alterados por medição do fluxo veicular por minuto e horário local no sistema de monitoramento.

Fonte: Foto da autora.

### 3.2 Processo de Coleta e Pré-processamento de Dados

Neste estudo, as informações sobre o tráfego urbano veicular foram obtidas junto à Prefeitura Municipal de Uberlândia, especificamente do Departamento de Trânsito. A aquisição desses dados foi realizada mediante solicitação formal, destacando a colaboração entre a universidade e o setor público na busca por soluções para a melhoria da mobilidade urbana.

O sistema de coleta da prefeitura era antigo, baseado em UNIX, e incompatível com mídias externas. Apesar desta limitação, foi possível obter os dados de uma semana típica, abrangendo o período de 3 a 10 de novembro de 2024, utilizando a captura fotográfica com celulares das tabelas geradas pelo software utilizado e, então, a transcrição manual em uma planilha eletrônica.

Ainda assim, os valores obtidos permitiram a identificação de padrões de tráfego relevantes para o estudo: os dados consistem em contagens horárias de veículos de 12 cruzamentos localizados na região central da cidade, e cada cruzamento tem as contagens dispostas por HORA do dia e por dia da semana (SEGUNDA a DOMINGO). Adicionalmente, os dados originais continham três colunas que apresentavam médias horárias de tráfego, já fornecendo um nível inicial de processamento dos dados. Para otimizar a integração destes valores apresentados com o código da simulação, uma alteração crucial foi a adição de uma coluna explícita, denominada 'Cruzamento', que facilitou a utilização dos dados.

Um exemplo representativo do formato dos dados brutos recebidos pode ser visualizado na Tabela 2:

HORA	SEGUNDA	TERÇA	QUARTA	QUINTA	SEXTA	SÁBADO	DOMINGO	Cruzamento
06:00:00	60	59	61	69	67	57	25	AfPena/SBrand(N)
07:00:00	396	382	393	352	401	147	74	AfPena/SBrand(N)
08:00:00	746	715	755	706	719	196	86	AfPena/SBrand(N)
09:00:00	649	658	647	675	654	265	143	AfPena/SBrand(N)
10:00:00	611	649	651	654	646	381	232	AfPena/SBrand(N)
11:00:00	567	656	633	637	605	408	251	AfPena/SBrand(N)
12:00:00	558	569	579	592	613	409	284	AfPena/SBrand(N)
13:00:00	565	577	590	600	618	396	348	AfPena/SBrand(N)
14:00:00	643	579	613	625	683	321	231	AfPena/SBrand(N)
15:00:00	617	519	601	627	613	302	178	AfPena/SBrand(N)
16:00:00	602	571	594	594	583	287	228	AfPena/SBrand(N)
17:00:00	581	558	600	578	513	278	225	AfPena/SBrand(N)
18:00:00	633	641	635	621	537	296	280	AfPena/SBrand(N)
19:00:00	601	576	587	592	462	324	333	AfPena/SBrand(N)

Tabela 1 – Trecho de dados horários da contagem de veículos para o cruzamento entre a Avenida Afonso Pena e a Rua Silviano Brandão (Sentido Norte) do arquivo utilizado no trabalho.

### 3.2.1 Tratamento de Dados Ausentes

Erros de registro foram detectados durante a coleta de dados, gerando 2,43% de valores nulos (representados por zeros) na base de 1932 dados. A presença desses elementos poderia comprometer a validade e a precisão das análises subsequentes. Para garantir a integridade do conjunto de dados, foi adotado um processo de imputação, que consiste em preencher os valores faltantes com estimativas baseadas nos dados existentes.

A metodologia de imputação foi customizada de acordo com as características do tráfego em dias úteis e nos finais de semana, justificando a adoção de duas abordagens distintas. A simples média de todos os valores adjacentes não se mostrou adequada, pois as grandes lacunas de dados e as variações semanais de fluxo poderiam gerar estimativas imprecisas ou nulas.

Para os dias de semana (Segunda a sexta-feira), a imputação foi realizada com a premissa de que o padrão de fluxo de veículos em uma determinada hora tende a ser consistente ao longo da semana. Assim, para cada valor ausente, foi calculada a média dos valores existentes na mesma hora, mas em outros dias da semana. Este método é robusto para preencher grandes blocos de dados ausentes, pois utiliza a totalidade dos dados disponíveis para aquele intervalo de tempo.

A fórmula geral utilizada em planilhas eletrônicas foi a seguinte, adaptada para cada linha:

$$X_{ij} = \text{Média} (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$$

Onde  $X_{ij}$  é o valor imputado para a célula na linha  $i$  e coluna  $j$ , e  $V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}$  são os valores não nulos na linha  $i$ .

Para o tráfego nos finais de semana, que apresenta padrões de fluxo e volumes distintos dos dias úteis, uma abordagem diferente foi empregada. A imputação de valores ausentes para os dias de sábado e domingo foi baseada exclusivamente na média de outros valores próximos existentes na mesma coluna. Apesar do método de mínimos quadrados ser mais apropriado por considerar a dependência temporal, entendeu-se que, pelo baixo número de nulos, os valores adjacentes capturam bem a tendência de fluxo esperado. Essa metodologia evita a distorção que ocorreria ao misturar os padrões de fluxo de dias úteis e finais de semana.

Quando o valor ausente era um ponto isolado, a média foi calculada com os dois valores mais próximos na mesma coluna. No caso de blocos de valores ausentes, a média foi calculada com os valores que delimitam o bloco (o primeiro valor acima e o primeiro valor abaixo do bloco).

A fórmula geral utilizada foi:

$$X_i = \text{Média} (V_{i-1}, V_{i+1})$$

Onde  $X_i$  é o valor imputado, e  $V_{i-1}$  e  $V_{i+1}$  são os valores mais próximos ao valor ausente na mesma coluna.

Todo o processo de cálculo foi realizado utilizando as funções `AVERAGE` e `ROUNDUP` para garantir a consistência e o arredondamento dos resultados. A aplicação desses métodos permitiu a criação de um conjunto de dados completo, apto a ser utilizado nas etapas subsequentes de análise.

### 3.3 Tecnologias e Metodologia de Desenvolvimento

#### 3.3.1 Tecnologias Utilizadas

No âmbito da gestão das atividades, a funcionalidade *Issues* do GitHub foi adotada como ferramenta de controle de tarefas. Este recurso permitiu a criação e o monitoramento pelo método Kanban, seguindo um fluxo visual de trabalho: as tarefas eram registradas como "afazeres"(to do), movidas para "em andamento"(in progress) conforme o trabalho progredia, e marcadas como "concluídas"(done) quando finalizadas. Essa abordagem ágil facilitou a organização e o acompanhamento do progresso de cada etapa.

Na parte de desenvolvimento, a implementação dos módulos de análise e simulação foi realizada com o uso da linguagem de programação Python, utilizando as bibliotecas abaixo como fornecedoras de recursos avançados para o processamento de dados, aplicação matemática e visualização de resultados:

- **Pandas:** utilizada para a manipulação e análise de dados tabulares, no carregamento e pré-processamento dos dados do arquivo Excel e na organização de resultados.

- **NumPy**: usado para operações numéricas e cálculos complexos, manipulação de arrays e geração de números aleatórios (como na distribuição de Poisson).
- **Matplotlib**: Biblioteca para a criação de gráficos estáticos.
- **Seaborn**: Construído sobre o Matplotlib, utilizado para gerar visualizações estatísticas mais atraentes e complexas, complementando os gráficos.
- **Plotly**: Ferramenta para a criação de gráficos interativos e painéis de visualização.
- **NetworkX**: Utilizado para a modelagem da rede viária como um grafo.
- **Collections (defaultdict, deque)**: Módulos embutidos utilizados para estruturas de dados como dicionários com valores padrão e filas de tamanho limitado (deques), importantes para o armazenamento de históricos na simulação.
- **datetime**: Módulo padrão do Python para manipulação de objetos de data e hora.
- **matplotlib.colors (mc, LinearSegmentedColormap)**: Módulos específicos do Matplotlib para manipulação e criação de mapas de cores.

## 3.4 Arquitetura do Sistema

A solução proposta estrutura-se em um modelo de dois módulos: o Módulo de Análise e Diagnóstico e o Módulo de Simulação da Rede Viária. Esta divisão permite uma dupla abordagem ao problema do tráfego. Enquanto o primeiro se dedica à análise exploratória de dados históricos e a modelos teóricos, o segundo tem como foco a simulação Monte Carlo de uma rede de tráfego interconectada. Ambos os módulos operam a partir de uma fonte de dados externa, que fornece informações de tráfego reais da cidade de Uberlândia.

## 3.5 Análise e Diagnóstico

O módulo de Análise e Diagnóstico é o componente responsável por processar e extrair informações analíticas e probabilísticas de dados históricos do tráfego na região central do município.

### 3.5.1 Carregamento de Dados

A etapa inicial do processamento de dados é a leitura e a preparação das informações. O módulo lê o arquivo, passando os dados para uma estrutura unificada. Essa etapa inclui a padronização do identificador ‘Cruzamento’, assim como a normalização de formatos de hora e de colunas de dias da semana. Logo após, são calculadas médias de

fluxo para os dias úteis e para os finais de semana, que servirão como base para análises seguintes.

### 3.5.2 Calibração de Parâmetros e Fator de Hora de Pico

A calibração dos parâmetros do modelo de simulação é uma etapa fundamental para garantir que os resultados reflitam as condições de tráfego na área de estudo. A taxa de serviço e a capacidade de saturação dos cruzamentos foram definidas com base nos princípios do Highway Capacity Manual (HCM), um guia de referência em engenharia de tráfego ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)).

O HCM considera uma capacidade base de 1.200 a 1.400 veículos por hora por faixa para vias urbanas em condições ideais ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)). No entanto, para ruas centrais, como as utilizadas no presente estudo de Uberlândia, é necessário aplicar fatores de redução que consideram as particularidades do ambiente urbano. A metodologia do HCM leva em conta fatores como largura de faixa reduzida, interferências laterais, semáforos e a presença de pedestres ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)).

Para o cálculo da capacidade real de um cruzamento na região central, foram aplicados os seguintes fatores de ajuste, que estão alinhados e dentro da média dos intervalos propostos pelo HCM:

- Fator de Largura de Faixa: 0,85
- Fator de Interferências Laterais: 0,80
- Fator de Semáforos: 0,90
- Fator de Pedestres: 0,90

A aplicação desses fatores resulta na seguinte fórmula, que converte a capacidade base na capacidade real do cruzamento:

$$Capacidade_{Real} = 1.200 \times 0,85 \times 0,80 \times 0,90 \times 0,90$$

O resultado do cálculo é de 660,96 veículos/h, considerada a capacidade real de saturação para um cruzamento na região central, e com base nesse resultado, a taxa de serviço do modelo foi calibrada para 11 veículos por minuto (equivalente a 660 veículos/h). Essa taxa estabelece um limite realista para a capacidade de processamento do cruzamento, garantindo que o modelo de simulação opere em um regime que reflete as condições de tráfego local.

Ainda que a capacidade horária seja de aproximadamente 660 veíc/h, é crucial considerar que a demanda de tráfego não é uniforme ao longo da hora. Para capturar essa variação, o conceito de Fator da Hora de Pico (PHF), uma métrica do HCM, foi adotado ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)). O PHF é a razão entre o volume total de uma hora e o fluxo máximo observado no pico de 15 minutos, e sua importância reside no fato de que o congestionamento ocorre quando a demanda instantânea excede a capacidade.

A fórmula para o cálculo do fluxo instantâneo é:

$$\text{Fluxo}_{\text{Instantâneo}} = \frac{\text{Volume}_{\text{Horário}}}{\text{PHF}}$$

Para o tráfego central de Uberlândia, foi adotado um PHF de 0,85 ([TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016](#)), um valor típico para áreas urbanas. Isso significa que, mesmo com um volume horário de 600 veículos (que seria teoricamente processável por uma via com capacidade de 660 veíc/h), a demanda instantânea no pico de 15 minutos pode atingir:

$$\text{Fluxo}_{\text{Instantâneo}} = \frac{600}{0,85} \approx 706 \text{ veíc/h}$$

Este cálculo demonstra que a demanda em curtos períodos (15 minutos) pode exceder a capacidade da via (660 veículos/h), validando o porquê do congestionamento ocorrer mesmo quando o volume total da hora está dentro da capacidade teórica. Esta explicação teórica justifica o porquê de nosso modelo de simulação trabalhar diretamente com dados de contagem em intervalos de 15 minutos, em vez de se basear em volumes horários agregados.

### 3.5.3 Análise de Fila com Lei de Little

Para entender o comportamento das filas nos cruzamentos, o módulo de diagnóstico realiza uma análise utilizando a Lei de Little. Esta abordagem estima as condições de fila para cada hora do dia, tratando cada cruzamento como um sistema isolado. A taxa de chegada de veículos para cada hora é derivada da média do fluxo observada, convertida do original para veículos por minuto. A taxa de serviço, que representa a capacidade de processamento do cruzamento, é um valor configurável e foi definida em 11 veículos por minuto (aproximadamente 660 veículos/hora) para alinhar-se à realidade observada no centro de Uberlândia, considerando que fluxos acima disso podem ultrapassar valores toleráveis do sistema.

A partir dessas taxas, é possível utilizar o modelo para calcular o tempo médio de espera e o número médio de veículos no sistema. Quando a taxa de chegada supera a taxa

de serviço, o sistema é classificado como sobrecarregado, indicando uma fila teórica e um tempo de espera que crescem indefinidamente. A capacidade máxima da fila, configurada para 660 veículos, representa o limite máximo de veículos que o sistema consegue processar antes que o fator de utilização (taxa de chegada dividida pela taxa de serviço) se aproxime de 1. Este valor serve como um parâmetro de controle para a representação visual das filas nos gráficos, evitando que situações de saturação extrema comprometam a legibilidade dos resultados.

### 3.5.4 Análise Probabilística com Cadeia de Markov

Complementando a análise determinística de filas, foi empregada uma Cadeia de Markov para explorar a dinâmica probabilística dos estados de tráfego do cruzamento identificado como mais crítico: a interseção João Pinheiro com Goiás. Foram definidos quatro estados operacionais baseados na utilização do sistema ( $\rho = \lambda/\mu$ ): fluxo leve ( $\rho < 0,50$ ), moderado ( $0,50 \leq \rho < 0,70$ ), intenso ( $0,70 \leq \rho < 0,80$ ) e congestionado ( $\rho \geq 0,80$ ). A classificação de cada hora em um desses estados baseia-se na relação entre a taxa de chegada observada e a capacidade de processamento do cruzamento.

A partir da sequência de estados observados hora a hora ao longo de uma semana completa (168 observações), foi construída uma matriz de probabilidades de transição com base em 161 transições válidas identificadas nos dados históricos. Esta matriz quantifica a probabilidade de o cruzamento transitar de um estado para outro no período seguinte, refletindo os padrões reais de evolução do congestionamento. O modelo, que se baseia nas transições observadas nos dados históricos, quando há valores insuficientes para caracterizar determinadas transições, reporta essa limitação e mantém a integridade da análise.

Esta abordagem permite a modelagem da evolução temporal dos estados operacionais do cruzamento, fornecendo uma perspectiva complementar à análise de filas focada na dinâmica probabilística de longo prazo em vez de métricas pontuais de desempenho. A análise revela padrões de persistência nos estados extremos e instabilidade nos estados intermediários, oferecendo informações valiosas para o planejamento de intervenções no sistema viário.

### 3.5.5 Visualizações Geradas pelo Módulo

O módulo de Análise e Diagnóstico gera também uma variedade de relatórios visuais que apresentam os dados históricos e as previsões. Isso inclui gráficos de panorama geral do fluxo, comparação de desempenho entre cruzamentos, mapas de calor do fluxo por dia e hora, e gráficos que ilustram os resultados da análise de fila pela Lei de Little e a simulação de estados por Cadeia de Markov. Essas visualizações são essenciais para

uma compreensão intuitiva dos padrões de tráfego e dos potenciais gargalos.

## 3.6 Metodologia da Simulação de Rede Viária

O Módulo de Simulação da Rede Viária é o responsável pela modelagem da rede interconectada de tráfego. Esta seção detalha a arquitetura do módulo e a metodologia experimental utilizada para avaliar o desempenho do sistema viário sob diferentes condições.

### 3.6.1 Arquitetura da Representação em Grafo

A arquitetura da simulação se baseia em uma rede jacksoniana, representada como um grafo direcionado que espelha as rotas monitoradas pela Prefeitura de Uberlândia. Conforme ilustrado na Figura 5, cada um dos 42 nós do grafo corresponde a uma interseção real da região central. Esta correspondência garante que os nós alimentados com dados reais refletem exatamente os pontos onde a prefeitura possui sensores ativos. Os demais 30 nós representam interseções necessárias para manter a conectividade da rede, permitindo a simulação realista dos fluxos de tráfego entre os pontos monitorados.

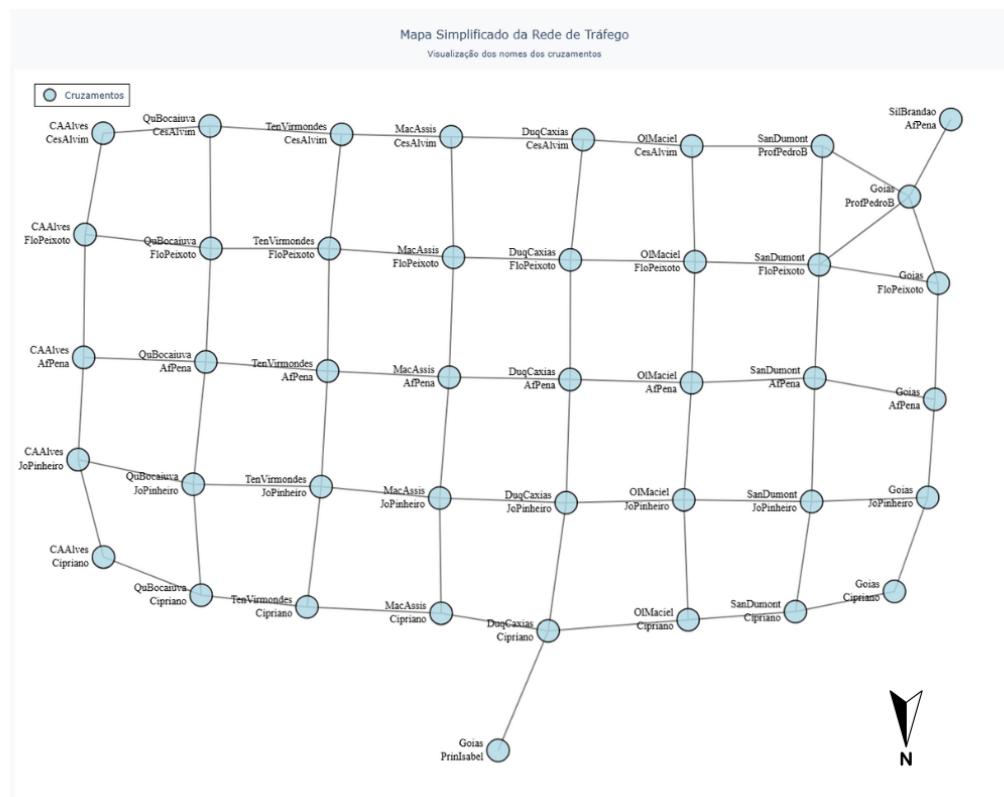


Figura 5 – Arquitetura em grafo da rede viária implementada, baseada na topologia real do sistema de monitoramento municipal.

### 3.6.2 Parâmetros Variáveis e Constantes

A rede é modelada como um grafo direcionado composto por 42 interseções e suas respectivas conexões viárias. Cada interseção é representada como um nó com fila de capacidade limitada e características operacionais específicas. Nos experimentos, os parâmetros de capacidade da fila, taxas de saída e distribuição de tráfego foram ajustados para avaliar seu impacto no sistema.

1. Taxas de Chegada Base: Derivadas dos dados históricos de contagem veicular coletados pela prefeitura, distribuídas em intervalos horários. Doze interseções recebem dados reais através de fatores de calibração que variam entre 0,3, 0,7 e 1,0, dependendo do número de saídas anteriores àquelas apresentadas na rede.
2. Taxas de Serviço: Uniformemente configuradas em 660 veículos por hora para todas as interseções, valor calibrado conforme diretrizes do Highway Capacity Manual (HCM) utilizadas no Módulo de Análise e Diagnóstico.
3. Probabilidades de Saída: Variam conforme o tipo de interseção e horário, com valores base entre 0,35 e 1,0. Para os experimentos, diferentes cenários foram testados com taxa de saída baixa (35%) e alta (80%) para avaliar o impacto da rotatividade.
4. Capacidade da Fila: O valor foi estabelecido aplicando a metodologia do HCM. Para os experimentos, a capacidade da fila foi testada em 120 veículos (cenário otimista, representando folga) e 60 veículos (cenário mais realista, representando limitações físicas).
5. Distribuição de Tráfego: Diferentes configurações foram testadas para simular o comportamento de dispersão do tráfego. A concentração em avenidas principais foi variada entre 60% e 75% para verificar o quanto sensíveis são os resultados às mudanças.

### 3.6.3 Lógica da Simulação e Metodologia Experimental

A simulação opera em ciclos de 15 minutos ao longo de períodos de três dias. A cada intervalo, novos veículos chegam às filas, são processados e se movem entre as interseções, respeitando as regras de um sistema de eventos discretos.

Para aprofundar a análise, uma série de experimentos foi conduzida, cada um com configurações específicas de parâmetros. O objetivo foi isolar o impacto de cada variável na performance da rede.

- **Experimento 0 (Validação Inicial):** Analisou isoladamente o cruzamento com o maior fluxo, identificado no Módulo 1. O objetivo foi testar se o gargalo real se

manifestaria como gargalo na simulação de forma isolada, antes da expansão para a rede completa.

- **Experimentos 1 e 2 (Impacto da Taxa de Saída):** Compararam o desempenho da rede com baixa (35%) e alta (80%) taxa de saída, mantendo a capacidade da fila otimista (120 veículos) e a distribuição de tráfego dispersa (60%).
- **Experimentos 3 e 4 (Estabilidade dos Resultados):** Replicaram a análise anterior com uma distribuição de tráfego mais realista (75% de concentração em avenidas) para verificar se as conclusões sobre a taxa de saída se mantinham.
- **Experimento 5 (O Fator Crítico da Capacidade Física):** Utilizou os parâmetros mais realistas (capacidade de fila de 60 veículos e taxa de saída de 80%) para quantificar o impacto da limitação física na performance da rede.

### 3.6.4 Calibração e Análise de Dados

O processo de calibração do modelo se baseia na integração de dados de contagem das doze interseções. No entanto, três dessas interseções foram removidas da alimentação de dados por estarem em posições intermediárias no sistema, o que poderia gerar dupla contagem e comprometer a integridade dos resultados. Com isso, o modelo foi alimentado apenas por pontos de entrada na rede que se localizam nas extremidades da malha.

Para garantir a precisão dos dados, foram aplicados fatores de ajuste específicos: as interseções de entrada primária (Goiás-PrinIsabel e CAAAlves-AfPena) mantêm um fator de 1.0, enquanto as demais, com saídas pré-entrada na rede, recebem um fator de 0.7. Essa abordagem garante que os dados refletem com mais fidelidade o fluxo que realmente está ingressando no sistema viário.

O Módulo de Simulação da Rede Viária gera dois relatórios visuais interativos em formato HTML. O mapa principal da rede diferencia visualmente os tipos de interseções, com as cores dos nós refletindo os níveis de congestionamento. Já o relatório temporal integra quatro análises: evolução diária de veículos processados e rejeitados, distribuição de rejeições por tipo de horário, histograma de congestionamento da rede e ranking de interseções por volume de fluxo. Estas visualizações permitem a identificação de gargalos operacionais e a compreensão dos padrões de saturação durante os diferentes períodos de simulação.

# 4 Resultados

## 4.1 Resultados do Módulo 1: Análise e Diagnóstico

O módulo de análise e diagnóstico processa os dados de tráfego para fornecer uma visão detalhada das condições históricas. Essa análise é fundamental para entender os padrões de fluxo e o comportamento dos veículos na área de estudo. Com base no Highway Capacity Manual (HCM), foi estabelecido um ponto de saturação para os cruzamentos, o que permite avaliar o desempenho do sistema de tráfego. Esta análise foi dividida em quatro partes:

1. Análise do fluxo por cruzamento e por período;
2. Análise de desempenho com a Teoria das Filas (Lei de Little);
3. Modelagem do tráfego com Cadeia de Markov do Pior Cruzamento Identificado;
4. Validação do modelo.

### 4.1.1 Análise do fluxo por cruzamento e por período

Nesta seção, a análise se concentra nas variações de fluxo de tráfego ao longo do tempo e entre os diferentes cruzamentos monitorados. Os resultados revelam padrões que ajudam a entender a dinâmica do tráfego urbano.

A Figura 6 apresenta um panorama geral do volume de tráfego, mostrando a média de veículos que circulam a cada hora do dia. Esta permite a identificação dos períodos de maior e menor movimento, como os picos significativos nos horários habituais de superlotação, como o início e o fim da jornada de trabalho.

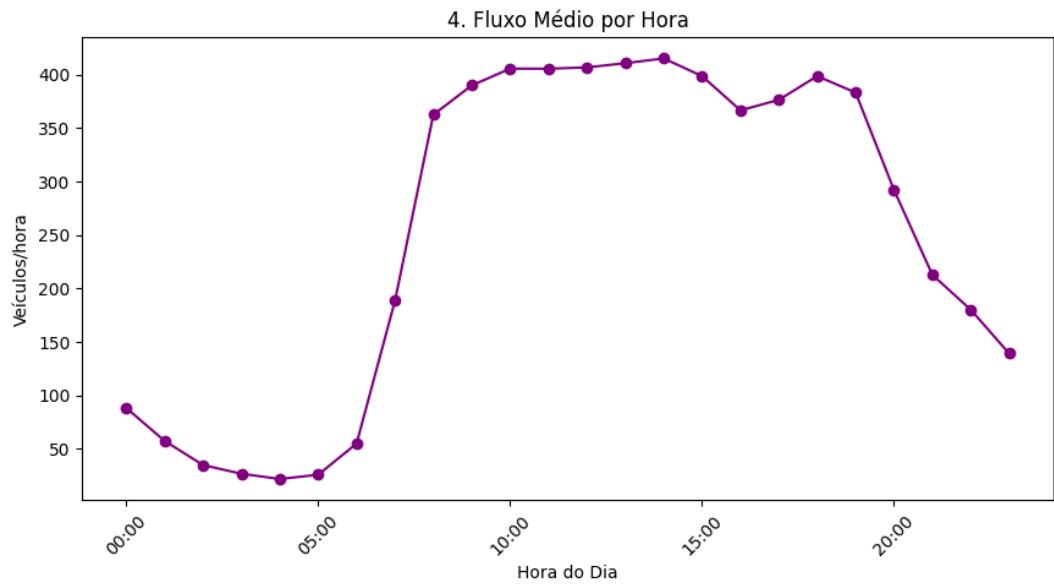


Figura 6 – Fluxo Médio por Hora

Já a Figura 7 tem o objetivo de detalhar o volume de tráfego em cada ponto específico. A análise desses dados revelou uma heterogeneidade significativa: o cruzamento entre a Avenida João Pinheiro e a Rua Goiás (Sentido Sul) apresentou o maior fluxo médio, com aproximadamente 400 veículos por hora. Em contrapartida, o encontro entre a Avenida Princesa Isabel e a Rua Goiás (Sentido Norte) registrou o menor volume, com apenas 80 veículos por hora.

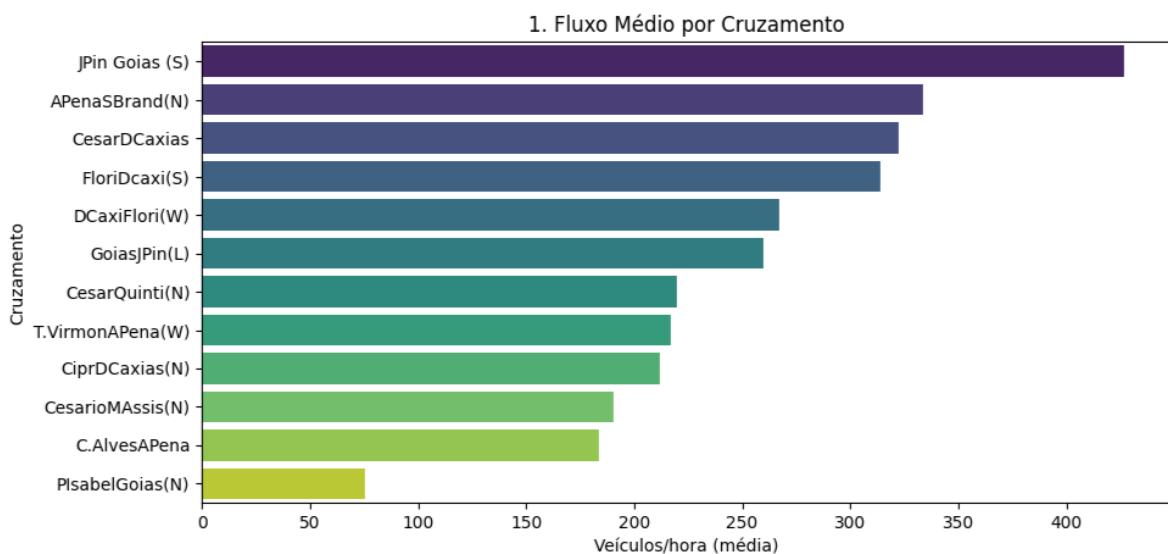


Figura 7 – Fluxo Médio por Cruzamento

A Figura 8 e a Figura 9 aprofundam a análise, mostrando a distribuição do fluxo ao longo das 24 horas do dia. Essas figuras confirmam a intensidade de fluxo durante os horários de pico da manhã (7h-9h) e da tarde (17h-19h), que estão alinhados com os horá-

rios de trabalho, mas também destacam o movimento existente no horário comercial como um todo, refletindo a realidade do centro de uma cidade. A Figura 9 foca especificamente nos dias úteis, reforçando que esses padrões são consistentes de segunda a sexta-feira.

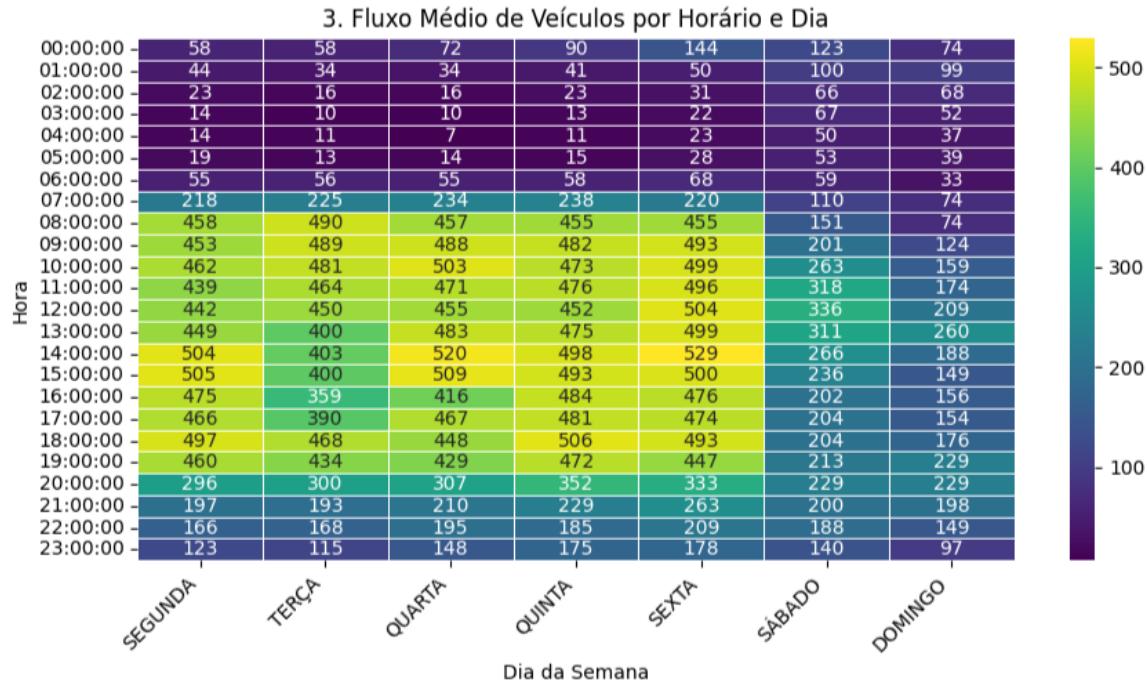


Figura 8 – Fluxo Médio de Veículos por Horário de Dia

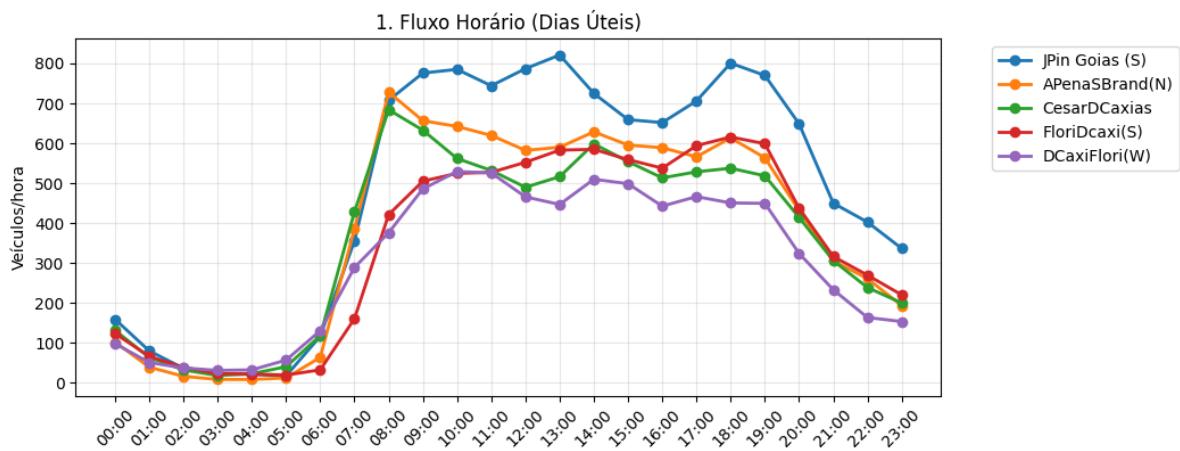


Figura 9 – Fluxo Horário (Dias Úteis)

Além disso, a Figura 10 e a Figura 11 mostram a diferença do impacto dos dias úteis na mobilidade urbana. A Figura 10 evidencia que o fluxo médio em dias úteis é de 290 veículos por hora, enquanto nos finais de semana cai para 150 veículos por hora, uma redução de aproximadamente 48%. A Figura 11 complementa essa informação, mostrando que essa queda é consistente em todos os cruzamentos principais, indicando que o trânsito nos finais de semana é significativamente mais leve e reflete menos a rotina de trabalho.

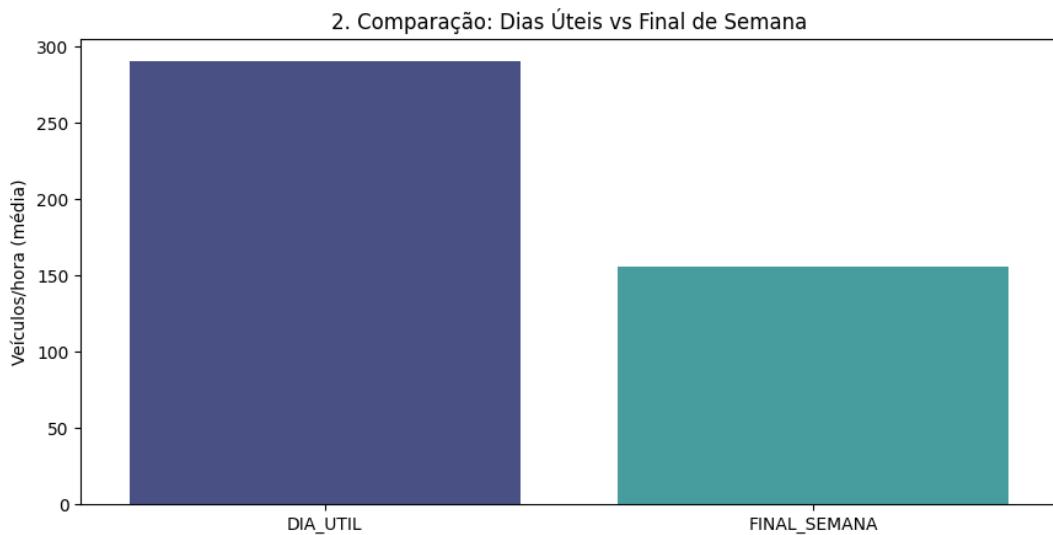


Figura 10 – Comparação Média: Dias Úteis vs Final de Semana

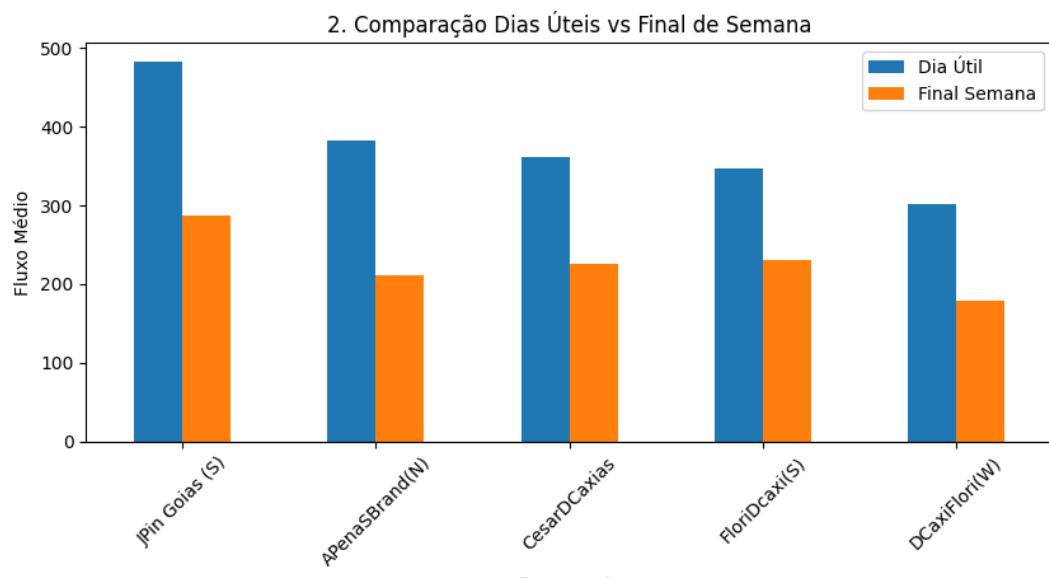


Figura 11 – Comparação: Dias Úteis vs Final de Semana (Por Cruzamento)

Os mapas de calor<sup>1</sup> nas Figuras 12, 13 e 14 oferecem uma visualização intuitiva da distribuição do fluxo ao longo de alguns dias da semana. Cada célula do mapa representa o volume de tráfego em uma hora específica de um dia. As cores mais escuras (vermelho/laranja) indicam maior volume, enquanto as mais claras (amarelo) indicam menor volume.

<sup>1</sup> Com o objetivo de sintetizar a seção de resultados, o presente estudo apresenta uma seleção de mapas de calor. Os dados completos estão detalhados no Apêndice A

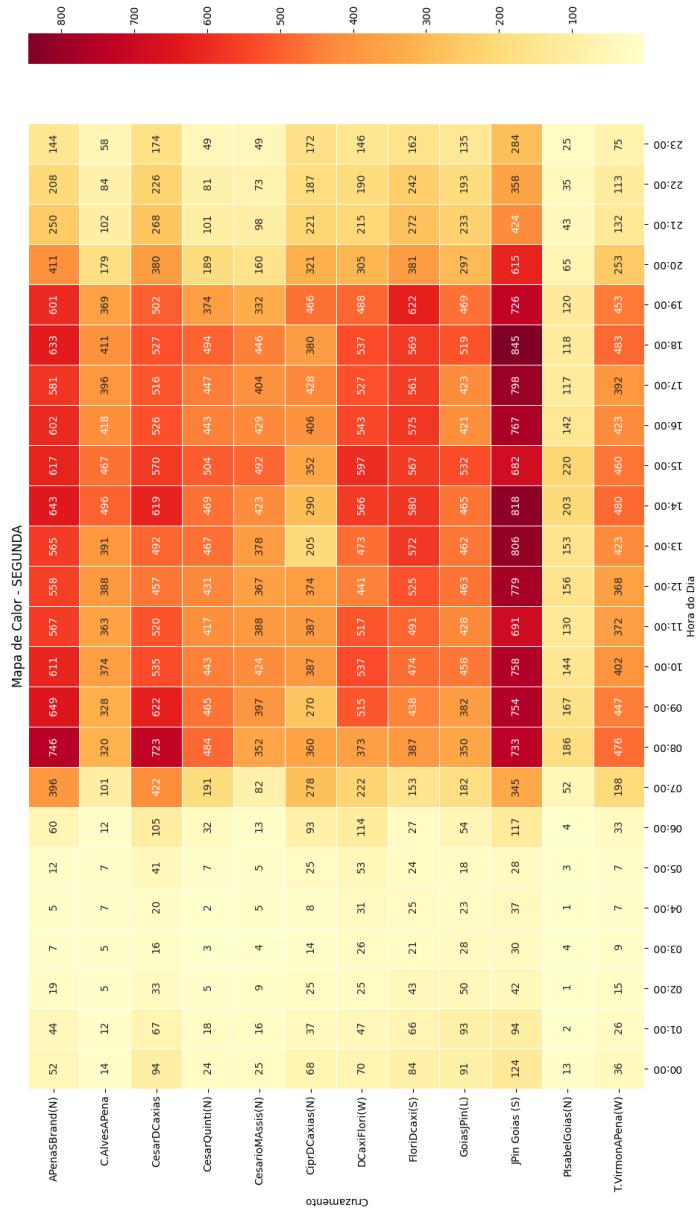


Figura 12 – Mapa de Calor (Segunda-feira)

Nos dias úteis selecionados (segunda-feira e sexta-feira), os maiores picos estão alinhados com os horários de trabalho ou de almoço, mantendo a consistência observada anteriormente. No sábado, o tráfego se concentra entre 11h e 15h e 18h e 20h, com um volume geral muito menor que nos picos de segunda e sexta-feira. A Figura 15 consolida esta informação, mostrando a média do fluxo para os dias úteis dos 5 cruzamentos mais movimentados.

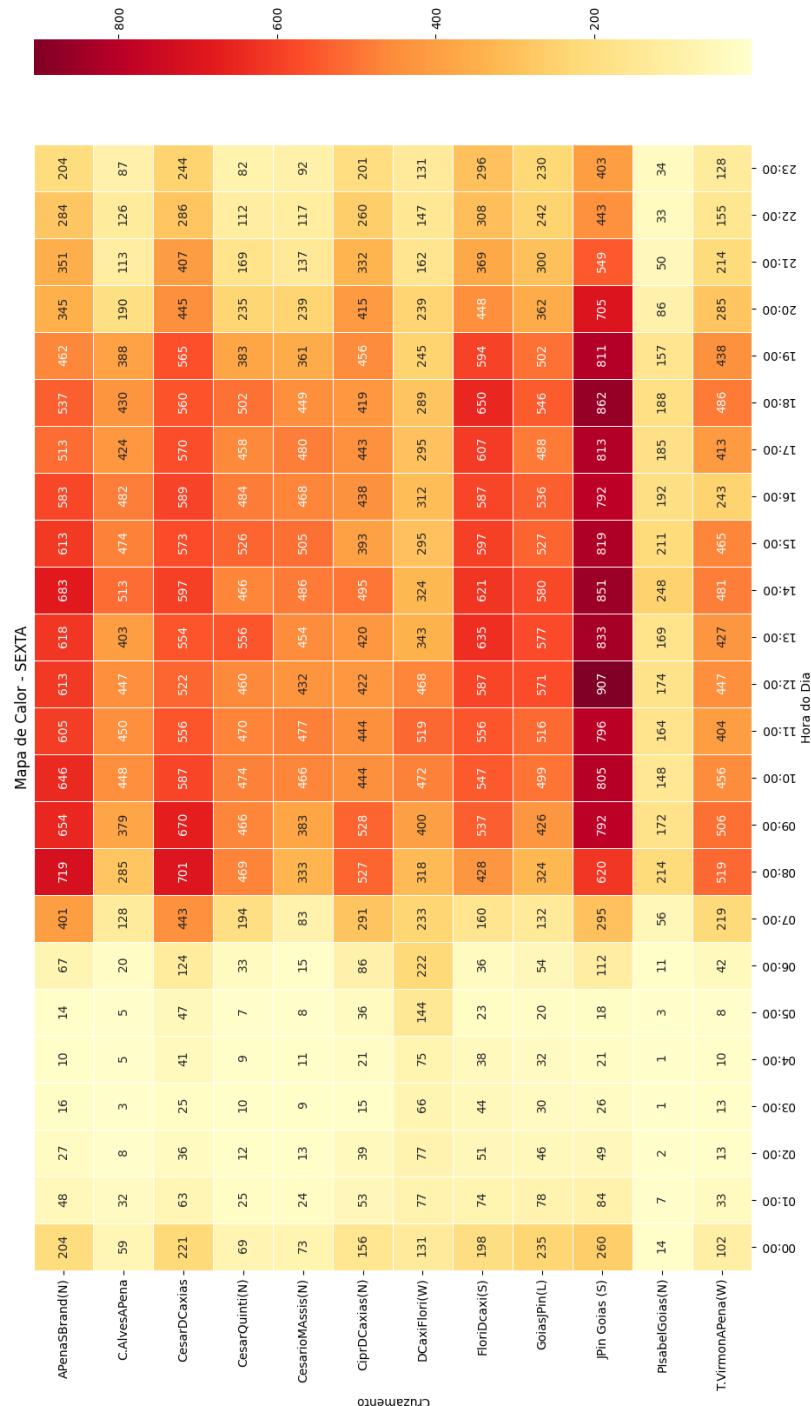


Figura 13 – Mapa de Calor (Sexta-feira)

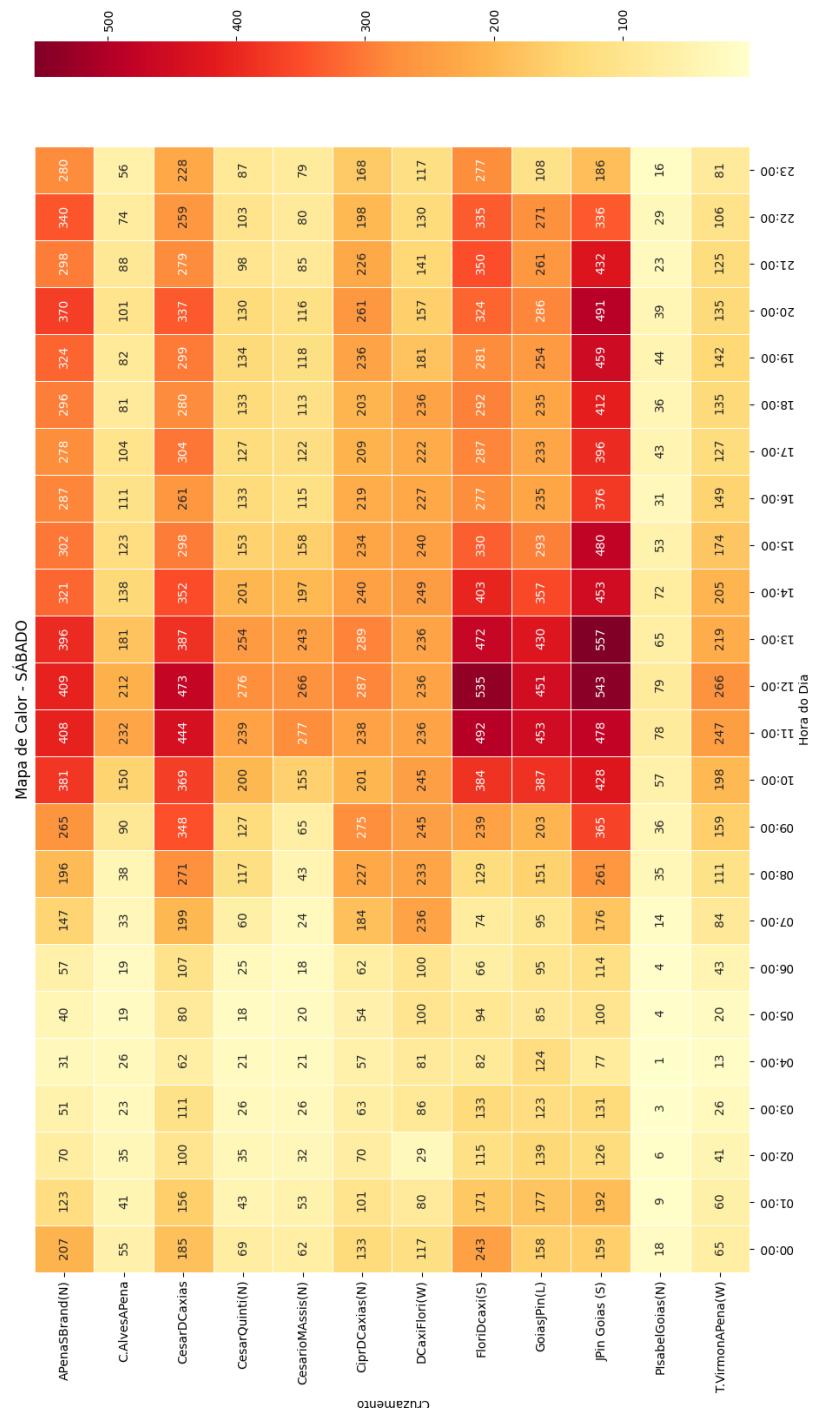


Figura 14 – Mapa de Calor (Sábado)

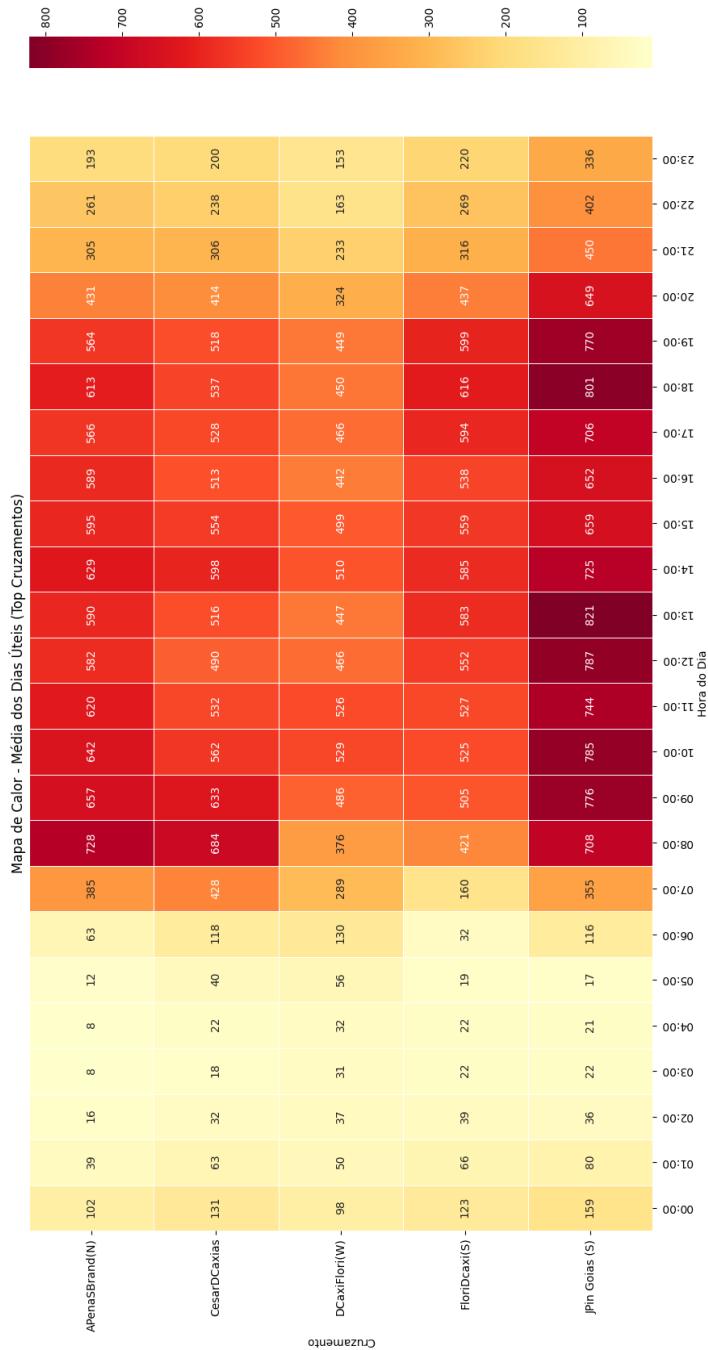


Figura 15 – Mapa de Calor (Média dos Dias Úteis)

#### 4.1.1.1 Análise de Horários de Pico

A Figura 16 revela os horários de maior frequência de congestionamento. Essa análise é fundamental para identificar os períodos de alta demanda mais recorrentes e validar a influência da atividade comercial no sistema viário local.

Os resultados indicam que, apesar do aumento no fluxo no início e fim da jornada de trabalho, os picos de tráfego não se limitam a estes horários específicos, e ocorrem ao longo de todo o expediente comercial, com pelo menos uma das cinco vias monitoradas registrando um pico em cada hora do dia.

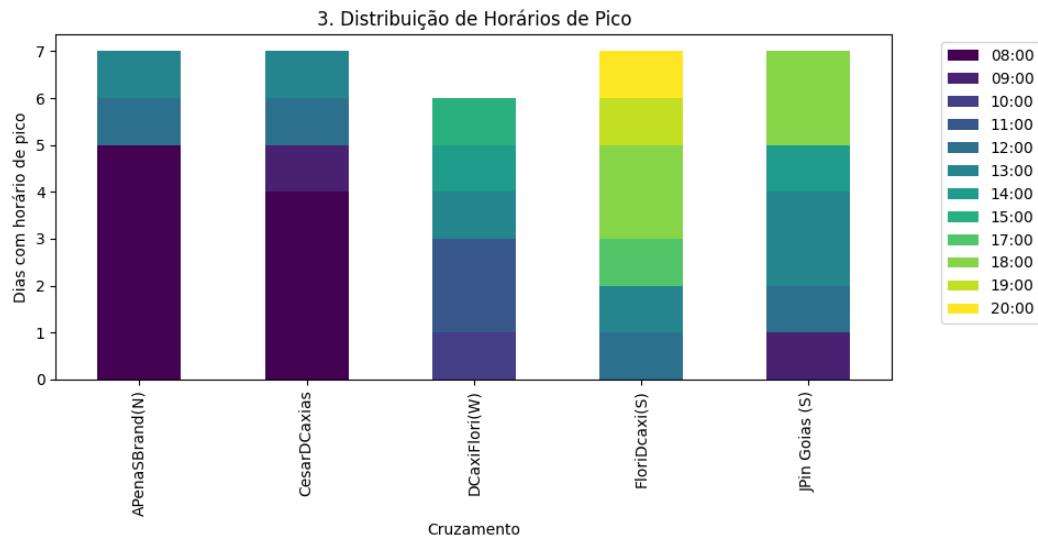


Figura 16 – Distribuição de Horários de Pico

A Figura 17 aprofunda a análise dos picos de tráfego ao comparar o volume de veículos nos horários de pico com os horários de menor fluxo (vale). A visualização revela a extrema e drástica diferença entre os volumes, destacando o nível de saturação em determinados pontos.

No cruzamento entre a Avenida Afonso Pena e a Rua Silviano Brandão, por exemplo, a razão entre o fluxo de pico e o de vale atinge um valor de aproximadamente 90. Isso indica que o volume de veículos no momento de pico chega a ser 90 vezes maior do que o fluxo em horários de menor movimento, evidenciando a concentração intensa e repentina da demanda em pontos críticos da rede viária.

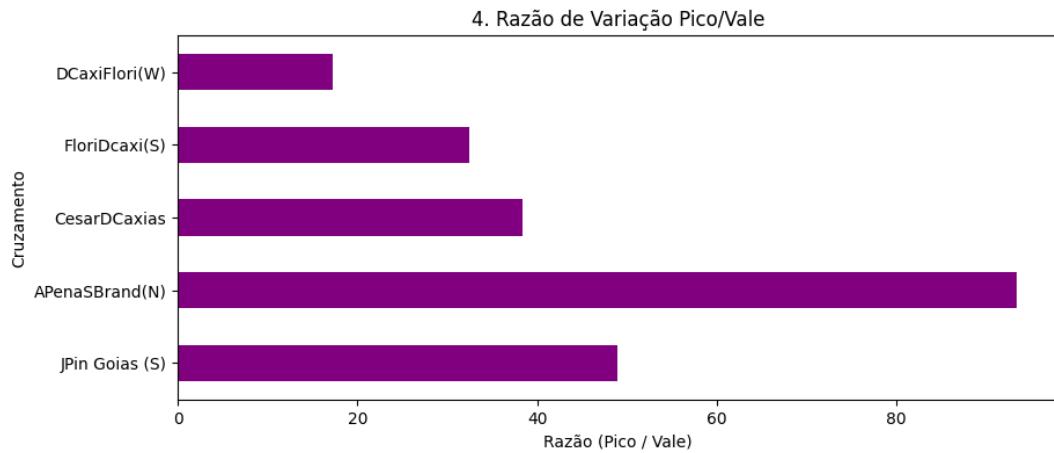


Figura 17 – Razão da Variação Pico/Vale

#### 4.1.2 Análise com Teoria de Filas

A aplicação da Teoria das Filas, utilizando a Lei de Little, permitiu avaliar o desempenho do sistema de tráfego em relação à sua capacidade, indo além da simples contagem de veículos. Para esta análise, foi definida uma capacidade de 660 veículos por hora (11 veículos/minuto) para todos os cruzamentos. Apesar da limitação de não diferenciar a capacidade teórica de vias principais e secundárias, o modelo se mostrou eficaz para avaliar a dinâmica geral do tráfego e identificar a ocorrência de congestionamento.

##### 4.1.2.1 Análise Teórica de Congestionamento nos Dias Úteis (Lei de Little)

A Figura 18 apresenta a análise agregada dos cruzamentos da rede, evidenciando o congestionamento nos dias úteis. Ela mostra que a taxa de chegada de veículos (linha azul) excede a capacidade nominal do cruzamento (linha vermelha tracejada) por um período prolongado, das 7h às 14h e também das 17h às 19h. Isso demonstra que, durante a maior parte do dia útil, o sistema de tráfego está sobrecarregado pela demanda, que é maior que a sua capacidade de processamento.

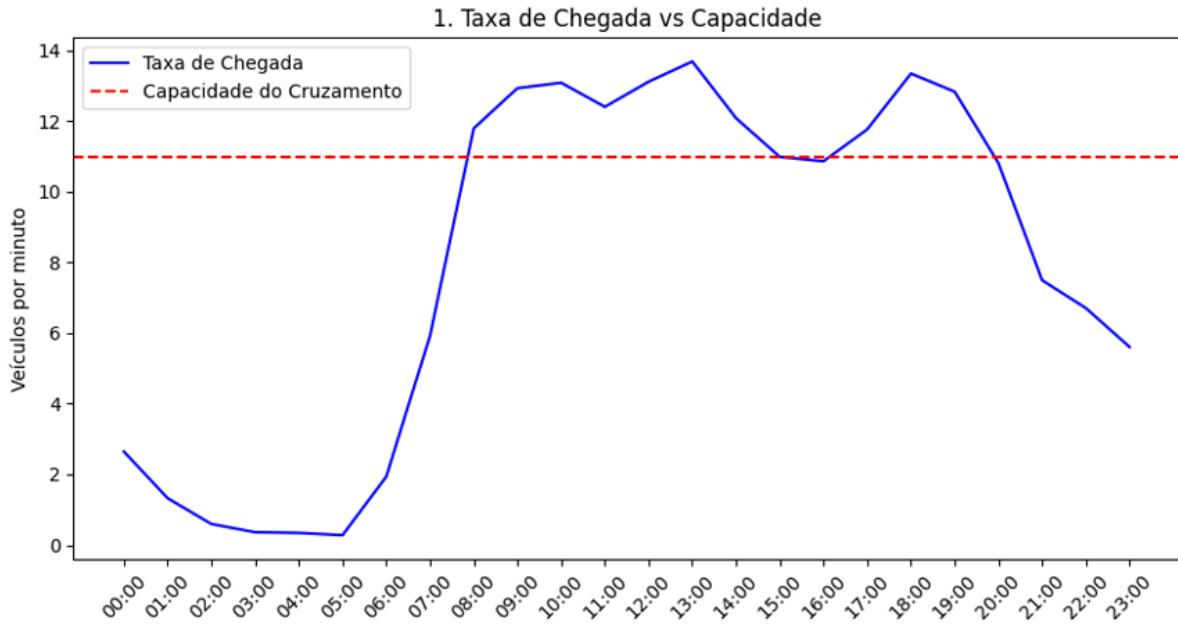


Figura 18 – Taxa de Chegada vs Capacidade

A Figura 19 complementa a análise, mostrando que a eficiência do sistema diminui drasticamente à medida que a demanda se aproxima da capacidade. Nos horários de pico, a demanda atinge 99% a 100% da capacidade, forçando o sistema a operar em seu limite e gerando filas.

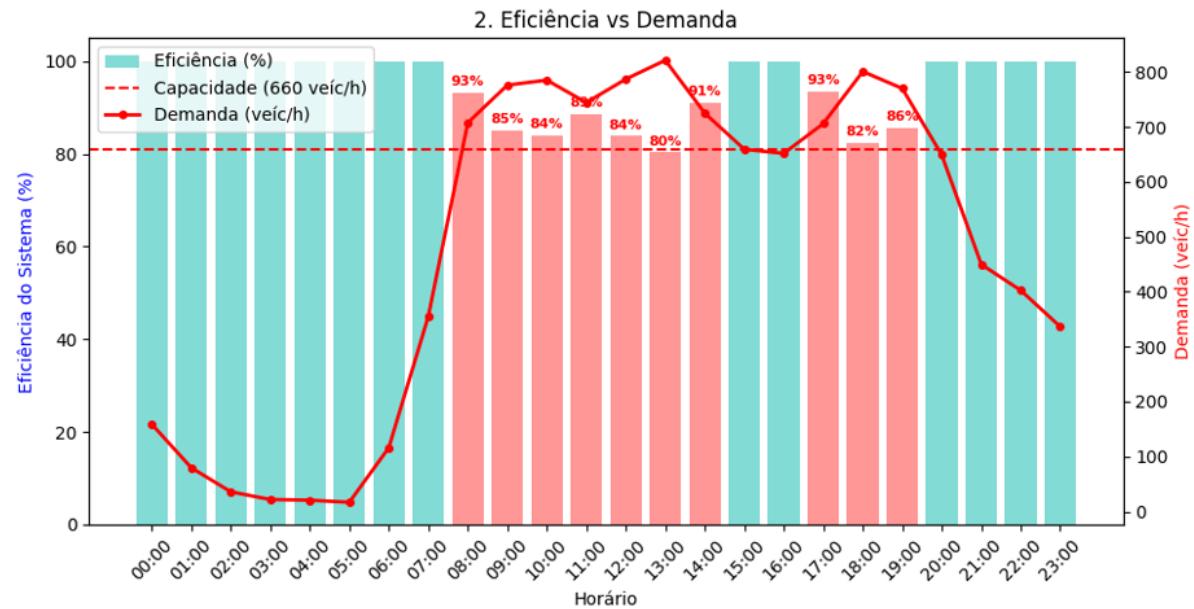


Figura 19 – Eficiência vs Demanda

O impacto direto dessa sobrecarga é ilustrado na Figura 20, onde o Nível de Serviço atinge os estados E e F (saturado) durante a maior parte do dia útil. Esses níveis indicam que o tráfego está congestionado, com filas e tempos de espera acima do normal.

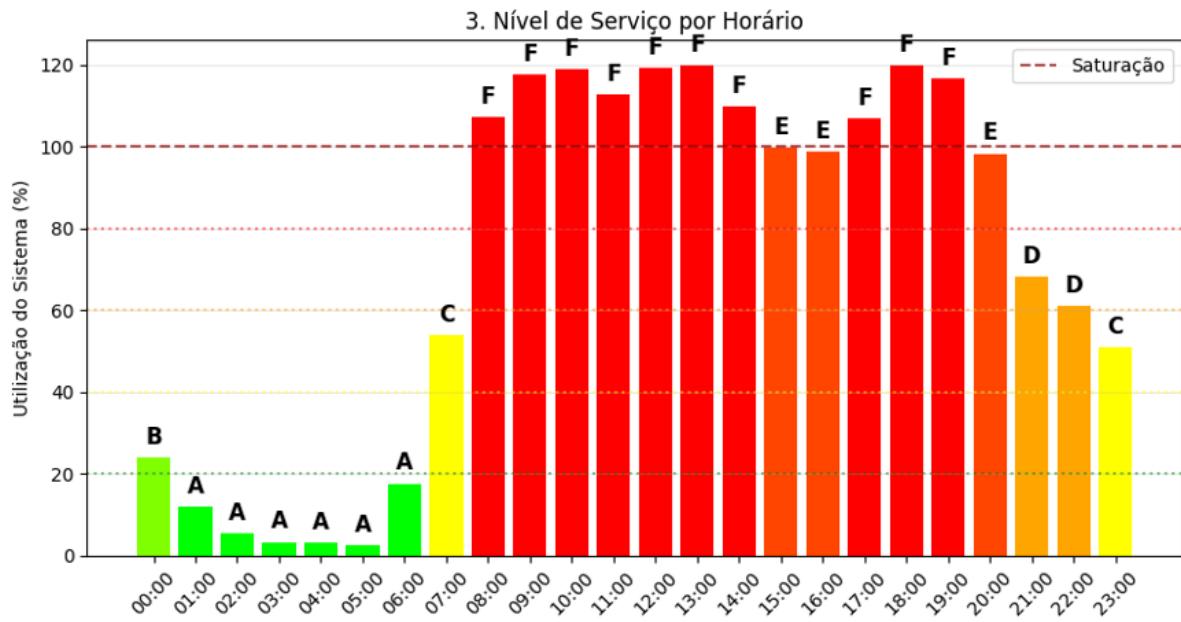


Figura 20 – Nível de Serviço por Horário

Por fim, a Figura 21 quantifica a dimensão do problema. Ela revela que o sistema opera em estado de congestionamento por 41,7% do tempo, o que confirma que o congestionamento é um problema persistente em horários de circulação de uma área comercial como o centro, mas que enfrenta pioras em horários de pico conhecidos.

#### 4. Proporção de Horários Congestionados

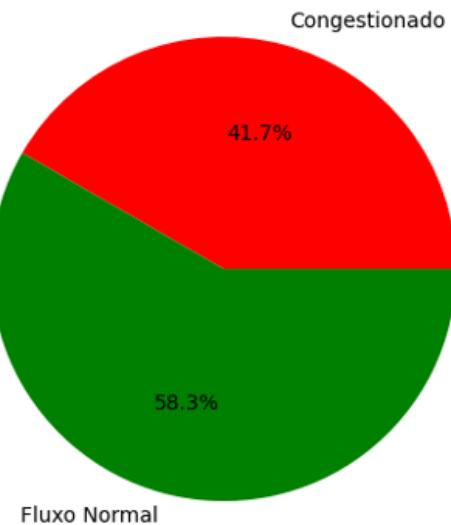


Figura 21 – Proporção de Horários Congestionados

#### 4.1.2.2 Análise Teórica de Congestionamento nos Finais de Semana (Lei de Little)

Em contraste com os dias úteis, a situação nos finais de semana é completamente diferente. A Figura 22 mostra que a taxa de chegada de veículos nunca excede a capacidade do sistema. Isso significa que a demanda de tráfego é sempre menor do que a capacidade dos cruzamentos, permitindo que o trânsito fluia livremente.

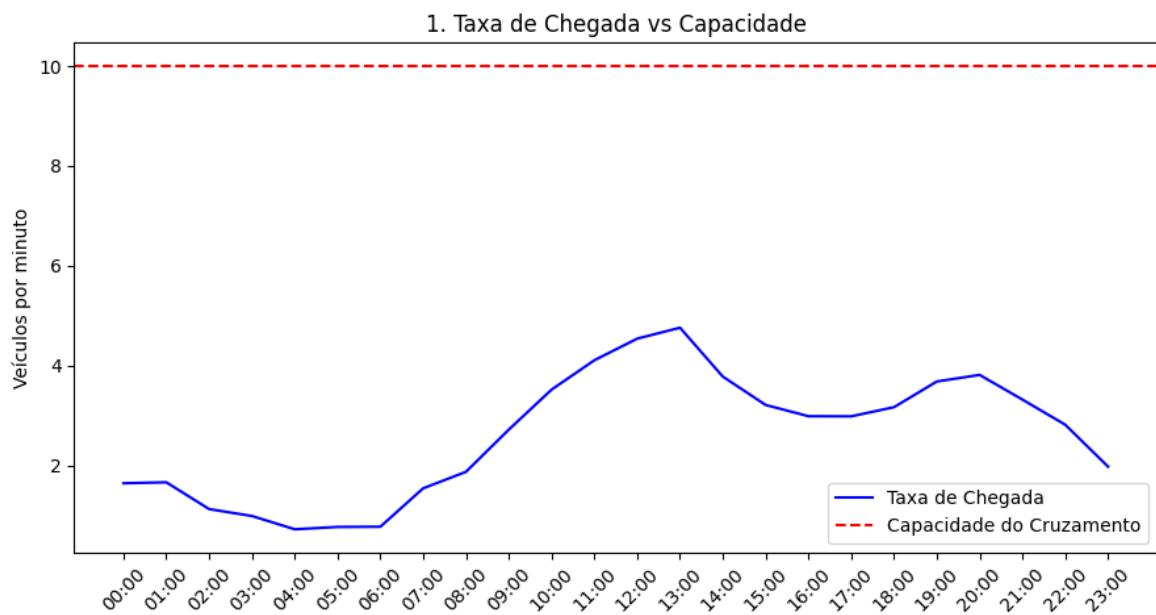


Figura 22 – Taxa de Chegada vs Capacidade (Final de Semana)

A Figura 23 reforça essa observação, indicando que a eficiência do sistema se mantém alta, pois a demanda permanece abaixo de sua capacidade.

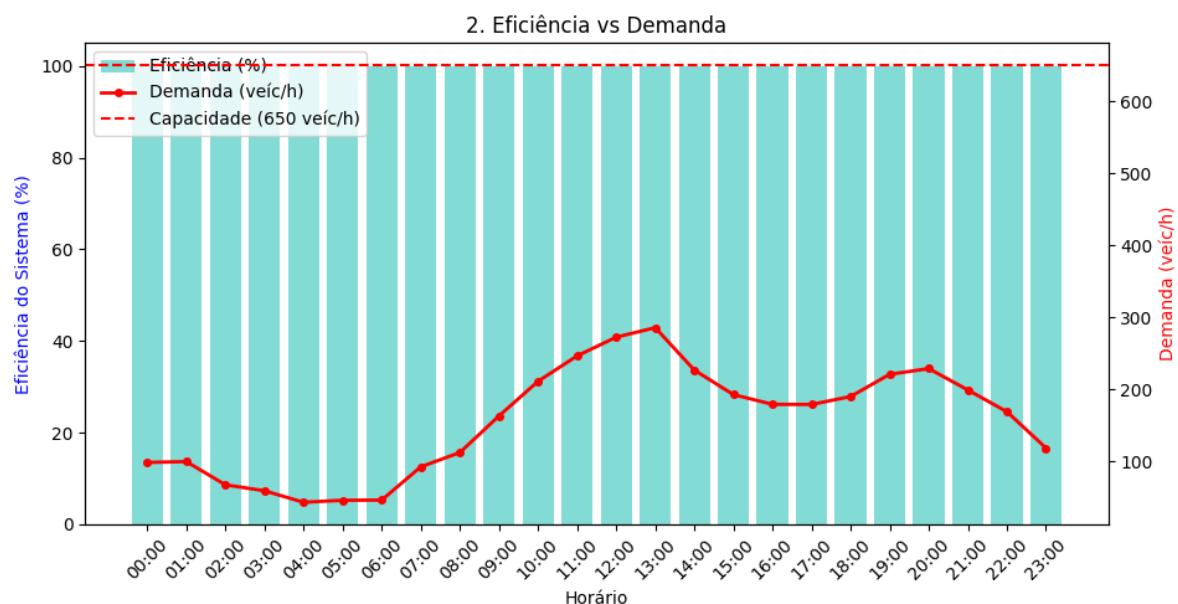


Figura 23 – Eficiência vs Demanda (Final de Semana)

Consequentemente, o Nível de Serviço, ilustrado na Figura 24, se mantém consistentemente nos estados A e B. Esses níveis indicam um trânsito fluindo livremente, com pouca ou nenhuma fila.

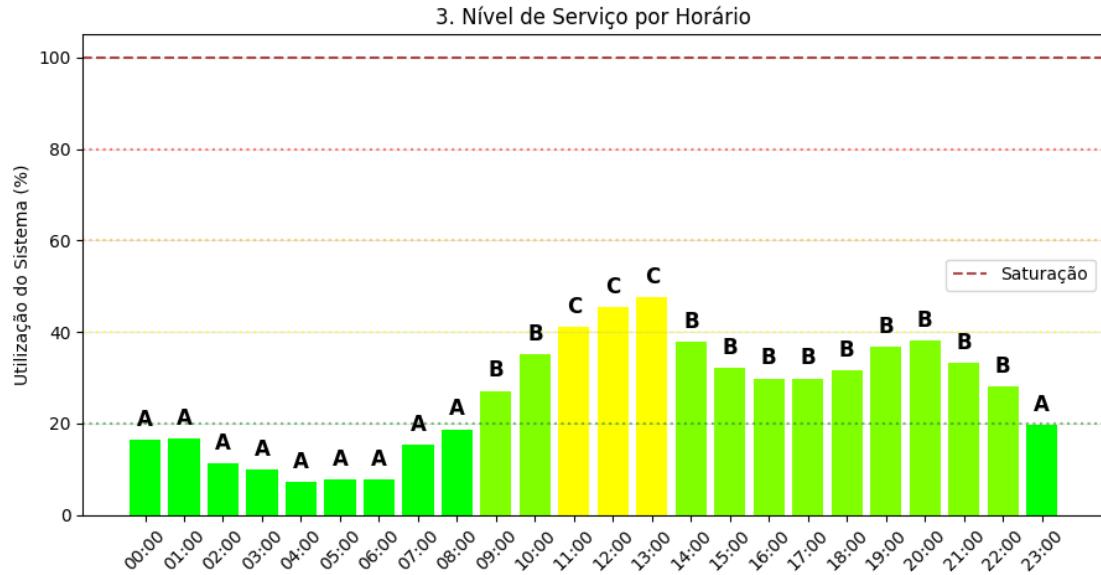


Figura 24 – Nível de Serviço por Horário (Final de Semana)

A Figura 25 resume essa situação, mostrando que a proporção de horários congestionados é de 0%, confirmando a ausência de congestionamento nos finais de semana típicos.

4. Proporção de Horários Congestionados

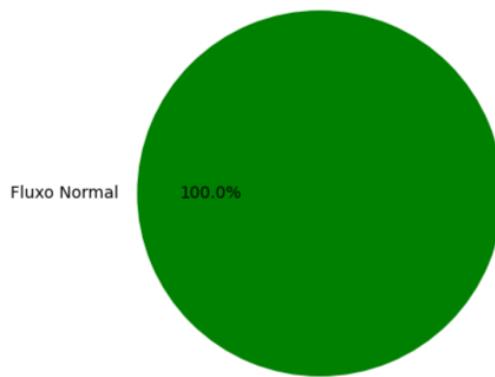


Figura 25 – Proporção de Horários Congestionados (Final de Semana)

#### 4.1.3 Análise Preditiva e de Longo Prazo Utilizando Cadeia de Markov

Para complementar a análise determinística de filas, foi aplicada uma Cadeia de Markov ao cruzamento identificado como mais crítico da rede: a interseção entre a Avenida João Pinheiro e a Rua Goiás (Sentido Sul). Esta abordagem permite modelar a evolução

probabilística dos estados operacionais do cruzamento ao longo do tempo e mostrar a dinâmica temporal do congestionamento.

A partir dos dados históricos de contagem veicular, foram definidos quatro estados operacionais baseados na utilização do sistema ( $\rho = \lambda/\mu$ ): fluxo leve ( $\rho < 0,60$ ), moderado ( $0,60 \leq \rho < 0,70$ ), intenso ( $0,70 \leq \rho < 0,85$ ) e congestionado ( $\rho \geq 0,85$ ). O modelo foi construído observando as transições horárias entre esses estados ao longo de uma semana completa, totalizando 168 observações.

A Matriz de Probabilidade de Transição (Figura 26) quantifica as probabilidades de mudança entre estados consecutivos. Os resultados mostram alta persistência nos estados extremos: fluxo leve apresenta 86,7% de probabilidade de permanecer no mesmo estado, enquanto o estado congestionado possui 90,2% de permanência. Esta característica indica que, uma vez estabelecido, tanto a operação normal quanto o congestionamento tendem a se manter por períodos prolongados. Os estados intermediários (moderado e intenso) mostram maior instabilidade, funcionando como transições entre os estados extremos.

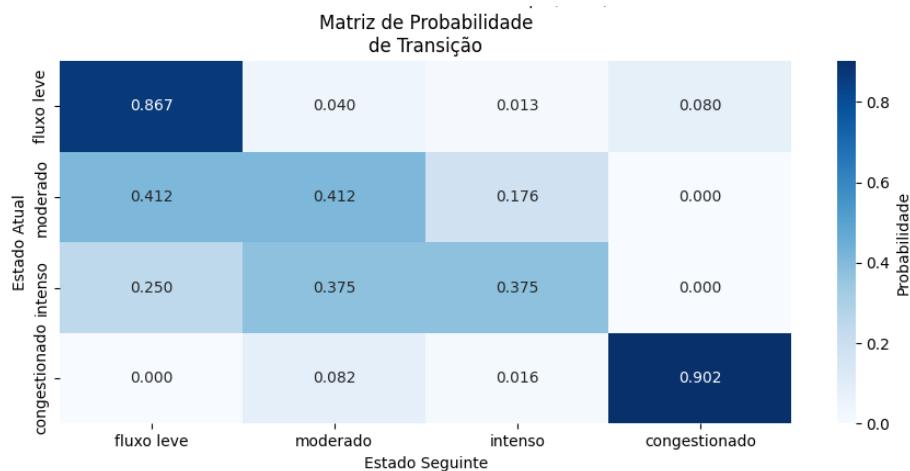


Figura 26 – Matriz de Probabilidade de Transição

Com base nesta matriz de transição, foi realizada uma simulação da evolução temporal dos estados ao longo de 168 passos (equivalente a uma semana). A Figura 27 apresenta os resultados desta simulação, revelando a alternância característica entre períodos de operação normal e episódios de congestionamento. A modelagem demonstra que o cruzamento não permanece constantemente em um único estado, mas oscila de acordo com padrões temporais identificáveis, com períodos de estabilidade intercalados por transições abruptas entre estados operacionais.

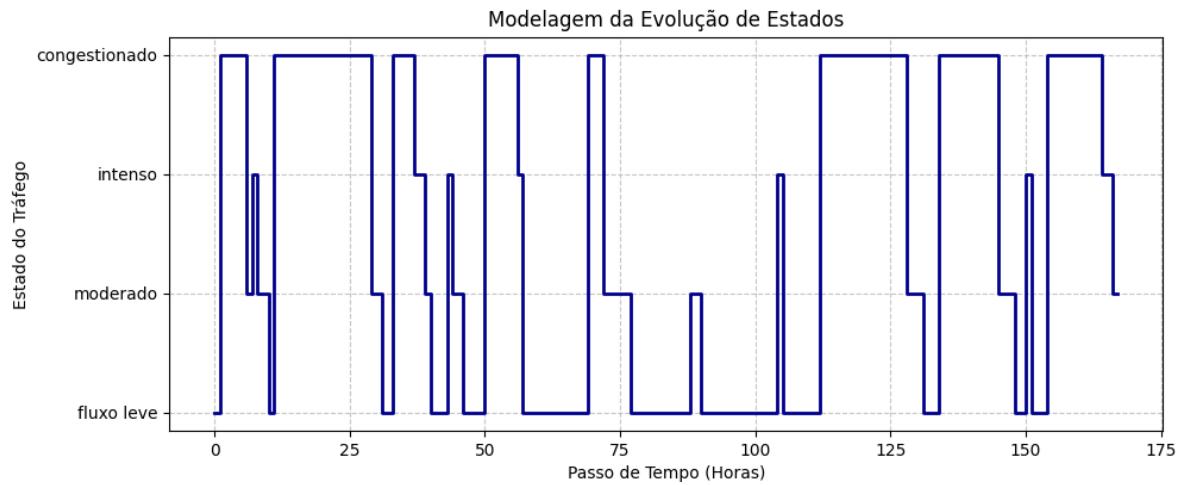


Figura 27 – Evolução dos Estados da Cadeia de Markov em 168 Passos

A distribuição de longo prazo dos estados, ilustrada na Figura 28, revela que o cruzamento opera aproximadamente 38,1% do tempo em fluxo leve, 43,5% em estado congestionado, 13,1% em condições moderadas e apenas 5,4% em estado intenso. Esta distribuição indica um sistema que alterna predominantemente entre operação normal e sobrecarga crítica, com poucos períodos em estados intermediários.

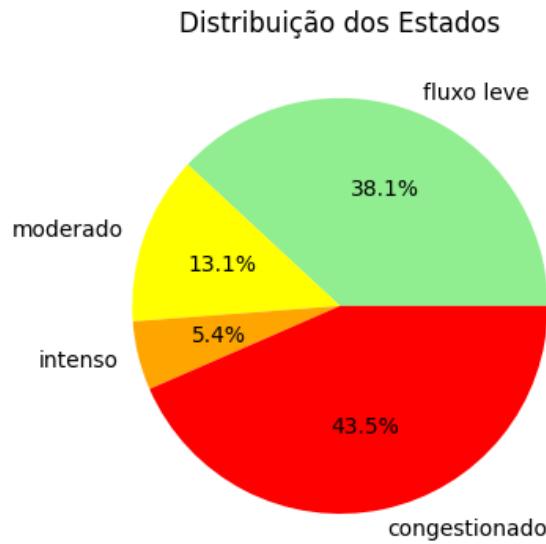


Figura 28 – Distribuição dos Estados da Simulação

A validação do modelo é apresentada na Figura 29, que compara a distribuição de estados observada nos dados históricos com a distribuição gerada pela simulação da Cadeia de Markov. A proximidade entre as duas distribuições, apesar de valores extremos um pouco diferentes, mostra que o modelo consegue reproduzir os padrões temporais reais

do tráfego, validando sua capacidade preditiva para análises de longo prazo e planejamento de intervenções.

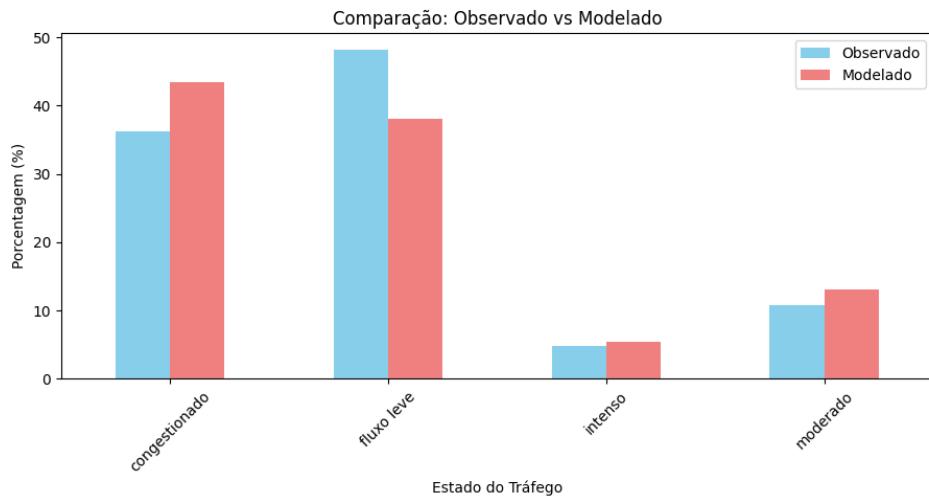


Figura 29 – Comparaçāo entre Real e Modelada

## 4.2 Resultados do Módulo 2: Simulação da Rede Viária

A simulação Monte Carlo da rede viária foi conduzida através de uma série de experimentos para avaliar o impacto de diferentes parâmetros na performance do sistema. O objetivo principal foi validar os gargalos identificados no Módulo 1 e expandir a análise, mostrando que, mesmo com dados parciais e uma metodologia simples, é possível observar o efeito de cascata do tráfego e a interconexão do problema na malha urbana.

### 4.2.1 Metodologia e Configuração dos Experimentos

Os experimentos foram planejados para testar o impacto de três parâmetros fundamentais: a concentração do tráfego, a taxa de saída dos veículos da rede e a capacidade física das filas. A Tabela 2 resume as configurações testadas.

Experimento	Concentração Avenidas	Taxa Saída	Capacidade Fila	Objetivo
0	60%	100%	120	Validação do cruzamento crítico isolado
1	60%	35%	120	Análise com tráfego disperso e baixa saída
2	60%	80%	120	Análise com tráfego disperso e alta saída
3	75%	35%	120	Análise com tráfego concentrado e baixa saída
4	75%	80%	120	Análise com tráfego concentrado e alta saída
5	60%	80%	60	Validação com capacidade física realista

Tabela 2 – Configurações dos experimentos realizados na simulação da rede viária.

A Tabela 3 apresenta uma síntese do desempenho de cada experimento. As métricas de rejeição e veículos processados revelam padrões claros que serão detalhados a seguir.

Experimento	Concentração	Taxa Saída	Rejeições/dia	Processados/dia	Taxa Aproveit.
0	60%	100%	2.067	8.104	79,8%
1	60%	35%	~17.000	~32.000	~65%
2	60%	80%	~8.000	~43.000	~84%
3	75%	35%	~17.000	~32.000	~65%
4	75%	80%	~8.000	~43.000	~84%
5	60%	80%	~23.000	~26.000	51,4%

Tabela 3 – Comparaçāo de performance entre todos os experimentos realizados.

#### 4.2.2 Experimento 0: Validação do Gargalo Crítico

O Experimento 0 analisou o cruzamento João Pinheiro x Goiás (sentido Sul) isoladamente, ponto identificado no Módulo 1 como o de maior fluxo de tráfego. O objetivo foi testar se o gargalo real se manifestaria como gargalo na simulação de forma isolada, antes da expansão para a rede completa.

Os resultados revelam um cenário crítico: o cruzamento isolado processou apenas 8.104 veículos, rejeitando 2.067 dos 10.171 veículos que tentaram ingressar, resultando em uma taxa de rejeição de 20,2%. Este valor elevado, mesmo em condições ideais (cruzamento isolado, sem interferências de outros pontos da rede), evidencia a severidade da saturação do sistema. A Figura 30 ilustra que a fila permanece em sua capacidade máxima (120 veículos) durante todo o horário comercial (8h-20h), caracterizando um estado de congestionamento persistente.

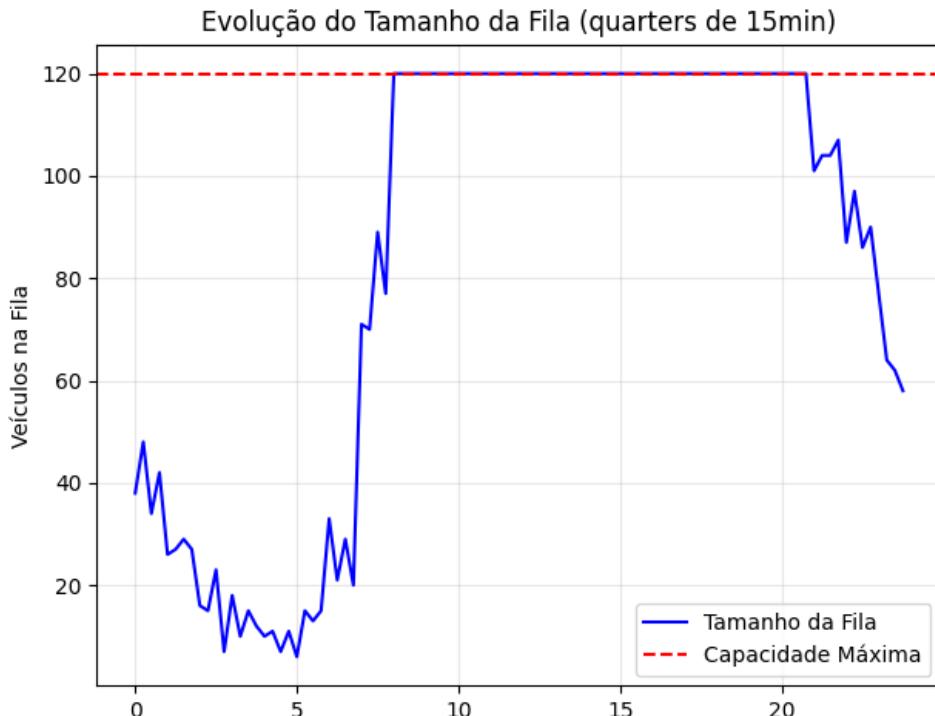


Figura 30 – Evolução do tamanho da fila no cruzamento crítico isolado.

A Figura 31 reforça esse ponto, mostrando que as rejeições não são pontuais, mas

sim sistemáticas e concentradas no período de maior demanda (8h-20h). Os picos mais severos ocorrem nos horários tradicionais de trânsito (12h-14h e 18h-19h), mas o sistema permanece saturado mesmo nos intervalos entre esses picos, indicando que a capacidade está fundamentalmente subdimensionada para a demanda real.

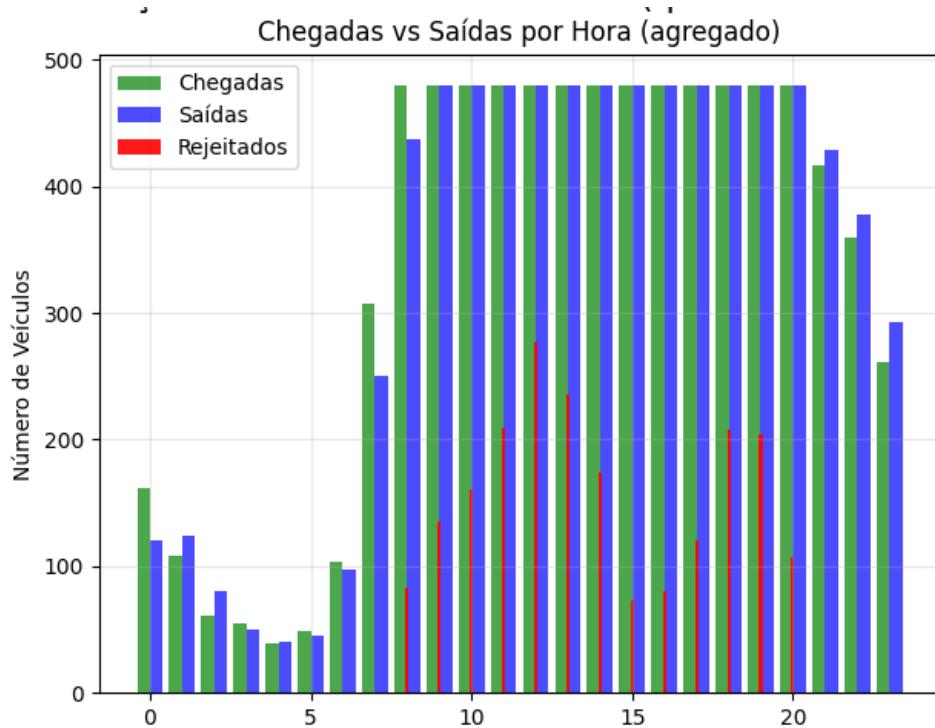
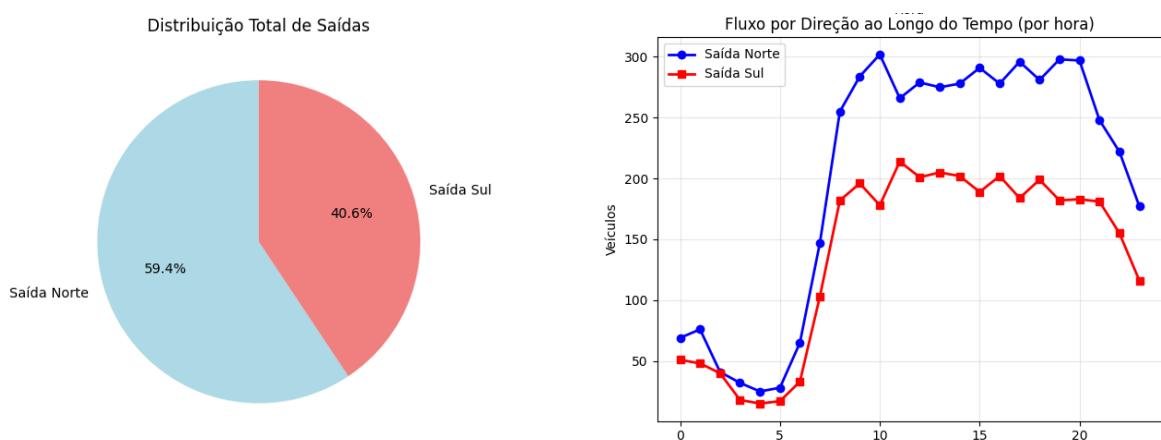


Figura 31 – Chegadas, saídas e rejeições por hora no cruzamento isolado.

A análise da distribuição de fluxo, apresentada na Figura 32, revela que a Saída Norte representa 59,4% do tráfego total, enquanto a Saída Sul responde por 40,6%. A Figura 32b mostra que ambas as direções apresentam volumes elevados nos horários de pico, com a Saída Norte atingindo aproximadamente 300 veículos/hora e a Saída Sul cerca de 200 veículos/hora nos períodos críticos.



(a) Distribuição Total de Saídas

(b) Fluxo por Direção (por hora)

Figura 32 – Análise da distribuição do fluxo no cruzamento crítico isolado.

O resultado mais significativo deste experimento é que, mesmo isolado e sem interferências de outros pontos da rede, o cruzamento já apresenta uma taxa de rejeição de 20,2%. Este dado tem implicações importantes para a análise sistêmica:

1. Base de Referência de Severidade: A taxa de 20,2% estabelece um piso de desempenho crítico. Quando este cruzamento for integrado à rede completa e interagir com outros pontos de congestionamento, espera-se que sua performance se deteriore ainda mais.
2. Validação do Gargalo: O alto percentual de rejeição confirma que o cruzamento João Pinheiro x Goiás (S) é, de fato, um gargalo estrutural, não apenas um ponto de lentidão momentânea.
3. Limitação de Soluções Pontuais: O fato de que o cruzamento já está saturado em condições ideais (isolado) indica que melhorias localizadas neste ponto terão impacto limitado. Aumentar apenas a capacidade da fila permitiria que mais veículos aguardassem, mas não resolveria o gargalo de processamento. Já dobrar a taxa de serviço do cruzamento, embora tecnicamente viável, exigiria intervenções físicas significativas (ampliação de vias e mudança nos tempos semafóricos) que impactariam os cruzamentos adjacentes, reforçando a natureza sistêmica do problema.

Este comportamento evidencia a severidade do gargalo: o cruzamento João Pinheiro x Goiás (S) apresenta saturação mesmo em condições ideais, sem interferências de outros pontos da rede. A taxa de rejeição de 20,2% estabelece um valor mínimo de desempenho crítico que servirá como referência para a análise da rede completa. Quando integrado ao sistema viário, este gargalo individual propagará seus efeitos para cruzamentos adjacentes, amplificando o cenário de congestionamento. Os experimentos subsequentes quantificarão o agravamento deste e investigarão como as interações sistêmicas entre múltiplos pontos saturados intensificam o problema observado.

#### 4.2.3 Comparativo 1: O Impacto da Taxa de Saída (Exp. 1 vs. Exp. 2)

A comparação entre os Experimentos 1 e 2 foi projetada para apresentar o impacto da taxa de saída no sistema. Os cenários simulam um comportamento em que o tráfego é mais disperso pela rede (60% de concentração nas avenidas), com uma taxa de saída baixa (Experimento 1) e uma alta (Experimento 2). O objetivo é demonstrar como uma boa rotatividade alivia o sistema.

A Figura 33 ilustra o efeito transformador da alta rotatividade. O Experimento 1 (33a) (com taxa de saída de 35%) processa aproximadamente 32.000 veículos por dia, rejeitando cerca de 17.000. Em contraste, o Experimento 2 (33b) (taxa de saída de 80%)

processa cerca de 43.000 veículos, com uma queda drástica nas rejeições diárias. Isso mostra que a taxa de saída tem um impacto direto no volume de veículos que o sistema consegue processar.



(a) (60% + 35% saída) - Exp. 1



(b) (60% + 80% saída) - Exp. 2

Figura 33 – Evolução do Tráfego nos Experimentos 1 e 2

A análise nas Figuras 34 e 35 detalha o impacto do congestionamento nos cruzamentos. A Figura 34 (Experimento 1) mostra o alto número de rejeições no cruzamento Goiás-AfPena no horário comercial, com um pico de mais de 1.000 veículos rejeitados por hora.

Este resultado corrobora os achados do Módulo 1, que identificou o cruzamento JPin-Goiás (Sentido Sul) como ponto crítico. A conexão entre ambos é relevante: o fluxo veicular proveniente de JPin-Goiás direciona-se para Goiás-AfPena, sugerindo propagação de congestionamento ao longo deste corredor viário. Além disso, os outros cruzamentos são saídas ou vizinhos diretos de entradas e saídas, reforçando o impacto da propagação do trânsito para os adjacentes.

A Figura 35 (Experimento 2), por sua vez, mostra uma redução drástica das rejeições. Porém, ambas as figuras validam ainda que o cruzamento mencionado anteriormente é o gargalo principal do sistema, independentemente da taxa de saída, repercutindo em cruzamentos próximos.

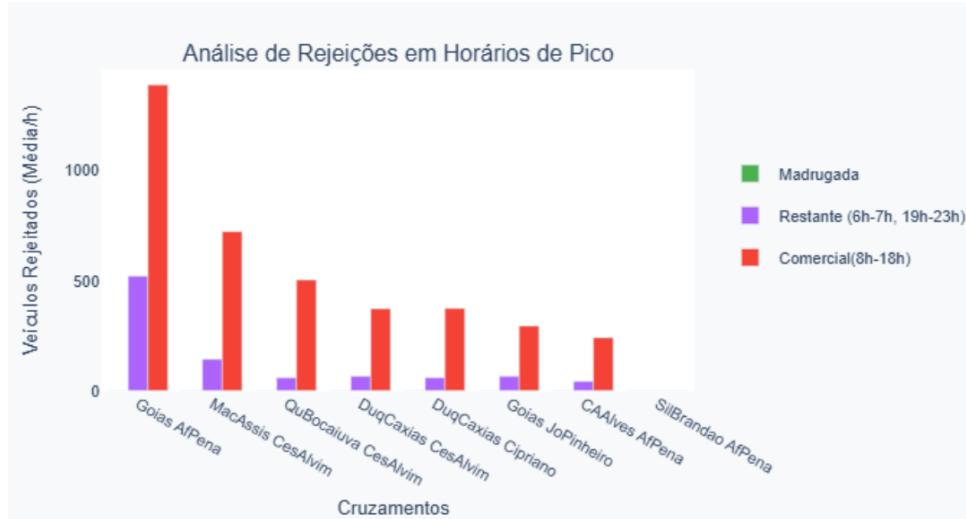
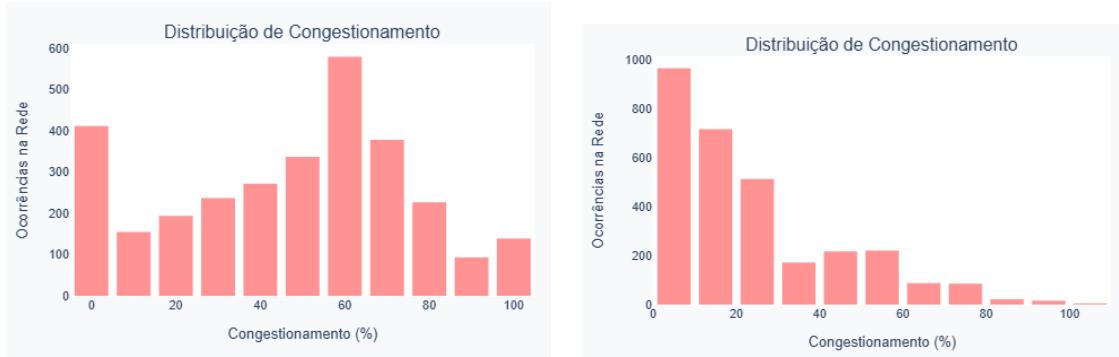


Figura 34 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 1



Figura 35 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 2

A Figura 36 ilustra a transformação qualitativa do sistema. O Experimento 2 mostra uma migração massiva de interseções da faixa de saturação (60-70% de ocupação) para a faixa de operação fluida (0-20% de ocupação), demonstrando que a alta taxa de saída permite que o sistema opere de forma significativamente mais eficiente.



(a) Distribuição de Ocupação - Exp. 1      (b) Distribuição de Ocupação - Exp. 2

Figura 36 – Comparaçao da distribuição do congestionamento (Experimentos 1 e 2)

Os mapas de fluxo (Figuras 37 e 38) mostram a distribuição espacial do congestionamento. O mapa do Experimento 1 (Figura 37) apresenta uma ampla propagação do congestionamento (cores laranja e vermelha) por toda a rede. Em contraste, o mapa do Experimento 2 (Figura 38) demonstra uma melhora significativa, com a maioria dos nós nas cores verde e amarela, apesar de manter praticamente os mesmos pontos de atenção. Isso prova que a alta rotatividade não apenas reduz as rejeições, mas também mitiga o espalhamento do congestionamento.

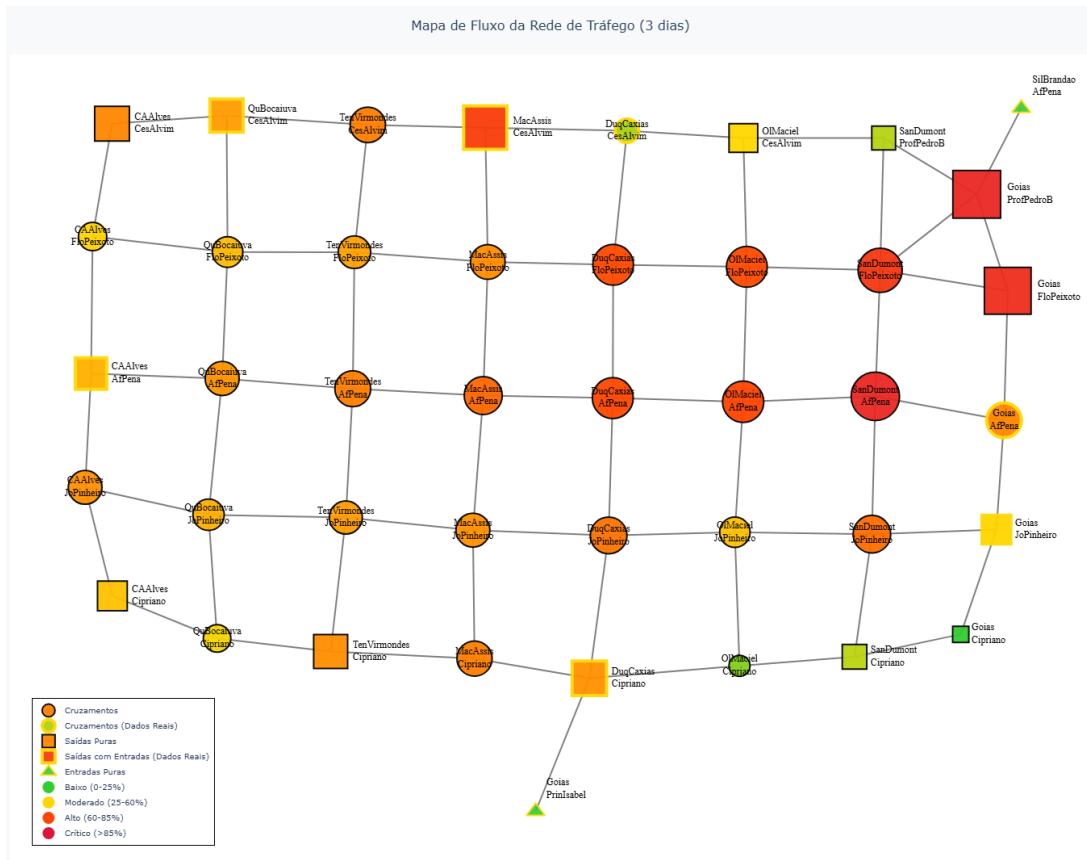


Figura 37 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 1

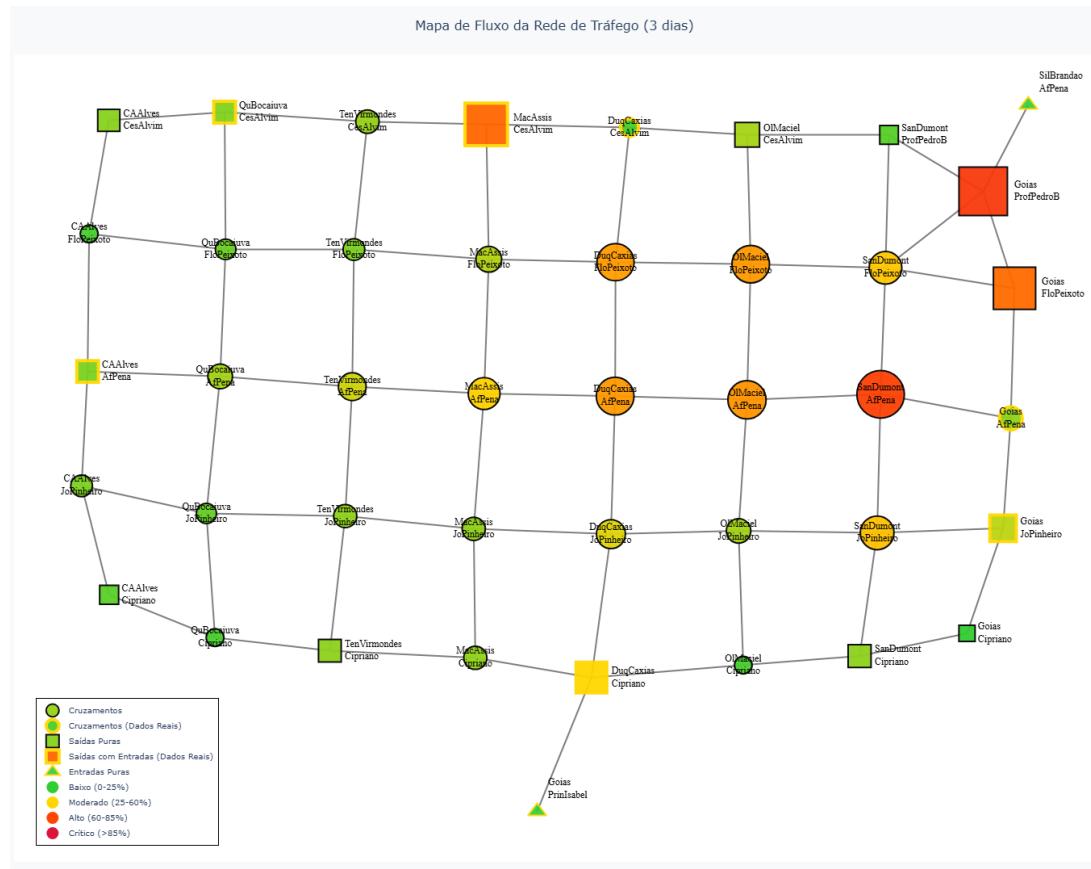
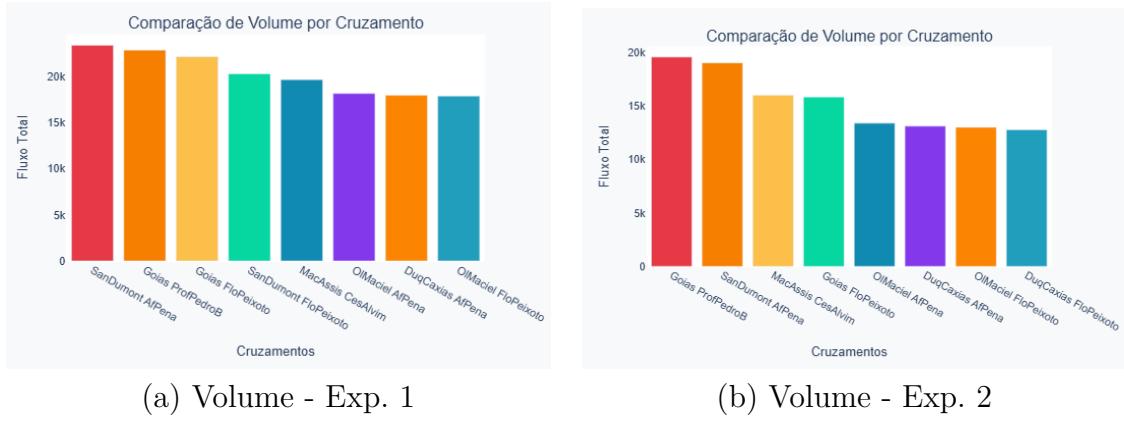


Figura 38 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 2

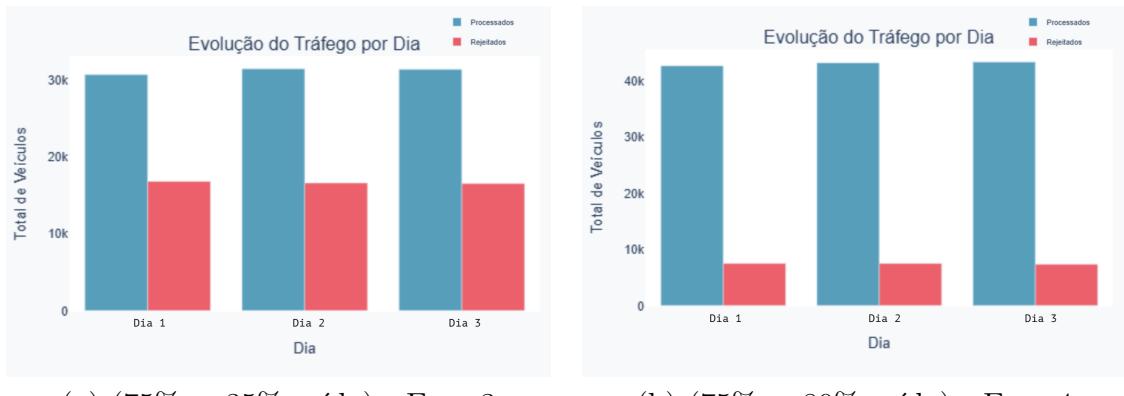
A Figura 39 mostra o ranking dos cruzamentos com maior fluxo total. A alta taxa de saída no Experimento 2 permite que os principais cruzamentos com alto fluxo, como o Goiás-ProfPedroB e SanDumont-AfPena, processem volumes significativamente maiores. Contudo, a análise do fluxo total de um cruzamento pode gerar uma falsa sensação de fluidez. Um alto volume processado não garante a ausência de congestionamento, pois a fila de veículos pode estar tão extensa que impede a entrada de novos carros provenientes de seus vizinhos, levando estes a um alto número de rejeições. Essa distinção ressalta que a eficiência real de um sistema de tráfego deve ser avaliada não apenas pelo fluxo, mas também por métricas de desempenho, como filas e tempos de espera.



#### 4.2.4 Comparativo 2: O Impacto do Padrão de Distribuição (Exp. 3 vs. Exp. 4)

Este comparativo valida a estabilidade das conclusões anteriores, replicando a análise com uma configuração de roteamento mais realista, em que o tráfego se concentra mais nas avenidas principais (75% de concentração). O objetivo é demonstrar que a taxa de saída continua sendo um fator dominante, independentemente do padrão de distribuição adotado.

A Figura 40 demonstra novamente o salto na performance do sistema com a taxa de saída aumentada e seu reflexo na diminuição de rejeições. Enquanto o Experimento 3 (taxa de saída de 35%) processa apenas cerca de 32.000 veículos por dia, o Experimento 4 (taxa de saída de 80%) eleva esse número para cerca de 43.000, com uma queda drástica nas rejeições diárias. Esse resultado, idêntico ao do Comparativo 1, comprova que a taxa de saída é o fator dominante na capacidade do sistema, superando o impacto da concentração de tráfego nas avenidas.



A análise nas Figuras 41 e 42 mostra que, apesar da melhoria geral, o gargalo

Goiás-AfPena, seguido pela MacAssis-CesAlvim, se manteve como o ponto mais crítico devido ao número de rejeições, o que valida a identificação do gargalo como um problema estrutural da rede. A alta taxa de rejeição no Experimento 3 (Figura 41) (cerca de 1400 veículos por hora no período comercial) é drasticamente mitigada no Experimento 4 (Figura 42) (aproximadamente 800 veículos por hora no período comercial), mas o ranking dos gargalos permanece praticamente inalterado.



Figura 41 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 3



Figura 42 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Experimento 4

Os Mapas de Fluxos da Rede de Tráfego mostram uma mudança drástica na distribuição do congestionamento. O Experimento 3 (43) apresenta uma alta saturação (cores laranja e vermelha) espalhada por grande parte da rede. Em contraste, o Experimento 4 (44) mostra um sistema muito mais fluido, com a maioria das interseções nas cores verde e amarela, exceto pela avenida localizada no meio da malha, dificultando o acesso às saídas,

mas comprovando que o fluxo estava seguindo a concentração nas rotas principais, como desejado.

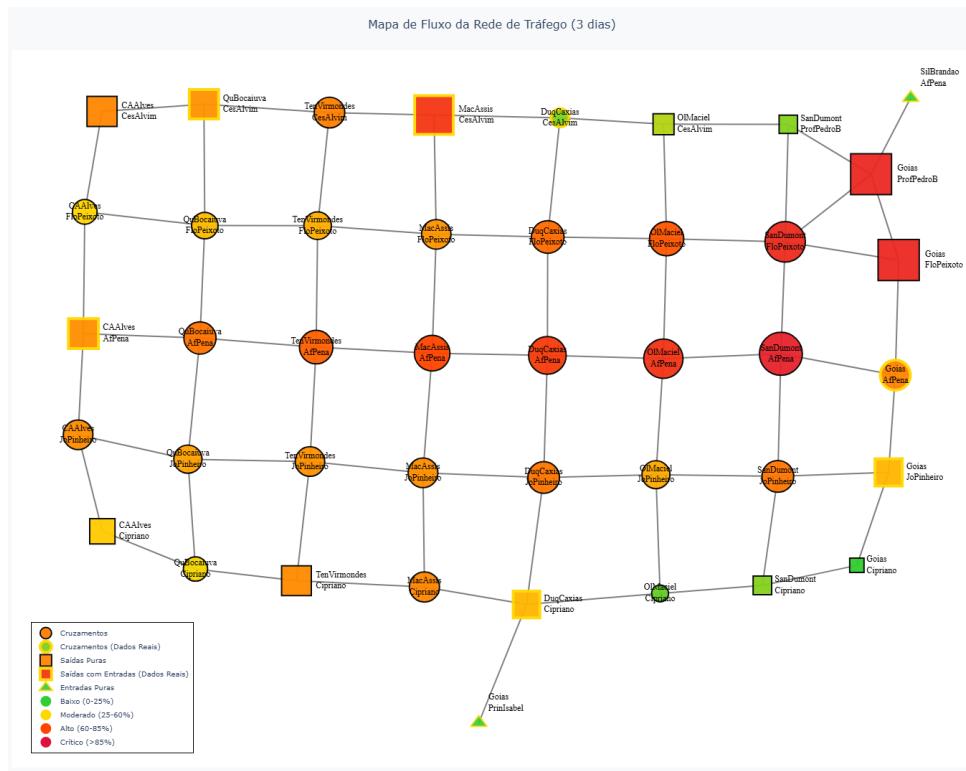


Figura 43 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 3

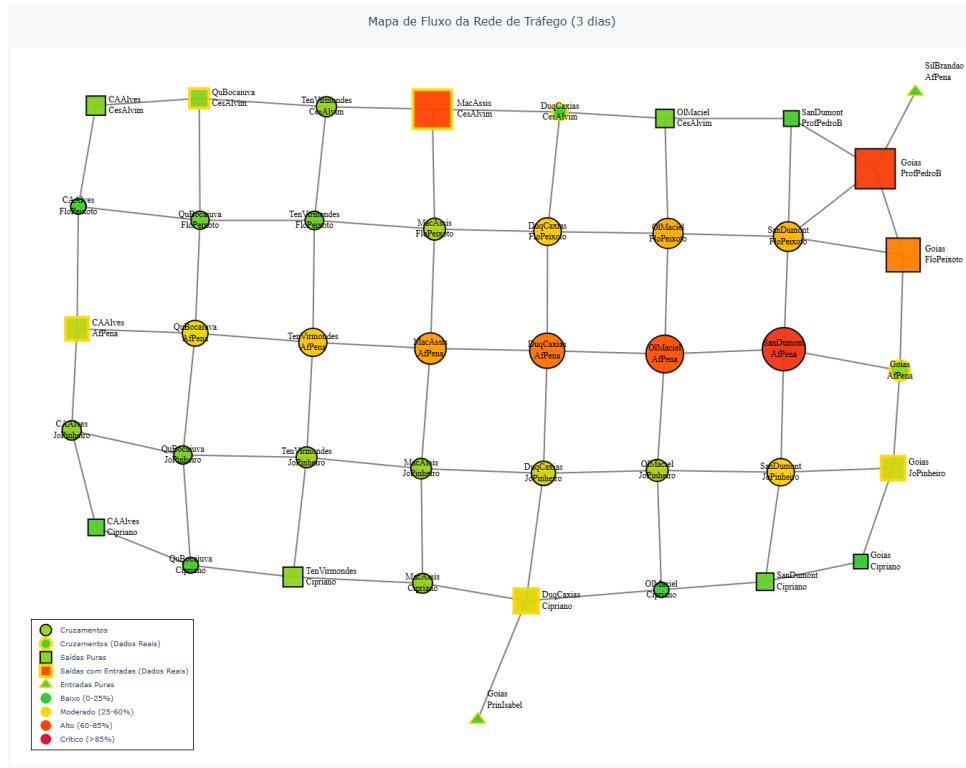


Figura 44 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 4

A Figura 45 reflete a melhora qualitativa da rede. No Experimento 4 (45b), com uma taxa de saída de 80%, a distribuição de congestionamento é concentrada nas faixas de 0 a 30%, indicando um sistema predominantemente fluido. Isso reforça que uma maior capacidade de saída dos cruzamentos resulta em uma rede mais eficiente e com menor ocorrência de saturação.

Em contraste, a distribuição do Experimento 3 (45a), com uma taxa de saída de apenas 35%, apresenta um comportamento de picos. A rede oscila entre períodos de baixa e alta fluidez, com uma ocorrência significativa de congestionamento que atinge entre 70% e 80% e chega até a saturação total (100%). Essa distribuição revela que uma limitação na capacidade de saída cria gargalos que não apenas retêm o tráfego, mas também induzem uma propagação deste no sistema, confirmando a dominância da taxa de saída como um dos parâmetros mais influentes para o desempenho da rede.

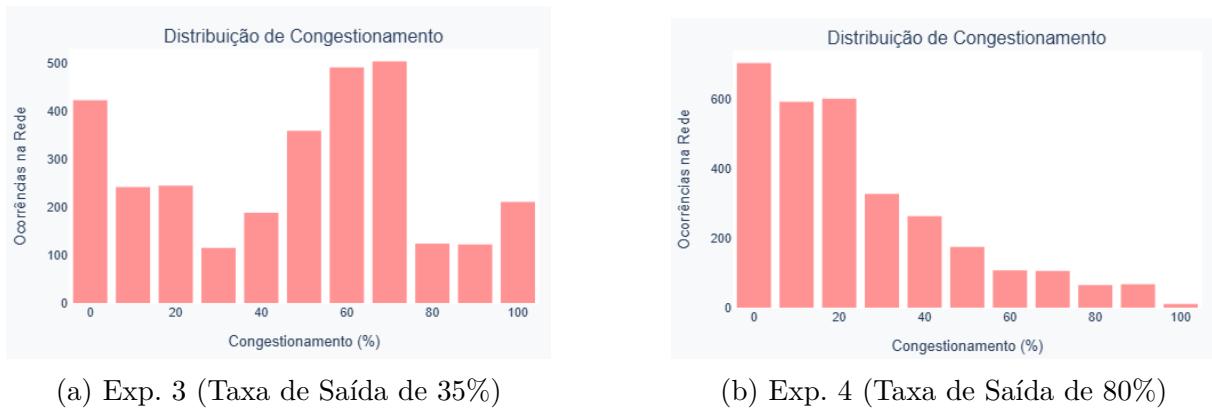


Figura 45 – Comparaçāo da distribuição do congestionamento (Experimentos 3 e 4).

A Figura 46 mostra o ranking dos cruzamentos com maior fluxo total. O cruzamento entre a Rua Santos Dumont e a Avenida Afonso Pena se destaca por liderar o número de veículos processados, seguido de perto pelo cruzamento entre a Rua Goiás e a Rua Professor Pedro Bernardo. Estes são saída e vizinho de entrada, respectivamente, o que mostra que o problema central do congestionamento não reside no volume de tráfego em si, mas sim na capacidade de processamento das interseções.

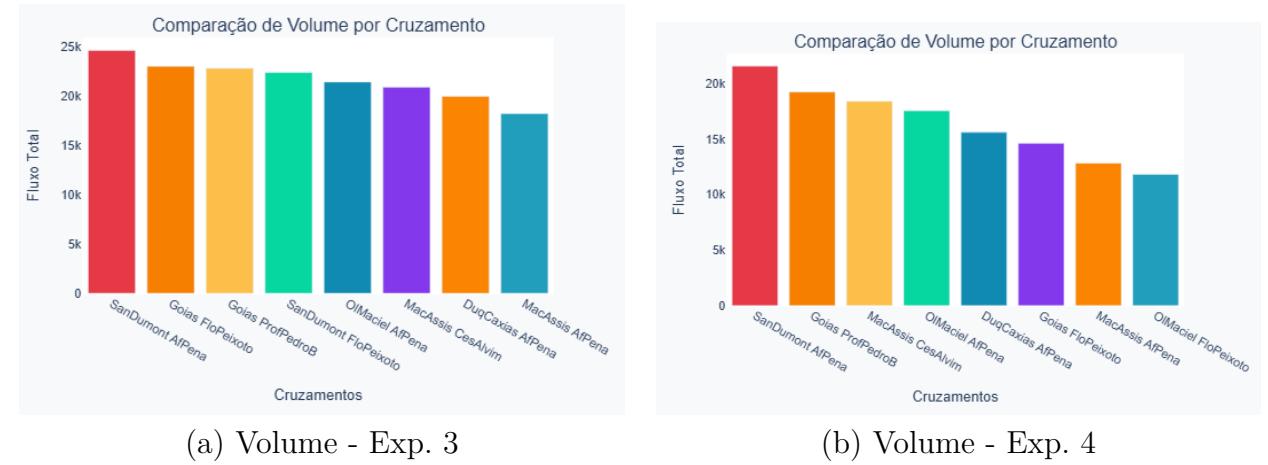
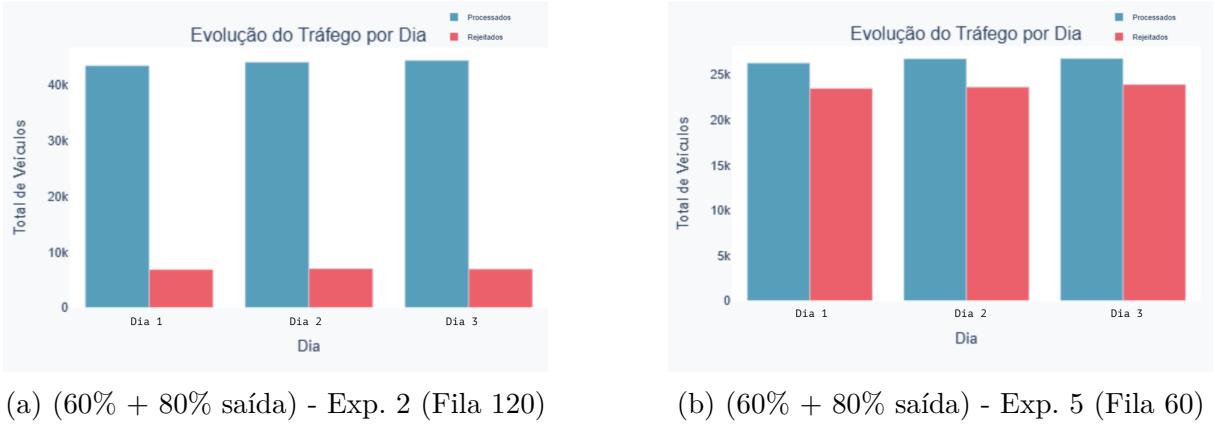


Figura 46 – Comparação de Volume por Cruzamento entre os Experimentos 3 e 4.

#### 4.2.5 Comparativo 3: O Impacto da Capacidade Física (Exp. 2 vs. Exp. 5)

Este é o comparativo mais crítico. Ele contrasta o cenário otimista (Experimento 2, com fila de 120 veículos) com um cenário realista de menor capacidade física (Experimento 5, fila de 60 veículos). O objetivo é provar que esta, e não apenas o comportamento operacional da rede, é o fator limitante final para o tráfego urbano.

As Figuras 47a e 47b demonstram o impacto da capacidade física no desempenho global. Enquanto o Experimento 2 (fila de 120) processou mais de 43.000 veículos por dia, o Experimento 5 (fila de 60) processou apenas 26.000 veículos, com uma taxa de rejeição que saltou para 48,6%. Isso evidencia o gargalo do sistema quando a capacidade de armazenamento de veículos é limitada.



(a) (60% + 80% saída) - Exp. 2 (Fila 120) (b) (60% + 80% saída) - Exp. 5 (Fila 60)

Figura 47 – Evolução do Tráfego nos Experimentos 2 e 5.

A análise abaixo (Figuras 48 e 49) mostra a diferença na magnitude do congestionamento. No Experimento 2 (Figura 48), as rejeições são significativas, mas controladas. No Experimento 5 (Figura 49), os números de rejeição em todos os gargalos são dramaticamente maiores, evidenciando propagação, com o pico no cruzamento Goiás-Afonso Pena superando 1.300 rejeições por hora.



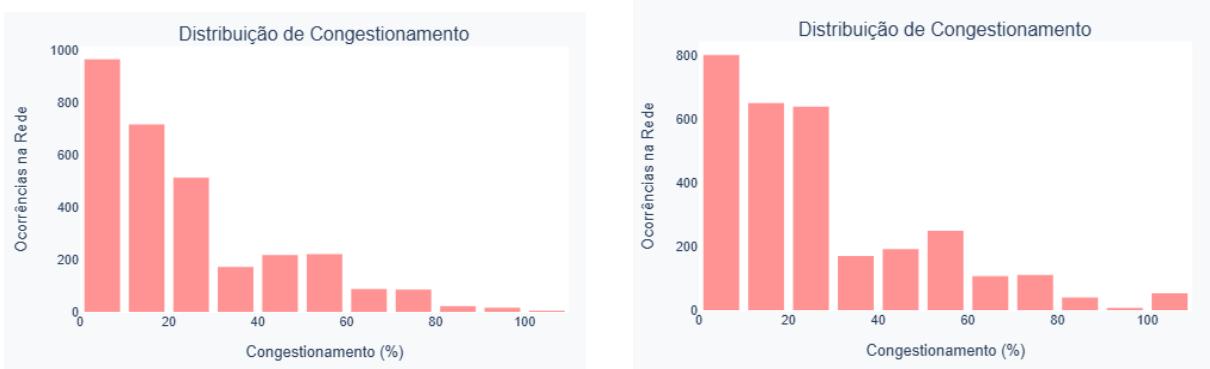
Figura 48 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Exp. 2 (Fila 120)



Figura 49 – Análise de Rejeições em Horários de Pico - Exp. 5 (Fila 60)

As Figuras 50a e 50b mostram a mudança qualitativa da rede. No Experimento 2 (Figura 50a), a maioria das ocorrências está nas faixas de 0-30%, indicando um sistema mais fluido.

Em contraste, o Experimento 5 (Figura 50b) apresenta uma distribuição com uma concentração surpreendentemente alta nas faixas mais baixas. Essa aparente fluidez, no entanto, é uma ilusão causada pela alta taxa de rejeição (48%) do sistema. Isso significa que o tráfego não está fluindo de maneira eficiente, e sim sendo impedido de entrar na fila devido à saturação. A distribuição reflete o tráfego que consegue passar, e não o volume total da demanda, reforçando que a alta taxa de rejeição é, por si só, um forte indicador de gargalos, mostrando que o problema não é apenas o congestionamento visível, mas a incapacidade do sistema de processar a demanda.



(a) Distribuição de Congestionamento - Exp. 2 (Fila 120)      (b) Distribuição de Congestionamento - Exp. 5 (Fila 60)

Figura 50 – Comparaçāo da distribuiçāo do congestionamento (Experimentos 2 e 5).

A comparação de volume por cruzamento abaixo (Figuras 51a e 51b) demonstra que a capacidade física limita o fluxo total. No Experimento 2 (Figura 51a), os principais cruzamentos processam volumes elevados (aproximadamente 20.000 veículos). No Experimento 5 (Figura 51b), o volume máximo processado cai para cerca de 12.000, evidenciando que a capacidade física da fila se torna um gargalo para o fluxo total.

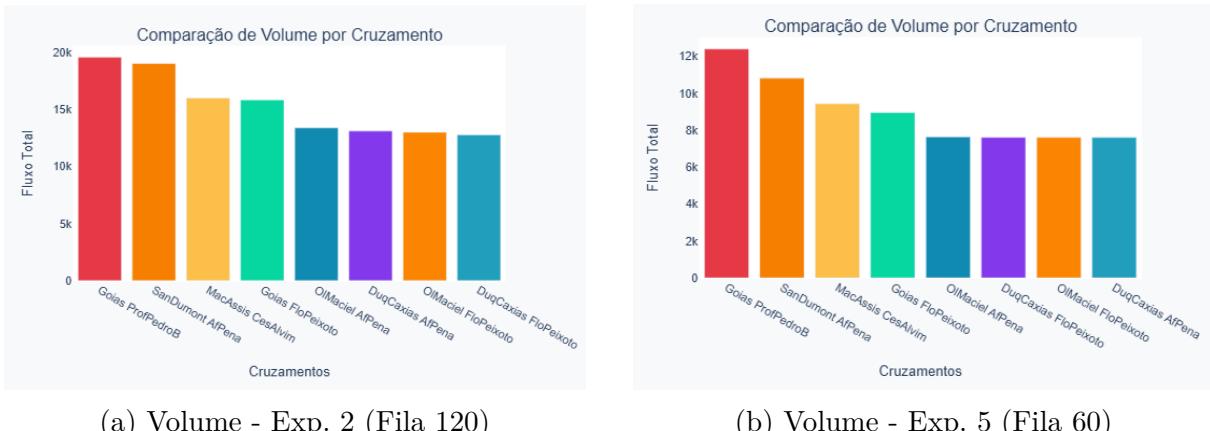


Figura 51 – Comparaçāo de Volume por Cruzamento entre os Experimentos 2 e 5.

O Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego ilustra a pequena, porém ilusória, diferença entre os dois cenários. O mapa do Experimento 2 (Figura 52) mostra uma rede relativamente fluida, assim como o mapa do Experimento 5 (Figura 53). Contudo, como vimos acima, o fluxo evidencia veículos passando, o que não acontece no Experimento 5 devido à alta rejeição de veículos e ao tamanho da fila.

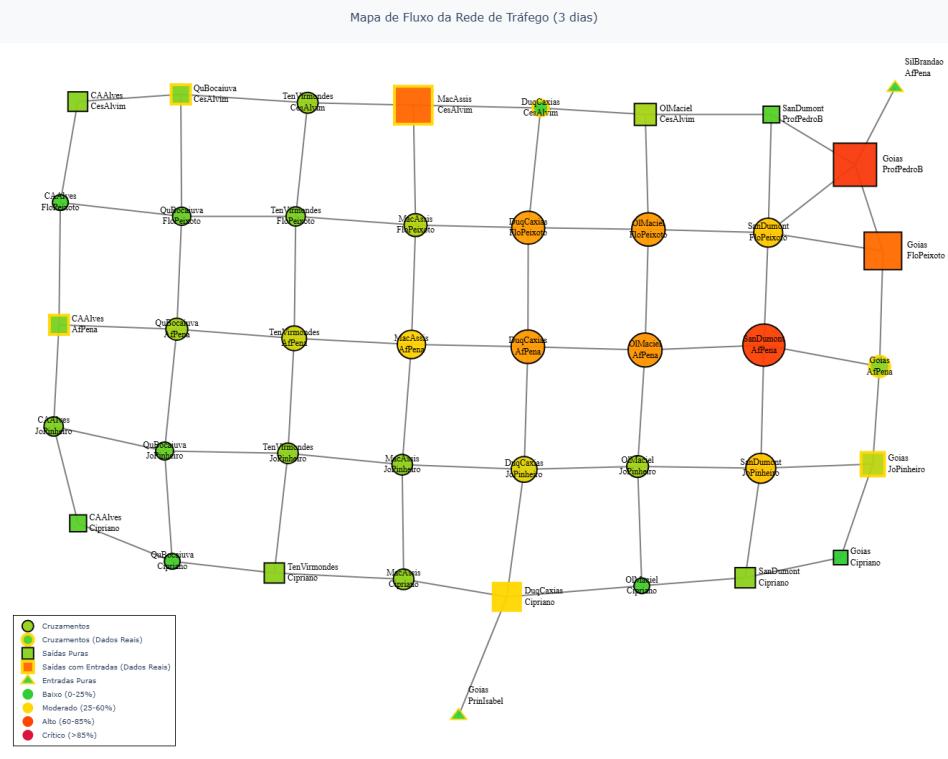


Figura 52 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 2 (Fila 120)

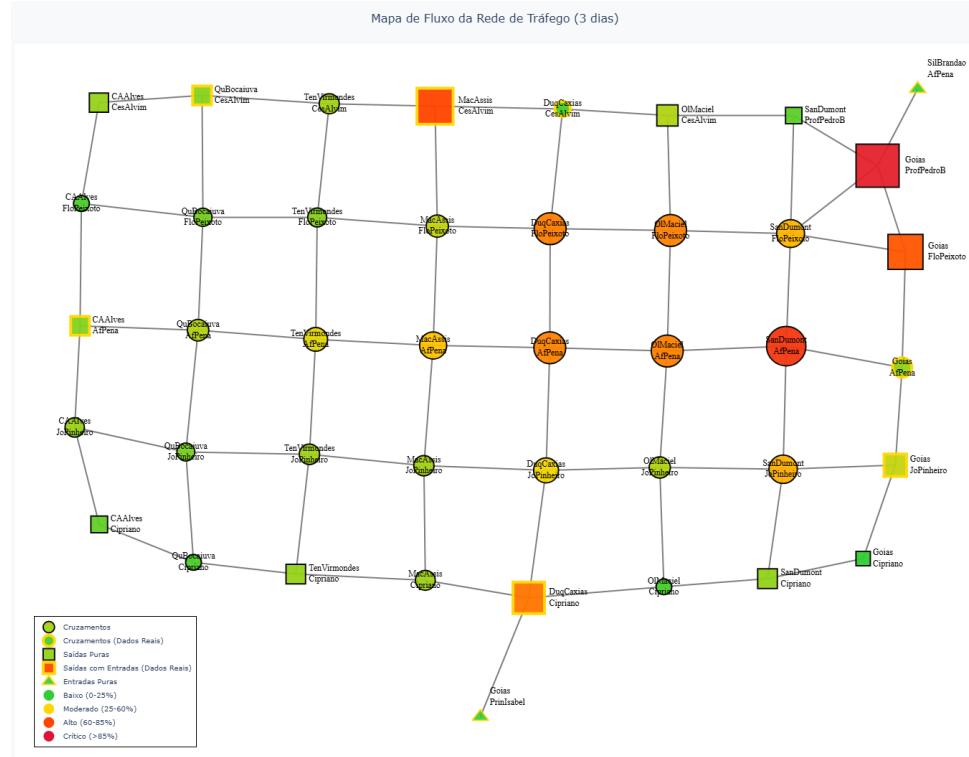


Figura 53 – Mapa de Fluxo da Rede de Tráfego - Experimento 5 (Fila 60).

#### 4.2.6 Avaliação dos Experimentos

A análise comparativa e experimental da rede viária central de Uberlândia revelou fenômenos de tráfego que validam o diagnóstico de saturação estrutural. Os resultados demonstraram que o congestionamento não é um problema pontual, mas um fenômeno sistêmico. Interseções vizinhas aos gargalos críticos migram progressivamente de estados operacionais favoráveis para estados críticos, confirmando que as soluções para a mobilidade urbana requerem uma abordagem de rede e não apenas intervenções isoladas.

Os resultados obtidos confirmam a capacidade da metodologia de simulação de capturar corretamente os padrões de tráfego, mesmo com dados de entrada limitados. A hierarquia de gargalos, os padrões temporais dos picos e a propagação do congestionamento demonstraram consistência interna em todos os cenários. Em particular, a identificação do cruzamento Goiás-AfPena (receptor do fluxo da Goias-JPin) como o gargalo principal foi validada em todos os experimentos, comprovando a análise inicial do Módulo 1.

A análise experimental revelou três pontos fundamentais sobre a dinâmica da rede viária:

1. A dominância da taxa de saída: a capacidade de saída dos veículos se mostrou o parâmetro mais influente para a performance do sistema, superando até mesmo a concentração de tráfego nas avenidas. A alta rotatividade alivia o congestionamento e melhora a eficiência geral da rede.
2. O fator limitante da capacidade física: apesar da dominância da taxa de saída, o experimento de capacidade da fila em 60 veículos provou que existe um limite físico. Mesmo com parâmetros operacionais otimizados, a rede opera com uma taxa de rejeição alarmante de 48,6%.
3. O paradoxo do realismo: embora a configuração com 60% de concentração de tráfego tenha produzido melhores métricas de eficiência, o cenário com 75% de concentração (mais fiel à realidade) gerou um diagnóstico mais fidedigno da situação da cidade, mesmo com mais congestionamento. Isso sublinha a importância de balancear a otimização do modelo com a fidelidade à realidade.

Em síntese, o modelo não apenas diagnosticou e quantificou a saturação da rede viária, validando a metodologia, mas também mostrou que o problema de sobrecarga da região central de Uberlândia é de natureza estrutural.

# 5 Conclusão

Este trabalho desenvolveu e aplicou uma metodologia de análise diagnóstica e simulação de tráfego urbano na região central de Uberlândia, integrando análise estatística de dados municipais com simulação Monte Carlo baseada em eventos discretos. A pesquisa demonstrou a viabilidade de utilizar dados rotineiramente coletados por prefeituras para diagnóstico quantitativo de problemas de mobilidade urbana, oferecendo uma alternativa acessível para as cidades médias brasileiras.

## 5.1 Principais Contribuições

A metodologia proposta contribui para o campo de estudos de tráfego urbano em três aspectos. Primeiro, estabelece uma abordagem de baixo custo que não requer investimentos substanciais em nova infraestrutura tecnológica, utilizando exclusivamente dados de contagem já disponíveis em órgãos municipais, sendo rapidamente aplicável no contexto brasileiro.

Segundo, a integração entre análise estatística descritiva e simulação computacional permite tanto o entendimento de padrões históricos quanto a avaliação de cenários dinâmicos. O Módulo de Análise e Diagnóstico revelou comportamentos temporais do tráfego e identificou períodos críticos, enquanto o Módulo de Simulação da Rede Viária possibilitou a quantificação da propagação de congestionamento através da rede viária com diferentes configurações operacionais.

Terceiro, a pesquisa demonstra como uma abordagem experimental pode produzir resultados analiticamente relevantes. A série de sete experimentos realizados no Módulo 2 revelou padrões e identificou configurações ótimas para diferentes objetivos.

## 5.2 Diagnóstico da Rede Viária Central

O objetivo de desenvolver uma metodologia para diagnóstico de gargalos viários na região central de Uberlândia foi plenamente alcançado através da integração complementar de dois módulos de análise. O Módulo 1, ao analisar dados históricos, identificou que a demanda excede a capacidade do sistema em 41,7% do tempo em dias úteis e apontou os cruzamentos de maior fluxo. O Módulo 2, por sua vez, validou e quantificou esses achados por meio da simulação, confirmando que os pontos críticos se comportam como gargalos persistentes e que o congestionamento se espalha para interseções vizinhas. Os resultados dos experimentos reforçam o diagnóstico, com taxas de rejeição alarmantes.

### 5.2.1 Identificação de Gargalos Críticos

Foram identificadas três categorias de gargalos:

- Gargalos Críticos: Goiás-FloPeixoto, Goiás-ProfPedroB e SanDumont-AfPena mantiveram-se problemáticos em todas as configurações, confirmando-os como pontos de estrangulamento da rede. MacAssis-CesAlvim e DuqCaxias-Cipriano também tiveram valores elevados de fluxo e rejeições.
- Gargalos por Contaminação: A análise revelou propagação visível do congestionamento para interseções adjacentes (como cruzamentos na Cesário Alvim, Floriano Peixoto e Afonso Pena, por exemplo) de pontos de alto fluxo, como entradas e saídas, demonstrando que o problema é sistêmico, não pontual.
- Gargalos Induzidos: Experimentos com alta concentração (0,75) e baixa rotatividade (35%) intensificaram problemas em vias principais, criando gargalos secundários por efeito cascata.

## 5.3 Limitações Identificadas e Validação dos Resultados

A pesquisa enfrentou limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Os dados históricos disponíveis representam apenas uma amostra limitada dos cruzamentos da rede, com informações agregadas que não capturam variações comportamentais detalhadas ou padrões de origem-destino específicos. A calibração se baseou em fatores de ajuste derivados de observações pontuais, refletindo possíveis comportamentos locais para toda a rede, assim como valores provenientes do HCM aplicados sem estudo para validar as adaptações de valores feitas.

O modelo também incorpora simplificações importantes: ignora aspectos comportamentais complexos dos condutores, aplica taxas de serviço uniformes (660 veículos/hora) e não modela rotas alternativas dinâmicas ou respostas adaptativas em tempo real. A diferença entre cenários otimistas (capacidade 120 veículos) e realistas (capacidade 60 veículos) demonstra que pequenas variações nos pressupostos resultam em mudanças substanciais nos resultados quantitativos.

Contudo, múltiplas evidências suportam as conclusões principais, como a convergência dos padrões entre diferentes configurações experimentais (60% e 75% de concentração, 35% vs 80% de rotatividade), o que indica que os pontos identificados contribuem com conclusões realistas sobre a saturação estrutural do sistema viário central de Uberlândia.

## 5.4 Trabalhos Futuros e Aplicações Práticas

A metodologia desenvolvida neste estudo abre diversas oportunidades para aprimoramentos e novas aplicações. As limitações identificadas no modelo atual e o potencial de impacto prático da solução orientam as seguintes direções para a continuidade desta pesquisa.

A primeira linha de trabalho futuro se concentra em refinar a precisão e o realismo do modelo de simulação. Para isso, a integração de dados reais da temporização semafórica, disponíveis junto ao Departamento de Trânsito, permitiria uma calibração mais precisa das taxas de serviço. Além disso, a inclusão de comportamentos dinâmicos dos condutores, como a escolha de rotas alternativas em resposta a congestionamentos e o impacto de eventos externos, tornaria o modelo ainda mais realista. Por fim, evoluir de uma ferramenta diagnóstica para uma de soluções otimizadas, com algoritmos genéticos ou aprendizado por reforço.

Além disso, para que o trabalho tenha um impacto na gestão pública, o desenvolvimento de uma interface interativa para permitir executar simulações e analisar cenários sem a necessidade de conhecimento técnico especializado seria relevante. Paralelamente, os resultados obtidos na simulação podem ser validados por meio de medições de campo nas interseções críticas identificadas, o que fortaleceria a base das conclusões e a confiabilidade da metodologia.

# Referências

ADAN, Ivo; RESING, Jacques. **Queueing Theory**. [S.l.]: Eindhoven University of Technology, 2002. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://citeserx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=097d866985fc04b986d1f28885de7a0c1e89fce9>>.

ARAÚJO, Alessandro Macêdo de et al. Análise comparativa das simulações mesoscópica e microscópica do Vissim na modelagem do tráfego de vias urbanas. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES - PETRAN. ANAIS do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. [S.l.: s.n.], nov. 2019. Acessado em: 13 de agosto de 2025. Disponível em: <[https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20I/4\\_651\\_AC.pdf](https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20I/4_651_AC.pdf)>.

ARIOTTI, Paula et al. Associação de modelos macroscópicos e microscópicos de tráfego para estudo de circulação. **XVIII ANPET**, jan. 2004. Acessado em: 02 de setembro de 2025. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/228454369\\_Associacao\\_de\\_modelos\\_macroscopicos\\_e\\_microscopicos\\_de\\_trafego\\_para\\_estudo\\_de\\_circulacao](https://www.researchgate.net/publication/228454369_Associacao_de_modelos_macroscopicos_e_microscopicos_de_trafego_para_estudo_de_circulacao)>.

BERNARDO, Guilherme T. T. et al. Traffic Lights Optimization for Pedestrian Safety: Simulation-Based Analysis and Field Interventions in Jacareí's Bridge Intersection. In: 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). [S.l.: s.n.], 2023. P. 2084–2089. DOI: [10.1109/ITSC57777.2023.10422663](https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422663).

BERTINI, Robert L. You Are the Traffic Jam: Examination of Congestion Measures. In: TRANSPORTATION Research Board. [S.l.: s.n.], 2006. Acessado em: 13 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127020506>>.

CHAI, Huajun et al. Dynamic traffic routing in a network with adaptive signal control. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 85, p. 64–85, 2017. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1016/j.trc.2017.08.017](https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.017).

CHAMARELLI, Renata. **Novo relatório da ONU detalha impactos ambientais da exportação de veículos usados**. [S.l.: s.n.], out. 2020. Acessado em: 13 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/97402-novo-relat%C3%B3rio-da-onu-detalha-impactos-ambientais-da-exporta%C3%A7%C3%A3o-de-ve%C3%ADculos-usados-para>>.

- DOWNS, Anthony. **Still Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion.** [S.l.]: Brookings Institution Press, 2004. Acessado em: 11 de setembro de 2025. ISBN 9780815719298. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/10.7864/j.ctt1vjqppt>>.
- DU, Y.; GENG, Y.; SUN, L. Simulation model based on Monte Carlo method for traffic assignment in local area road network. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 3, p. 195–203, 2009. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1007/s11709-009-0032-3](https://doi.org/10.1007/s11709-009-0032-3).
- ERISKIN, Ekinhan; TERZI, Serdal; CEYLAN, Halim. Development of dynamic traffic signal control based on Monte Carlo simulation approach. **Measurement**, v. 188, p. 110591, 2022. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1016/j.measurement.2021.110591](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110591).
- GUIDORIZZI, Mayra dos Santos et al. Simulação como Apoio a Tomada de Decisão para a Solução de Problemas Causados pelos Gargalos Formados no Trânsito. In: ENEGEP. Salvador: ENEGEP, out. 2009. Acessado em: 25 de junho de 2025. Disponível em: <[https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_tn\\_stp\\_096\\_652\\_13674.pdf](https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_stp_096_652_13674.pdf)>.
- HAN, Xiao et al. Congestion recognition for hybrid urban road systems via digraph convolutional network. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 121, p. 102877, 2020. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1016/j.trc.2020.102877](https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102877).
- HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. [S.l.]: AMGH, 2013. Acessado em: 11 de setembro de 2025. ISBN 9788580551198. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-A88a0-KxQ0C>>.
- JACKSON, James R. Networks of waiting lines. **Operations Research**, INFORMS, v. 5, n. 4, p. 518–521, 1957. Acessado em: 23 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://www.mit.edu/~medard/papera.pdf>>.
- JANG, Kitae; KIM, Hyungjoo; JANG, In Gwun. Traffic Signal Optimization for Oversaturated Urban Networks: Queue Growth Equalization. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 4, p. 2121–2128, 2015. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1109/TITS.2015.2398896](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2398896).
- JEON, Seungwoo; HONG, Bonghee. Monte Carlo simulation-based traffic speed forecasting using historical big data. **Future Generation Computer Systems**, v. 65, p. 182–195, 2016. Acessado em: 02 de setembro de 2025. DOI: [10.1016/j.future.2015.11.022](https://doi.org/10.1016/j.future.2015.11.022).

- KELLY, Frank P. **Reversibility and stochastic networks.** [S.l.]: Cambridge University Press, 2011. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <[https://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/BOOKS/kelly\\_book.html](https://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/BOOKS/kelly_book.html)>.
- KUMAR, Bharathi Ramesh et al. A Dynamic Traffic Light Control Algorithm to Mitigate Traffic Congestion in Metropolitan Areas. **Sensors**, v. 24, n. 12, p. 3987, 2024. Acessado em: 21 de agosto de 2025. DOI: [10.3390/s24123987](https://doi.org/10.3390/s24123987).
- LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation Modeling and Analysis.** [S.l.]: McGraw-Hill, 1982. (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). Acessado em: 11 de setembro de 2025. ISBN 9780070366961. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xOBQAAAAMAAJ>>.
- METROPOLIS, Nicholas; ULAM, Stanislaw. The monte carlo method. **Journal of the American Statistical Association**, ASA Website, v. 44, n. 247, p. 335–341, 1949. Acessado em: 19 de setembro de 2025. DOI: [10.1080/01621459.1949.10483310](https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310).
- MEYER, Paul L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <[https://www.academia.edu/38987161/PROBABILIDADE\\_Aplica%C3%A7%C3%A7%C3%B5es\\_%C3%A0\\_Estat%C3%ADstica](https://www.academia.edu/38987161/PROBABILIDADE_Aplica%C3%A7%C3%A7%C3%B5es_%C3%A0_Estat%C3%ADstica)>.
- PERDICHIZZI, Julie. **5 Ways Technology Can Reduce Traffic Congestion.** [S.l.: s.n.], dez. 2022. Acessado em: 13 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://lyt.ai/blog/on-the-road/how-can-technology-reduce-traffic/>>.
- PORTUGAL, Licinio. **Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem.** [S.l.]: Interciênciac, 2005. Acessado em: 11 de setembro de 2025. ISBN 85-7193-124-0. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/346786746\\_Simulacao\\_de\\_Trafego\\_Conceitos\\_e\\_Tecnicas\\_de\\_Modelagem](https://www.researchgate.net/publication/346786746_Simulacao_de_Trafego_Conceitos_e_Tecnicas_de_Modelagem)>.
- PRADO, D. **Teoria Das Filas E Da Simulação.** [S.l.]: FALCONI, 2014. Acessado em: 11 de setembro de 2025. ISBN 9788598254661. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=BdM2vgAACAAJ>>.
- PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Programa Uberlândia Integrada promove importantes avanços na infraestrutura da cidade.** Uberlândia: [s.n.], 2022. Acessado em: 13 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2023/01/12/uberlandia-integrada-avanca-em-obras-de-mobilidade-nos-ultimos-dois-anos>>.
- PREFEITURA DE UBERLANDIA. **Uberlandia tem proposta para melhoria na mobilidade urbana pre-selecionada pelo programa Avancar Cidades.** [S.l.: s.n.], 2025. Acessado em: 13 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/05/09/uberlandia-tem-proposta-para-melhoria-na-mobilidade-urbana-pre-selecionada-pelo-programa-avancar-cidades>>.

para melhoria na mobilidade urbana pre-selecionada pelo programa avancar cidades>.

QADRI, Syed Shah Sultan Mohiuddin et al. Optimizing Traffic Signal Timing at Urban Intersections: A Simheuristic Approach Using GA and SUMO. In: 2024 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). [S.l.: s.n.], 2024. P. 1–6. DOI: [10.1109/ASYU62119.2024.10757086](https://doi.org/10.1109/ASYU62119.2024.10757086).

RUBINSTEIN, Reuven Y; KROESE, Dirk P. **Simulation and the Monte Carlo method**. 2nd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. Acessado em: 10 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://share.google/3gi2tAbLn69Dn9ekB>>.

EL-SAID, Mohammed. **Rapid urbanization and shrinking green spaces drive urban heat island effects in lower income countries**. [S.l.: s.n.], mai. 2025. Acessado em: 13 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://phys.org/news/2025-05-rapid-urbanization-green-spaces-urban.html>>.

SÁNCHEZ-RICO, María Teresa; GARCÍA-RÓDENAS, Ricardo; ESPINOSA-ARANDA, José Luis. A Monte Carlo Approach to Simulate the Stochastic Demand in a Continuous Dynamic Traffic Network Loading Problem. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 3, p. 1362–1373, 2014. Acessado em: 21 de agosto de 2025. DOI: [10.1109/TITS.2014.2305473](https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2305473).

SILVA, Paulo Cesar Marques da. **Engenharia de Tráfego, apostila: Teoria do Fluxo de Tráfego**. [S.l.]: Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 1994. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>>.

SKALNY, Pavel. An Application of Graph Theory in Markov Chains Reliability Analysis. **Advances in Electrical and Electronic Engineering**, v. 12, n. 2, 2014. Acessado em: 21 de agosto de 2025. DOI: [10.15598/aeee.v12i2.1037](https://doi.org/10.15598/aeee.v12i2.1037).

SOLAIAPPAN, Srinivasagam et al. Vehicular Traffic Flow Analysis and Minimize the Vehicle Queue Waiting Time Using Signal Distribution Control Algorithm. **Sensors**, v. 23, n. 15, p. 6819, 2023. Acessado em: 23 de agosto de 2025. DOI: [10.3390/s23156819](https://doi.org/10.3390/s23156819).

SZWARCFITER, Jayme Luiz. **Teoria Computacional de Grafos: os Algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2014. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em: <[https://www.kufunda.net/publicdocs/TEORIA%20COMPUTACIONAL%20DE%20GRAFOS%20\(Jayme%20Luiz%20Szwarcfiter\).pdf](https://www.kufunda.net/publicdocs/TEORIA%20COMPUTACIONAL%20DE%20GRAFOS%20(Jayme%20Luiz%20Szwarcfiter).pdf)>.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis**. 6. ed. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2016.

WALRAND, Jean. **An introduction to queueing networks.** [S.l.]: Prentice Hall, 1988. Acessado em: 11 de setembro de 2025. Disponível em:  
[<https://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/BOOKS/kelly\\_book.html>](https://www.statslab.cam.ac.uk/~frank/BOOKS/kelly_book.html).

XIAO, Zikai. Research and Application Analysis of Traffic Light control System. **Applied and Computational Engineering**, v. 127, p. 177–186, 2025. Acessado em: 23 de agosto de 2025. DOI: [10.54254/2755-2721/2025.20274](https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20274).

# Apêndices

# APÊNDICE A – Mapas de Calor Completos por Dia da Semana

A seguir, são apresentados os mapas de calor para os dias da semana não detalhados na seção de resultados.

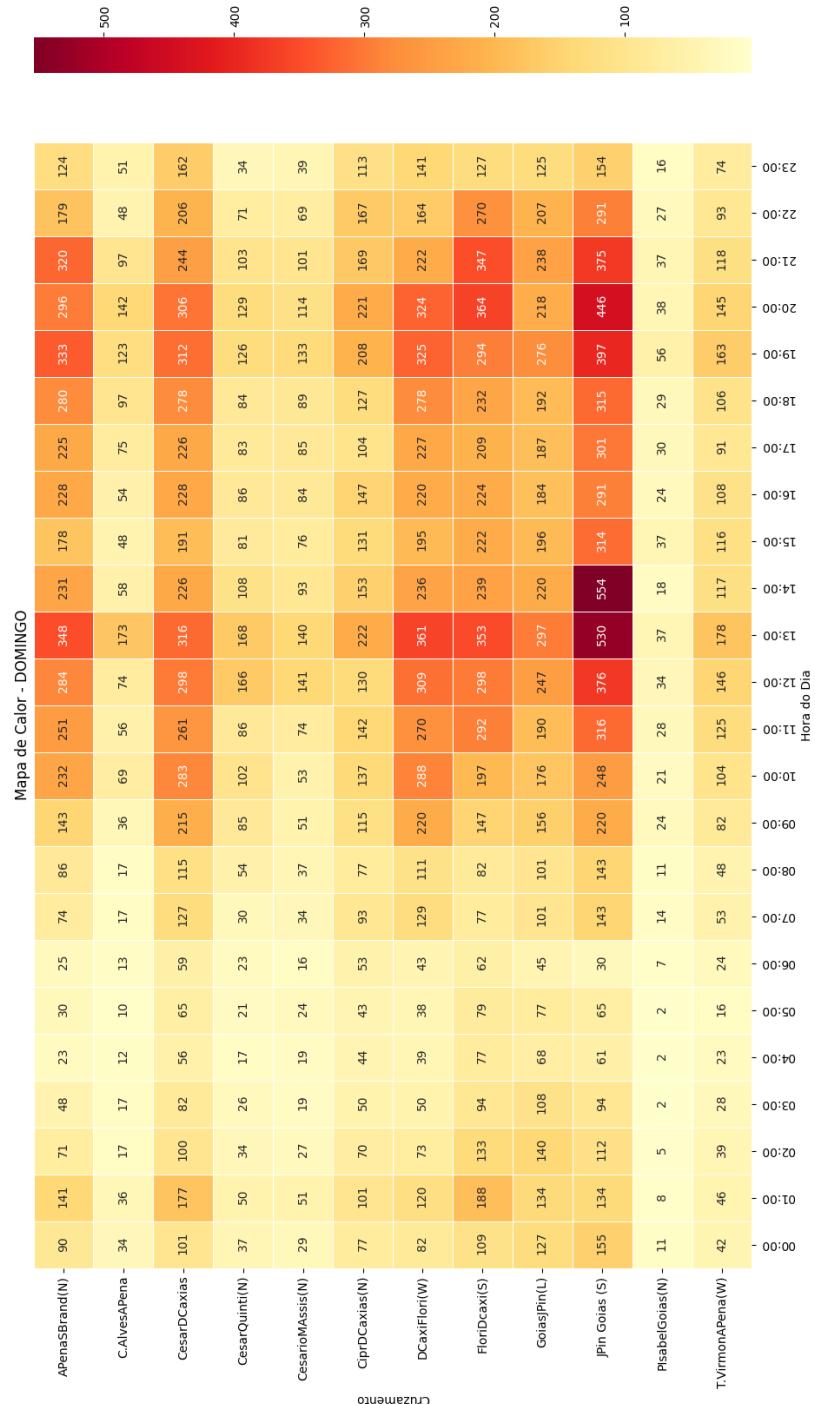


Figura 54 – Mapa de Calor - Domingo

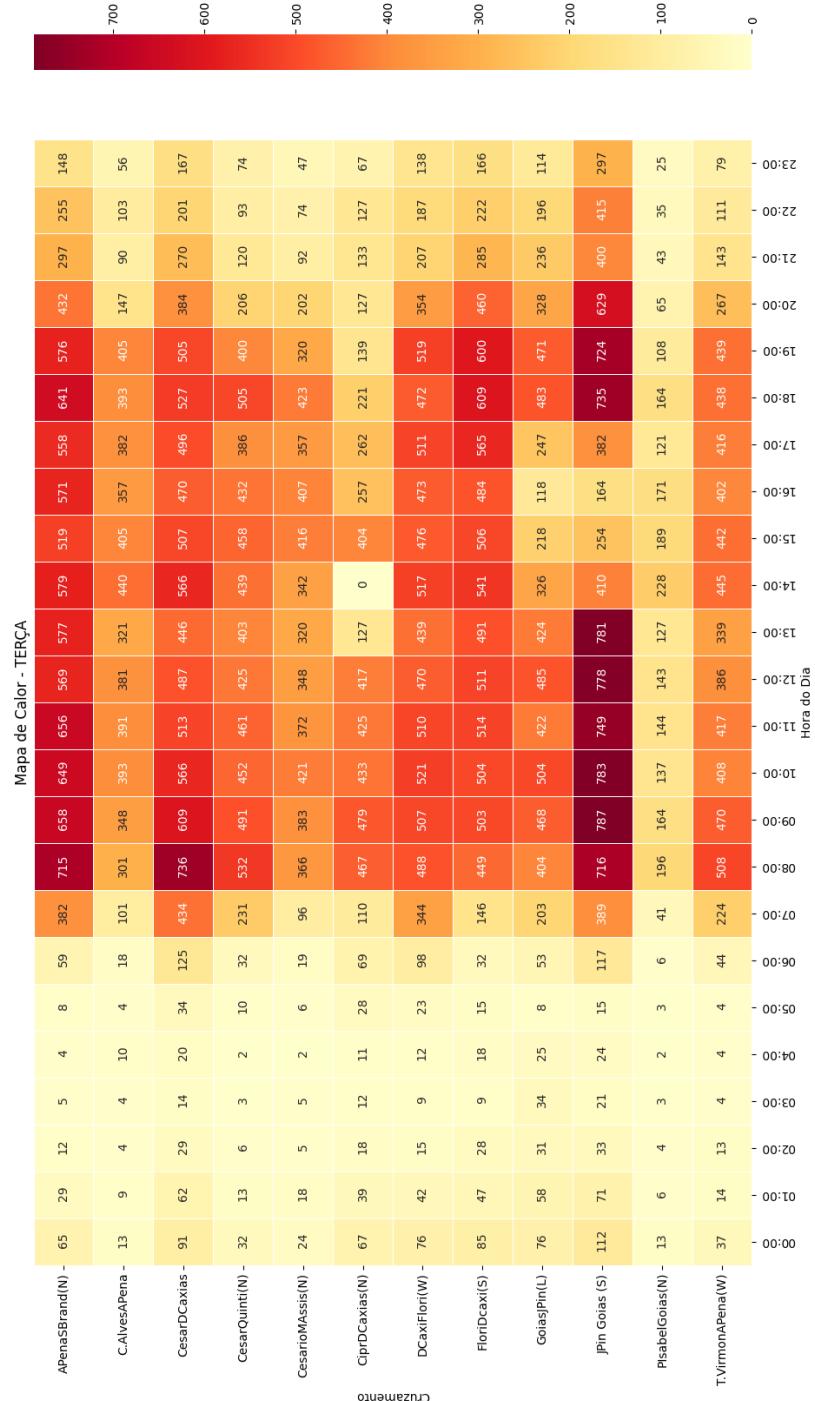


Figura 55 – Mapa de Calor - Terça-feira

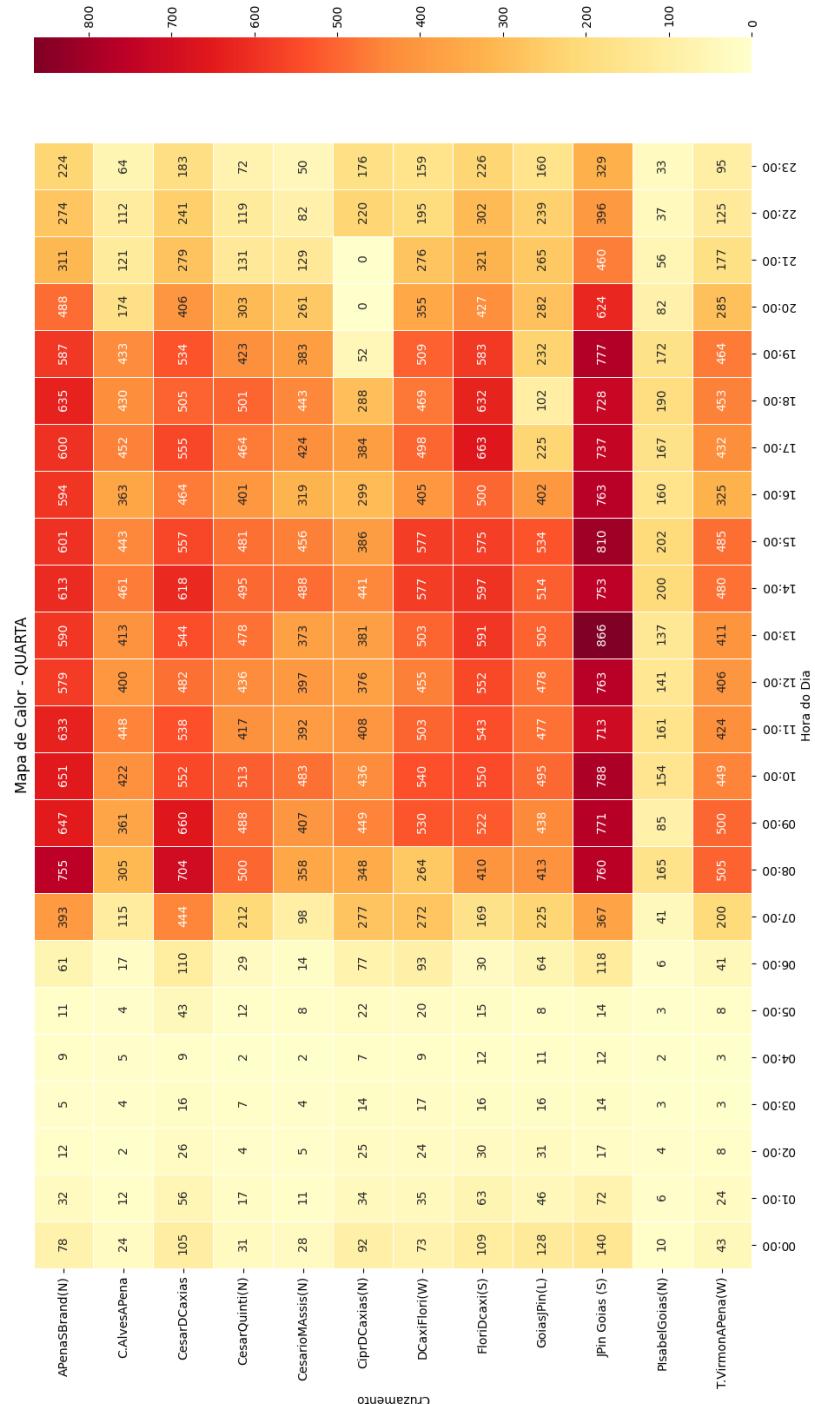


Figura 56 – Mapa de Calor - Quarta-feira

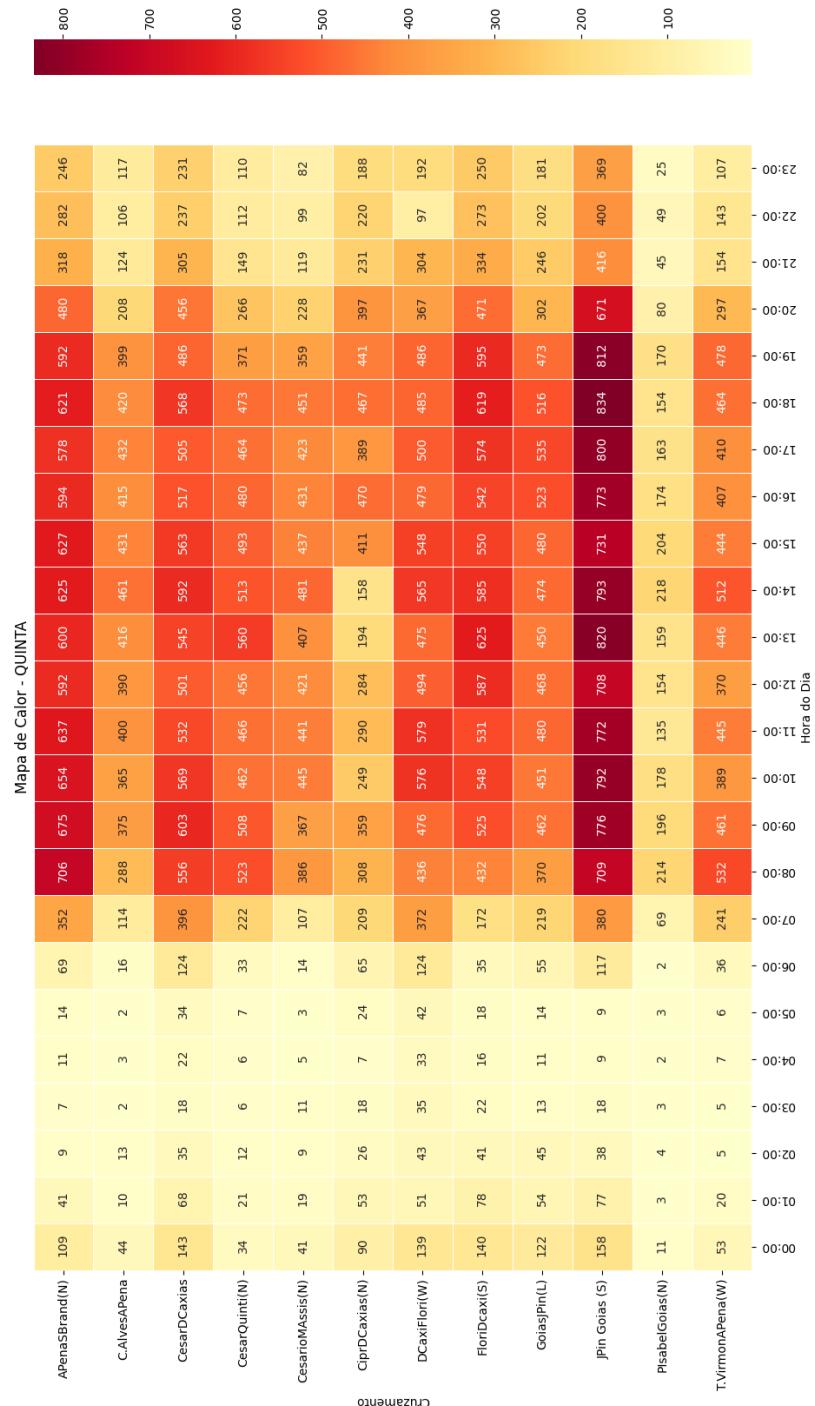


Figura 57 – Mapa de Calor - Quinta-feira