

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**O USO DA MICROSSIMULAÇÃO PARA
AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE
DE TRÁFEGO EM UMA INTERSEÇÃO URBANA:
ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA/GO**

**Matheus José Gomes Leite
Sara Matos dos Santos**

GOIÂNIA
2026

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Sara Matos dos Santos

Matrícula: 20211011180240

Título do Trabalho: O USO DA MICROSSIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM UMA INTERSEÇÃO URBANA: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA/GO

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 02/02/2026.
Local Data



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Matheus José Gomes Leite

Matrícula: 20201011180250

Título do Trabalho: O USO DA MICROSSIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM UMA INTERSEÇÃO URBANA: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA/GO

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

_____, 02/02/2026.
Local Data

Matheus José Gomes Leite

Matheus José Gomes Leite
Sara Matos dos Santos

**O USO DA MICROSSIMULAÇÃO PARA
AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE
DE TRÁFEGO EM UMA INTERSEÇÃO URBANA:
ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA/GO**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia de
Transportes, do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Goiânia,
como requisito parcial matrícula na disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Transportes.*

Orientador(a): Profa. Dra. Mariana de Paiva

GOIÂNIA
2026

L533u Leite, Matheus José Gomes.

O uso da microsimulação para avaliação de alternativas de controle de tráfego em uma interseção urbana: estudo de caso em Goiânia/GO / Matheus José Gomes Leite, Sara Matos dos Santos. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2026.

164 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana de Paiva.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia de Transportes, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Engenharia de tráfego - mobilidade urbana - Goiânia (GO). 2. Semáforos inteligentes. 3. Microsimulação de tráfego. I. Santos, Sara Matos dos. II. Paiva, Mariana de (orientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 388.41

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **O USO DA MICROSIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM UMA INTERSEÇÃO URBANA: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA/GO**, sob orientação de Mariana de Paiva, apresentado pela aluna **Sara Matos dos Santos (20211011180240)** do Curso **Bacharelado em Engenharia de Transportes (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **07:32** do dia **02/02/2026** pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Mariana de Paiva** (Presidente)
- **Ricardo Freire Goncalves** (Examinador Interno)
- **Luciana Araujo Azevedo de Oliveira** (Examinadora Interna)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,0

Observação / Apreciações:

Os alunos devem fazer as correções indicadas pela banca, especialmente no que tange ao cenário 2.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Mariana de Paiva** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ricardo Freire Goncalves**, em **02/02/2026 09:50:05** com chave **b2c67caa003511f1a3b2005056a537a4**.
- **Luciana Araujo Azevedo de Oliveira**, em **02/02/2026 12:53:55** com chave **60e7feda004f11f18a25005056a537a4**.
- **Mariana de Paiva**, em **02/02/2026 12:39:42** com chave **6496ea02004d11f1bfda005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 08/02/2026

Código de Autenticação: da3535



RESUMO

O crescimento desordenado das cidades brasileiras, aliado ao aumento contínuo da frota veicular, intensifica problemas de mobilidade urbana como congestionamentos, longos tempos de viagem e elevadas emissões de poluentes atmosféricos. As interseções urbanas destacam-se como pontos críticos da rede viária, concentrando conflitos de tráfego e apresentando limitações operacionais nos períodos de pico. A presente pesquisa avalia diferentes alternativas de controle de tráfego para a interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, em Goiânia/GO, utilizando microsimulação com o software Vissim. Foram simulados três cenários: (1) rotatória existente (cenário base); (2) semáforo de tempo fixo; (3) semáforo inteligente. Os indicadores de desempenho avaliados compreendem tempo médio de espera, nível de serviço, comprimento de filas e emissões de poluentes (CO, NOx, VOCs) e consumo de combustível. Os resultados indicaram que o Cenário 3 (semáforo atuado) apresentou o melhor desempenho geral. Contudo, identifica-se gargalo estrutural em certas aproximações permaneceram mesmo com controle atuado, sugerindo necessidade de complementação com intervenção geométrica ou priorização de transporte coletivo. Conclui-se que a implantação de semáforo inteligente é mais eficiente para melhorar a mobilidade urbana e reduzir impactos ambientais, embora reconheça-se a importância de políticas integradas de gestão de demanda veicular.

Palavras-chave: Engenharia de tráfego. Microsimulação de tráfego.

ABSTRACT

The disorderly growth of Brazilian cities, coupled with the continuous increase in vehicle fleets, intensifies urban mobility problems such as congestion, long travel times, and high atmospheric pollutant emissions. Urban intersections stand out as critical points in the road network, concentrating traffic conflicts and exhibiting operational limitations during peak periods. This research evaluates different traffic control alternatives for the intersection between Avenida Transbrasiliana and Avenida Feira de Santana, in Goiânia/GO, using microsimulation with Vissim software. Three scenarios were simulated: (1) existing roundabout (base scenario); (2) fixed-time traffic signal; (3) intelligent traffic signal. The performance indicators assessed include average waiting time, level of service, queue length, and pollutant emissions (CO, NO_x, VOCs) and fuel consumption. The results indicated that Scenario 3 (actuated signal) presented the best overall performance. However, structural bottlenecks in certain approaches persisted even with actuated control, suggesting the need for complementary geometric intervention or public transport prioritization. It is concluded that the implementation of an intelligent traffic signal is more efficient for improving urban mobility and reducing environmental impacts, although the importance of integrated vehicle demand management policies is acknowledged.

Palavras-chave: Traffic Engineer. Microsimulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Trabalho	21
Figura 2 - Viaduto implantado na rodovia BR-116/CE com alças de acesso laterais.	26
Figura 3 - Obra de implantação de passagem inferior em área urbana.	26
Figura 4 - Trevo rodoviário (BR-304) com alças de conexão em diferentes níveis.....	27
Figura 5 - Interseção em T com sinalização vertical de preferência.	28
Figura 6 - Interseção em 3 ramos: Tipo Y com canalização de fluxo e marcações em ilha pintada.	28
Figura 7 - Interseção urbana com múltiplos ramos (cinco acessos).....	29
Figura 8 - Interseção tipo Rotatória.....	29
Figura 9 - Interseção canalizada do tipo “gota” em pista simples.....	30
Figura 10 - Rótula vazada em entroncamento urbano (ERS344 com BRS 472, Santa Rosa - RS).	30
Figura 11 - Níveis de Simulação de Tráfego.....	45
Figura 12 - Fluxograma do Método	56
Figura 13: Interseção em estudo no período de contagem volumétrica	68
Figura 14: Interseção entre a Avenida Transbasiiana e a Avenida Feira de Santana.....	69
Figura 15: Croqui Avenida Transbasiiana X Avenida Feira de Santana	72
Figura 16: Croqui dos dados geométricos da área de estudo.....	75
Figura 17: Movimentos estudados na contagem volumétrica	75
Figura 18: Rede viária da interseção modelada no PTV Vissim (modelo base)	80
<i>Figura 19:Configuração inicial de links e conectores de aproximação</i>	<i>81</i>
Figura 20:Interface do comando Add circular link.	81
Figura 21: Interface de edição de links	82
Figura 22:Polígonos de Conflict Areas e hierarquia de precedência estabelecida	82
Figura 23: Inserção de Vehicles Routes e percentual por rotas.....	83
<i>Figura 24:Configuração espacial das Speed Areas.....</i>	<i>83</i>
Figura 25: Percentual de veículos por sentido.....	87
Figura 26: Aviso do software Vissim (Versão 2026) em caso de erro.....	92
Figura 27: Veículos se sobressaindo no Vissim.....	93
Figura 28:Simulação Atravessando a interseção corretamente.	93
Figura 29: Cenário 1.....	95
Figura 30: Cenário 2.....	97
Figura 31: Diagrama de intervalos luminosos adotado	99
Figura 32: Configuração semafórica do Cenário 2 (Vissim)	100
Figura 33: Cenário 3: Semáforo Atuado	103
Figura 34: Cenário 4: programação semafórica	104
Figura 35: Cenário 1: Rotatória existente.....	108
Figura 36: Extensão média de fila – Cenário 1	112
Figura 37: Número de veículos processados - Cenário 1	113
Figura 38: Número total de pessoas - Cenário 1	114
Figura 39: Atraso médio por veículo - Cenário 1.....	115
Figura 40: Atraso médio por pessoa - Cenário 1.....	115
Figura 41:Tempo de parada - Cenário 1.....	116
Figura 42: Emissão de CO - Cenário 1	117
Figura 43:Emissão de NOX - Cenário 1	118

Figura 44:Emissão de VOC - Cenário 1.....	119
Figura 45: Consumo de combustível – Cenário 1	119
Figura 46: Semáforo tempo fixo	120
Figura 47: Extensão média de fila - Cenário 2.....	123
Figura 48: Número total de veículos - Cenário 2	124
Figura 49: Número total de pessoas - Cenário 2	124
Figura 50: Atraso médio de veículos - Cenário 2.....	125
Figura 51: Atraso médio de pessoas.....	126
Figura 52: Tempo de parada - Cenário 2.....	126
Figura 53:Emissão CO - Cenário 2	127
Figura 54: Emissão NOX - Cenário 2	128
Figura 55: Emissão VOC - Cenário 2	128
Figura 56: Consumo de combustível - Cenário 2.....	129
Figura 57: Cenário 3: Semáforo Atuado	130
Figura 58: Extensão média de fila - Cenário 3	133
Figura 59: Número total de veículos - Cenário 3	134
Figura 60: Número total de pessoas - Cenário 3	134
Figura 61: Tempo de parada por veículo – Cenário 3	136
Figura 62: Tempo de parada por pessoa – Cenário 3	136
Figura 63: Frequência de paradas - Cenário 3.....	137
Figura 64: Emissão de CO - Cenário 3	137
Figura 65: Emissão NOX - Cenário 3	138
Figura 66: Emissão de VOC - Cenário 3.....	139
Figura 67: Consumo de combustível - Cenário 3.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Classificação do Nível de Serviço (NS) em interseções semaforizadas segundo o tempo médio de atraso.....	42
Tabela 2 - Resumo dos Modelos de Fluxo de Tráfego.....	46
Tabela 3 - Comparativo entre softwares de simulação e modelagem de tráfego	52
Tabela 4 - Demanda Acumulada.....	76
Tabela 5: Percentual de veículos por aproximação	77
Tabela 6 - Parâmetros avaliados na simulação.....	84
Tabela 7 – Volume de tráfego nos períodos de maior demanda	85
Tabela 8 – Refinamentos adotados na modelagem	89
Tabela 9: Cenário 1: Pico manhã	109
Tabela 10 - Cenário 1: Pico tarde.....	110
Tabela 11 - Cenário 1: Pico noite.....	111
Tabela 12 - Nível de Serviço (Picos da manhã, tarde e noite) - Cenário 1	114
Tabela 13 - Cenário 2: Pico manhã	121
Tabela 14 - Cenário 2: Pico tarde.....	121
Tabela 15 - Cenário 2: Pico noite.....	122
Tabela 16 - Nível de Serviço (manhã, tarde e noite) - Cenário 2.....	123
Tabela 17 - Cenário 3: Pico manhã	131
Tabela 18 - Cenário 3: Pico tarde.....	131
Tabela 19 - Cenário 3: Pico noite.....	132
Tabela 20 - Nível de Serviço (pico manhã, tarde e noite) - Cenário 3	135
Tabela 21 - Comparação entre o Nível de Serviço geral de cada cenário	140
Tabela 22 - Comparação entre o Tempo de Atraso Médio por Veículo em cada cenário.....	141
Tabela 23 - Comparação entre Formação de Filas em cada cenário	141
Tabela 24 - Comparação entre os resultados de Números de Paradas (STOPS).....	141
Tabela 25 – Comparação entre os resultados dos Cenários 2 e 3.....	142
Tabela 31 - Comparação do ponto de vista ambiental	143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMSUN	<i>Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i> (Transporte Rápido por Ônibus)
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> (Administração Federal de Rodovias - EUA)
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HCS	<i>Highway Capacity Software</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
PGV	Polo Gerador de Viagens
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>
SYNCHRO	Software de Otimização Semafórica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
VDM	Volume Diário Médio

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Hipóteses:	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
1.4 METODOLOGIA	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2. O CONTROLE DE INTERSEÇÕES.....	22
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
2.2 A ENGENHARIA DE TRÁFEGO NO CONTROLE DAS INTERSEÇÕES	22
2.3 TIPOS DE INTERSEÇÕES.....	25
2.3.1 Interseções em Desnível	25
2.3.2 Interseções em Nível.....	27
2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE ROTATÓRIAS	31
2.5 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SEMÁFOROS DE TEMPO FIXO	33
2.6 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SEMÁFOROS INTELIGENTES	36
2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS DO TRÁFEGO URBANO	38
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO: CONCEITOS E FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE INTERSEÇÕES	41
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	41
3.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO.....	41
3.3 A MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	48
3.4 ESTUDOS ENVOLVENDO A MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	50
3.5 SOFTWARES DE MICROSIMULAÇÃO	51
4. MÉTODO	56
4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	57
5. ESTUDO DE CASO.....	68
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	68
5.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E DA ÁREA DE ESTUDO.....	69
5.3 ESCOLHA DO SOFTWARE DE MICROSIMULAÇÃO	72
5.4 COLETA DE DADOS.....	74
5.5 MODELAGEM DA REDE VIÁRIA (MODELO BASE).....	78
5.6 VERIFICAÇÃO E CORREÇÃO DE ERROS	88

5.7	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO	89
5.8	CENÁRIOS INVESTIGADOS	94
	RESULTADOS E ANÁLISES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Painel de Informações do Departamento Estadual de Trânsito de Goiás (DETRAN-GO), a frota de veículos em Goiânia aumentou de 1.336.830 para 1.352.490 entre janeiro e dezembro de 2024, representando um acréscimo de 15.660 veículos no período. Isso equivale a uma média de aproximadamente 43 novos registros por dia. O crescimento urbano desordenado aliado a essa expansão da frota veicular tem provocado desafios à mobilidade urbana, dentre eles destacam-se a intensificação de problemas como congestionamentos, aumento nos tempos de deslocamento da população e uma maior incidência de sinistros de trânsito.

Além disso, esse cenário agrava os impactos ambientais devido à elevação das emissões de poluentes atmosféricos. Diante desse contexto, o controle eficiente do tráfego em interseções urbanas surge como uma alternativa para otimizar a fluidez do tráfego e contribuir para a redução dos congestionamentos e da emissão de poluentes atmosféricos.

O desenvolvimento de ferramentas específicas para a Engenharia de Tráfego tem permitido análises mais precisas e eficientes de condições existentes e de cenários projetados, ao subsidiar a seleção de alternativas mais adequadas para aprimorar a operação de interseções. Nesse conjunto de ferramentas, destaca-se a microsimulação de tráfego, cuja base conceitual foi estabelecida na década de 1970 e consolidada ao longo dos anos 1990 (Barceló, 2010). A técnica tem sido difundida entre analistas e pesquisadores, em razão de sua capacidade de representar o comportamento operacional do sistema viário em nível microscópico, modelando a interação dinâmica entre veículos individuais de forma realista e detalhada.

A microsimulação de tráfego é uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento de condutores de veículos e pedestres em interseções urbanas. Essa técnica permite a avaliação do impacto da implementação de diferentes alternativas de controle de tráfego, como a substituição da rotatória por semáforos fixos ou inteligentes, além de ajustes na sinalização e na geometria viária (Staut e Mattei, 2020). Além disso, a simulação computacional possibilita a visualização gráfica do comportamento do tráfego, facilitando a interpretação dos resultados e subsidiando decisões com base em dados concretos.

Neste contexto, este estudo visa utilizar a microsimulação para comparar diferentes estratégias de controle de tráfego na interseção entre a Avenida Transbrasiliana

e a Avenida Feira de Santana, considerando as seguintes alternativas: (i) adequação geométrica da rotatória existente; (ii) implantação de semáforo com tempo fixo; e (iii) implantação de semáforo inteligente com tempos de ciclo adaptativos, a fim de identificar a alternativa mais eficiente para melhorar a fluidez, reduzir os tempos de espera e mitigar os impactos ambientais e de segurança viária nos horários de pico.

A interseção em análise apresenta problemas de congestionamentos nos períodos de maior demanda, especialmente no início da manhã e início da noite, comprometendo a mobilidade e aumentando as filas e os tempos de viagem. Embora a rotatória existente apresente desempenho satisfatório nos horários de entre pico, nos períodos de pico ela atinge seu grau de saturação, resultando em longas filas, maior tempo de espera, aumento do risco de sinistros e intensificação das emissões de poluentes.

Os resultados desta pesquisa permitirão comparar as alternativas investigadas, indicando qual o tipo de controle de interseção (rotatória, semáforo ou mudança na geometria do cruzamento) apresenta maior eficiência para o local estudado. Além disso, as análises contribuirão para a formulação de recomendações técnicas para futuras intervenções na mobilidade urbana da região, visando a melhoria da qualidade de vida da população e o aperfeiçoamento das condições de trânsito na cidade.

Diante do exposto, o problema deste estudo é: qual alternativa de controle de tráfego (rotatória, semáforo fixo ou semáforo inteligente) apresenta maior eficiência para a interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana nos horários de pico, considerando métricas de desempenho obtidas por meio de microssimulação de tráfego, como tempo médio de espera, nível de serviço e emissões de poluentes?

1.1 Hipóteses:

As hipóteses investigadas neste trabalho são:

- A substituição da rotatória por um semáforo de tempo fixo no cruzamento entre a Avenida Transbrasiliana com a Avenida Feira de Santana reduz o tempo de espera médio dos veículos durante os horários de pico;
- A substituição da rotatória por semáforo inteligente, com tempos de ciclo adaptativos, na interseção entre a Avenida Transbrasiliana com a Avenida Feira de Santana, reduz o tempo de espera médio dos veículos durante os horários de pico;

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de microssimulação, diferentes alternativas de controle de tráfego para a interseção da Avenida Transbrasiliana com a Avenida Feira de Santana, comparando seus impactos no nível de serviço, no tempo médio de espera e na emissão de poluentes, a fim de identificar a solução mais eficiente no que tange a mobilidade e ao meio ambiente.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modelar o tráfego atual da rotatória na interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, utilizando o software Vissim para representar com precisão o comportamento do tráfego durante os horários de pico;
- Simular diferentes estratégias de controle de tráfego para a interseção, incluindo, (i) semáforo fixo e (ii) semáforo inteligente com tempos de ciclo adaptativos;
- Analisar o desempenho de cada alternativa, utilizando a microssimulação para avaliar as seguintes métricas: tempo médio de espera dos veículos, Nível de Serviço (NS) e emissão de poluentes gerados durante os períodos de pico;
- Comparar os resultados obtidos nas simulações, identificando a alternativa que apresenta maior eficiência no contexto da mobilidade urbana e da redução dos impactos ambientais;
- Propor recomendações técnicas com base na alternativa de melhor desempenho, considerando melhorias operacionais para a interseção estudada e possíveis adaptações futuras para a interseção estudada.

1.3 JUSTIFICATIVA

Goiânia, capital do estado de Goiás, teve 205 óbitos em decorrência de sinistros de trânsito no ano de 2024, conforme dados do Programa Vida no Trânsito (PVT), disponibilizados pela Secretaria Municipal de Saúde de Goiânia (Goiânia, 2024). As

interseções urbanas representam pontos críticos na malha viária, uma vez que concentram elevados índices de conflitos de tráfego e sinistros com vítimas. A eficiência dos cruzamentos urbanos depende de sua capacidade de escoamento do trânsito, onde se observa uma maior incidência de conflitos envolvendo pedestres e veículos, ciclistas e veículos, e veículos em movimento conflitante (Seco *et al.*, 2008).

O uso crescente do transporte individual motorizado tem sobrecarregado a rede viária, especialmente nas interseções. Automóveis particulares ocupam mais espaço nas vias por passageiro transportado quando comparado aos sistemas de transporte coletivo como ônibus e trens, contribuindo para a redução da eficiência do sistema. Além disso, os sistemas de transporte público possuem limitações como frota envelhecida e baixa atratividade dos serviços, falta de integração modal eficiente e investimentos insuficientes em infraestrutura de mobilidade urbana.

Tal situação é agravada pela elevada taxa de motorização registrada em Goiânia, que em junho de 2025 alcançou 0,93 veículos por habitante (1 veículo para cada 1,08 habitantes), segundo dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN, 2025) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024a). Esse valor é superior à média nacional de 0,59 veículos por habitante, considerando a frota do Brasil fornecida pelo SENATRAN (2025) e a projeção populacional de 2024 disponibilizada pelo IBGE (2024b), o que contribui para a formação de filas, especialmente nos períodos de pico. Ademais, o aumento da frota veicular nas vias geralmente não é acompanhado por intervenções proporcionais de melhoria na infraestrutura dos cruzamentos, intensificando os problemas de fluidez e segurança viária.

Um dos principais obstáculos à modernização de cruzamentos urbanos é a dificuldade de adaptar a infraestrutura existente ao aumento da demanda. Quando a capacidade da interseção é inferior ao volume de tráfego, a fluidez é comprometida, ocasionando aumentos nos tempos de deslocamento, no consumo de combustível e nas emissões de poluentes. Além disso, o controle de tráfego ineficiente pode agravar tais impactos, sobretudo em áreas com alto fluxo, como ocorre na interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, onde a rotatória existente se mostra incompatível com a demanda atual.

Assim, este estudo é relevante por avaliar, de forma comparativa, diferentes alternativas de controle de tráfego para essa interseção crítica. A análise considera não apenas indicadores operacionais, como tempo médio de espera e nível de serviço, mas também aspectos ambientais, como as emissões geradas nos diferentes cenários.

A aplicação de técnicas de microsimulação de tráfego se destaca como ferramenta estratégica para esse tipo de análise. Softwares como Vissim, AIMSUN ou SUMO permitem modelar a geometria da interseção, os padrões de fluxo veicular e a variabilidade da demanda horária, possibilitando simular virtualmente os efeitos de diferentes configurações de controle (rotatória, semáforo fixo, semáforo inteligente, alterações geométricas), sem necessidade de intervenções físicas prévias. Isso reduz custos, riscos e permite decisões baseadas em dados concretos.

Esta pesquisa parte das premissas de que cada alternativa de controle adotada, como a substituição da rotatória por semáforo fixo ou inteligente, ou modificações geométricas e sinalização, provocam efeitos distintos no desempenho viário e emissões de poluentes, e que a microsimulação é a abordagem adequada para compará-las. Modelos tradicionais baseados em médias são insuficientes para capturar interações individuais e variações comportamentais complexas observadas em interseções urbanas, o que reforça a escolha por simulação microscópica como principal método analítico (Zhao *et al.*, 2022)

Além do aspecto técnico, os resultados desta pesquisa também podem ser úteis para a gestão pública. A análise realizada fornece informações que podem orientar intervenções viárias em Goiânia, tanto na interseção em estudo quanto em outras com características semelhantes. As conclusões obtidas podem apoiar decisões voltadas à melhoria da mobilidade urbana, à readequação da infraestrutura viária e à formulação de políticas públicas que visem diminuir congestionamentos e emissões de poluentes.

1.4 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem metodológica quantitativa, de natureza explicativa e descritiva, conforme descrito por Marconi e Lakatos (2017). Tal abordagem permite a avaliação de diferentes alternativas operacionais por meio da modelagem computacional e da análise estatística dos resultados obtidos via microsimulação. A pesquisa é quantitativa por se basear na coleta e análise de dados numéricos, como volumes veiculares, tempos médios de espera, emissões de poluentes e níveis de serviço. Além disso, a pesquisa é considerada descritiva por retratar o comportamento atual do tráfego na rotatória localizada na interseção das Avenidas Transbrasiliana e Feira de Santana, e explicativa ao buscar compreender o impacto de diferentes estratégias de controle sobre a mobilidade urbana e os efeitos ambientais associados.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

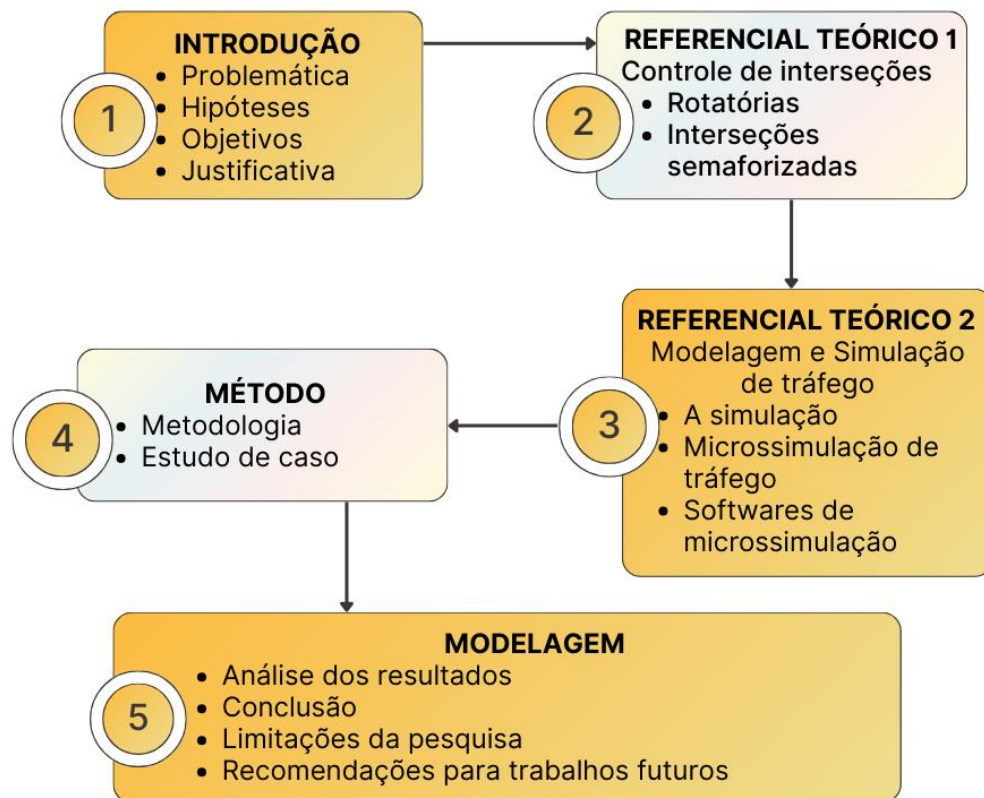
Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, contemplando a contextualização do tema, a formulação do problema de pesquisa, as hipóteses, os objetivos, a justificativa, os procedimentos metodológicos e a descrição da organização do texto.

Os Capítulos 2 e 3 compõem o referencial teórico, abordando, respectivamente, o controle de interseções, incluindo conceitos, classificação, características operacionais e impactos ambientais, e a modelagem e simulação de tráfego, com a apresentação de conceitos, abordagens, estudos correlatos e ferramentas de microssimulação.

O Capítulo 4 descreve o método adotado para o desenvolvimento da pesquisa, detalhando as etapas de coleta, tratamento e análise dos dados. O Capítulo 5 apresenta o estudo de caso, caracterizando a área de aplicação e os procedimentos específicos empregados na implementação do método. Por fim, o Capítulo 6 reúne a análise e a avaliação dos resultados obtidos, discutindo os achados à luz do referencial teórico e dos objetivos propostos.

Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas. A Figura 1 ilustra, de forma esquemática, a estrutura lógica e organizacional deste trabalho, evidenciando a relação entre os capítulos, seus principais conteúdos e o encadeamento metodológico da pesquisa.

Figura 1 - Estrutura do Trabalho



Fonte: Elaborado pelos autores.

2. O CONTROLE DE INTERSEÇÕES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada para embasamento da pesquisa. Inicialmente aborda-se sobre a função da Engenharia de Tráfego no controle e planejamento e controle de interseções urbanas. Em seguida, são discutidos os conceitos operacionais, assim como as principais ferramentas de microsimulação utilizadas para modelagem e avaliação do desempenho de interseções, considerando diferentes condições de controle viário.

2.2 A ENGENHARIA DE TRÁFEGO NO CONTROLE DAS INTERSEÇÕES

A Engenharia de Tráfego é responsável pelo planejamento, operação e controle da circulação viária, com o propósito de promover segurança, fluidez e eficiência no uso das vias. Segundo Vasconcellos (2000), essa área envolve a análise da infraestrutura, do comportamento dos usuários e das características operacionais dos veículos, orientando ações para a gestão da circulação de pessoas e veículos.

De acordo com Ferraz *et al.*, (1999), um trânsito ideal se caracteriza por segurança, fluidez e conforto, o que exige a atuação integrada em três frentes: Engenharia (abrangendo infraestrutura, circulação, estacionamento, sinalização e gestão), Educação (voltada à conscientização e capacitação dos usuários) e Esforço Legal (englobando fiscalização e aplicação de sanções previstas na legislação de trânsito).

A Engenharia de Tráfego, enquanto área aplicada, envolve o planejamento, a operação e o controle de interseções urbanas, com ênfase naquelas classificadas como críticas para a mobilidade. A eficiência operacional dessas interseções é influenciada pela interação entre três elementos: via, usuário e veículo (Ortúzar e Willumsen, 2011; Vasconcellos, 2000). Han *et al.* (2022) e Xie *et al.* (2020) incluíram nesta análise o ambiente como uma quarta variável, abrangendo fatores como condições climáticas, topografia, níveis de ruído, visibilidade e características do entorno urbano, que afetam o comportamento do tráfego.

O modelo *Driver-Vehicle-Environment* (DVE), proposto por Xie *et al.* (2020), formaliza a influência combinada desses elementos no comportamento do condutor, demonstrando que fatores ambientais impactam a estabilidade e segurança do fluxo

viário, especialmente em contextos de tráfego misto. Han *et al.* (2022) reforçam que o comportamento de *car-following* - decisões de aceleração e frenagem em resposta aos veículos à frente - sofre influência não apenas de aspectos humanos e mecânicos, mas também da geometria viária e das condições ambientais, com destaque para as interseções.

No ambiente urbano, os pontos críticos de circulação não se restringem a interseções controladas por semáforos ou rotatórias. Devem ser consideradas também as travessias de pedestres, áreas com visibilidade reduzida, segmentos com alta concentração de acidentes e zonas de conflito entre modais. Mukherjee e Mitra (2022) destacam que interseções sinalizadas concentram a maior parte dos conflitos entre veículos e pedestres. Além disso, faixas de travessias mal posicionadas ou com pouca visibilidade contribuem para o aumento de colisões (Tian *et al.*, 2025).

A geometria viária influencia no desempenho operacional e na segurança. Quando mal planejada, pode comprometer manobras, reduzir a fluidez e elevar o risco de acidentes, principalmente em curvas fechadas e trechos com visibilidade reduzida (Rocha, 2019). Em estudo de caso realizado nos Estados Unidos, Le (2020) identificou que aproximadamente 55% das colisões ocorreram em curvas com raio reduzido, visibilidade limitada e ausência de acostamentos. Como solução, o referido estudo propôs intervenções como aumento do raio das curvas, alargamento de faixas de segurança e correção do traçado horizontal.

Esses aspectos, aliados às características do tráfego local, permitem identificar áreas críticas na malha urbana. Conforme as diretrizes da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), a avaliação de risco em ambientes urbanos deve considerar a frequência de conflitos em cruzamentos e travessias (AASHTO, 2018). Xu *et al.* (2024), por meio da análise de dados de quase-acidentes e padrões espaciais, apontaram que interseções complexas e travessias desprotegidas são marcadores recorrentes de pontos com elevado potencial de risco.

O dimensionamento e a avaliação de interseções devem considerar parâmetros técnicos definidos em normas e manuais. O *Highway Capacity Manual* - HCM (TRB, 2022) define conceitos como capacidade, volume, densidade e espaçamento, além de indicadores como grau de saturação, atraso médio, tempo médio de espera e ocupação de faixas. O DNIT (2010) complementa com definições para Volume Horário de Projeto (VHP), fluxo de saturação, Fator de Pico Horário (FPH) e *headway*.

Assim, para análise de desempenho da interseção objeto deste trabalho, a seguir são apresentados os conceitos dos principais parâmetros abordados nesta pesquisa, considerando o disposto no HCM (TRB, 2022) e DNIT (2010).

- Volume Horário de Projeto: quantidade de veículos que atravessa uma seção da via, durante a hora crítica para o dimensionamento;
- Fluxo de Tráfego: ou volume de tráfego é a quantidade total de veículos que passam por um trecho dentro de um intervalo de tempo. Expresso em minutos, dias, horas, ano, entre outros.
- Taxa de Fluxo: é a taxa horária de veículos que passam por um determinado ponto com período menor que 1 hora, geralmente usa-se 15 minutos.
- Grau de saturação: relação entre volume e capacidade da via;
- Fluxo de saturação: principal métrica para avaliação de semáforos;
- Tempo médio de espera: indicador central de eficiência.
- *Headway*: é o tempo que demora para dois veículos sucessivos passarem por um ponto.

Conceitos como distância de visibilidade e a definição de elementos geométricos (pista, pista de rolamento, via e passeio) também estão descritos no HCM (TRB, 2022) e na AASHTO (2018), servindo de referência para o dimensionamento da malha viária e dos dispositivos de controle. Além disso, elementos como grau de saturação, distância de visibilidade e características geométricas devem ser considerados na análise de interseções (*Transportation Research Board* - TRB, 2022; AASHTO, 2018). Ademais, o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Volume V (CONTRAN, 2022) orienta ainda que se deve observar a hierarquia das vias para dimensionamento da sinalização.

As interseções são zonas de descontinuidade no fluxo viário, onde trajetos convergem, divergem ou se cruzam. Sua configuração afeta a fluidez dos deslocamentos e a segurança dos usuários. Interseções mal projetadas ou operando além da capacidade tendem a gerar retenções, conflitos e maior risco de acidentes (AASHTO, 2018).

O projeto de interseções deve buscar o equilíbrio entre desempenho operacional e segurança, considerando os volumes de tráfego, a hierarquia viária e a composição dos usuários. A classificação entre via principal e secundária, com base nos volumes projetados, é orientada pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Volume V: Sinalização Semafórica (Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, 2022), que

estabelece critérios para o dimensionamento da sinalização conforme a função da via na rede.

A decisão sobre o tipo de controle mais adequado para uma interseção exige análise de dados quantitativos - como volume veicular, presença de obstáculos, geometria viária, área disponível e custos -, além de fatores qualitativos, como o comportamento dos condutores. Assim, o projeto de interseções deve respeitar as normas vigentes e os manuais técnicos (DNIT, 2006), a fim de garantir segurança, conforto e bom nível de serviço.

Considerando os conceitos operacionais e os critérios normativos, torna-se necessário compreender as tipologias de interseções e suas implicações para o desempenho e a segurança viária. A seção seguinte apresenta essa classificação, discutindo suas características, vantagens e limitações à luz das condições de operação e das diretrizes técnicas aplicáveis.

2.3 TIPOS DE INTERSEÇÕES

As interseções podem ser classificadas em dois grandes grupos, conforme a disposição dos planos de cruzamento: interseções em nível, nas quais os fluxos de tráfego convergem, divergem ou se cruzam no mesmo plano, e interseções em desnível, que se caracterizam pela separação física dos movimentos em diferentes planos (DNIT, 2006). Esta classificação orienta os critérios de projeto e os dispositivos de controle a serem empregados em função do volume e da complexidade do fluxo viário.

2.3.1 Interseções em Desnível

As interseções em desnível oferecem benefícios à segurança viária, sobretudo por eliminarem os conflitos diretos entre fluxos opostos de veículos e entre veículos e pedestres, reduzindo o risco de acidentes (CHMIELWSKI e KEMPA, 2019). Além disso, permitem o fluxo contínuo de veículos em velocidades mais altas e podem ser construídas em etapas, minimizando a necessidade de interrupções no tráfego durante as obras (BILEE e PITAKSRINGKARN, 2024). De acordo com Leleisa *et al.*, (2018), esse tipo de infraestrutura resulta em reduções expressivas nos tempos de viagem e nos atrasos em interseções críticas.

Entretanto, esses benefícios devem ser avaliados considerando os altos custos de implantação e os possíveis impactos urbanos e ambientais das interseções em desníveis. Por isso, a viabilidade técnica e econômica dessas obras exige análises de custo-benefício, como as realizadas em estudos de caso em Bangkok e na Etiópia, que demonstraram retorno econômico positivo e melhora significativa nos indicadores de desempenho do tráfego (LELEISA *et al.*, 2018).

As principais formas de interseções em níveis diferentes incluem:

- Viadutos: estruturas elevadas que permitem a continuidade do fluxo viário sobre outra via, eliminando a necessidade de cruzamento em nível (DNIT, 2005), como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Viaduto implantado na rodovia BR-116/CE com alças de acesso laterais.



Fonte: DNIT (2022)

- Passagens Inferiores: infraestruturas subterrâneas utilizadas para permitir a travessia sem interferência com o tráfego superficial, reduzindo congestionamentos e melhorando a segurança viária (DNIT, 2005), como ilustra a Figura 3.

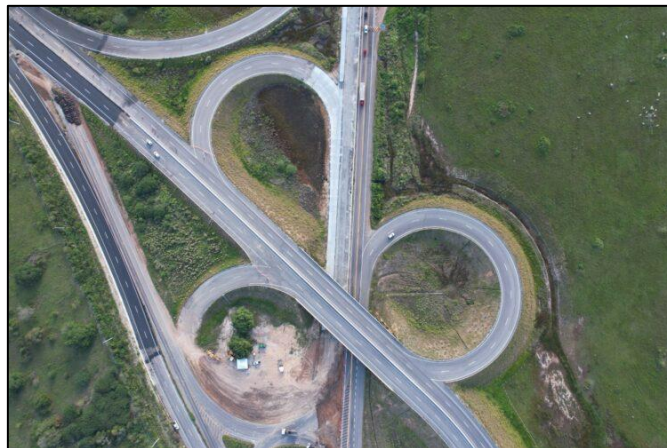
Figura 3 - Obra de implantação de passagem inferior em área urbana.



Fonte: Tribuna do Norte (2018)

- **Trevos Rodoviários:** configurações complexas de interseções que incluem alças e rampas de acesso para garantir a fluidez do tráfego entre rodovias e vias arteriais (DNIT, 2005), ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Trevo rodoviário (BR-304) com alças de conexão em diferentes níveis.



Fonte: Sandro Menezes (ASSECOM/RN), *apud* Blog do Barreto (2024).

A decisão entre manter uma interseção em nível ou implantar uma solução em desnível envolve a avaliação conjunta de fatores como volumes de tráfego, continuidade da via, condições topográficas, disponibilidade de área, custos de construção e potenciais impactos ambientais (SCDOT, 2015).

2.3.2 Interseções em Nível

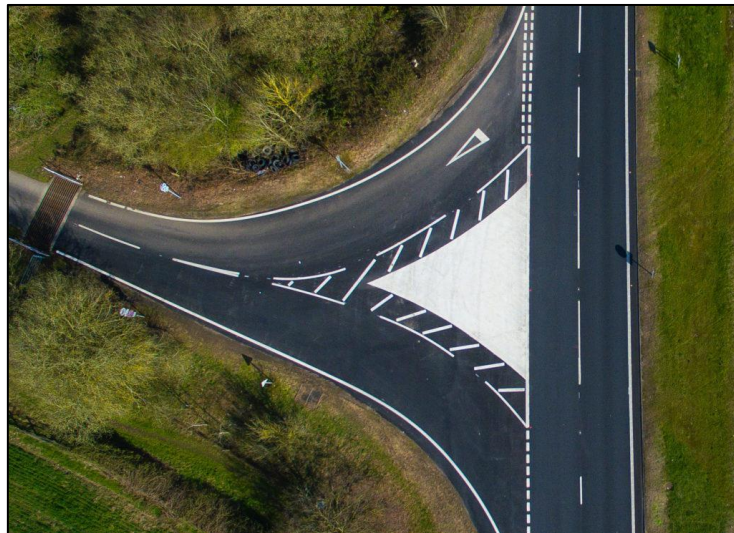
As interseções em nível são predominantes em áreas urbanas e caracterizam-se pela convergência de fluxos no mesmo plano. Sua função é organizar os deslocamentos, distribuir prioridades entre movimentos conflitantes e preservar a continuidade da circulação nos trechos adjacentes. A classificação dessas interseções pode ser feita com base no número de ramos, na geometria adotada e na forma de controle de tráfego empregada. Podem assumir diferentes geometrias, como três ramos (tipo T ou Y), quatro ramos, múltiplos ramos e rotatórias conforme ilustrado nas Figuras 5 a 8 (DNIT, 2005).

Figura 5 - Interseção em T com sinalização vertical de preferência.



Fonte: Boca Santa (2014).

Figura 6 - Interseção em 3 ramos: Tipo Y com canalização de fluxo e marcações em ilha pintada.



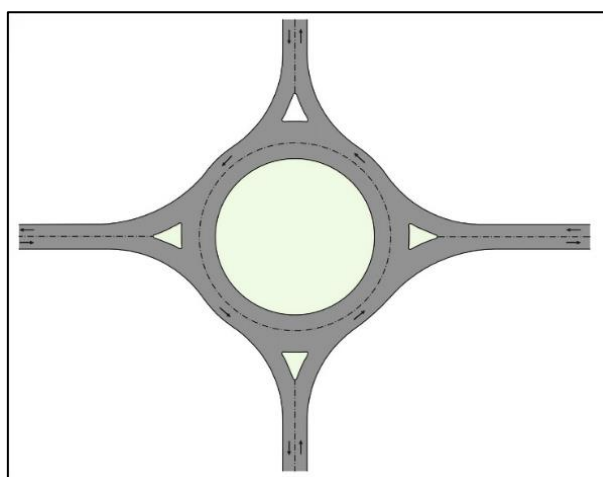
Fonte: Seymour, M. (2023), *apud* Boosted.dk

Figura 7 - Interseção urbana com múltiplos ramos (cinco acessos)



Fonte: Müller *et al.* (2019)

Figura 8 - Interseção tipo Rotatória.

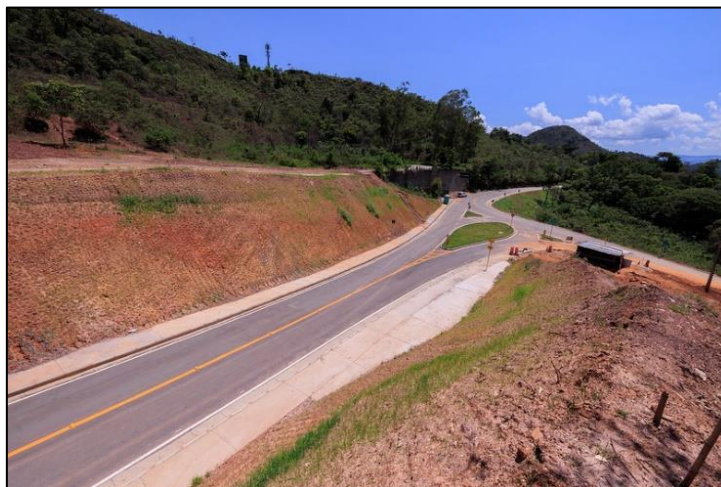


Fonte: Manual de Segurança Viária - DERSP (2023).

Do ponto de vista geométrico, soluções como ilhas canalizadoras, baías de conversão e alinhamentos direcionais são utilizadas para orientar as manobras e reduzir interferências entre os fluxos. A forma de controle influencia no desempenho da interseção, podendo ser do tipo controlado ou não, como em locais com baixo volume de veículos - que o total de veículos que entram no cruzamento é inferior a 1000 veículos por dia, onde o regulamento por sinalização vertical e horizontal é suficiente (CET, 2001).

Para disciplinar conversões à esquerda em vias secundárias, utiliza-se a geometria com ilha do tipo “gota”, cujo traçado guia o condutor com menor interferência sobre o fluxo principal (DNIT, 2005), conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Interseção canalizada do tipo “gota” em pista simples.



Fonte: Prefeitura de Nova Lima (2023)

A rótula vazada permite a travessia direta do fluxo principal através de uma ilha central, enquanto os demais movimentos são redirecionados ao redor dela, conforme mostra a Figura 10. A rotatória tradicional, também chamada de rótula fechada, estabelece um anel de circulação no entorno de uma ilha central, com prioridade para o fluxo giratório e sinalização de regulamentação nos acessos (CET-SP, 2020).

Figura 10 - Rótula vazada em entroncamento urbano (ERS344 com BRS 472, Santa Rosa - RS).



Fonte: DAER (2018)

A escolha da configuração deve considerar a função da via, o volume de tráfego, o espaço disponível e o comportamento dos usuários (TRB, 2022). Quando há coerência entre o projeto e a demanda local, as interseções em nível podem apresentar desempenho satisfatório tanto em termos de fluidez quanto de segurança viária (AASHTO, 2018; FHWA, 2017). Estudos como o de Zhao *et al.* (2022) demonstraram que a complexidade

geométrica afeta o comportamento dos condutores nas interseções, especialmente em cenários com múltiplas interações e diferentes categorias de veículos.

O tipo de controle adotado (semafórico, por sinalização vertical ou rotatória) impacta no desempenho operacional. Para que existam fluidez e segurança do tráfego no local, faz-se necessária a implantação de elementos de controle como placas, semáforos, rotatórias ou até mesmo intervenções maiores como rebaixamento viário e utilização de viadutos, dentre outros. Conforme a localização, os tipos de vias e a quantidade de veículos que circulam por estas, existe um tratamento mais indicado, visando o ordenamento dos fluxos de tráfego e a segurança dos motoristas e pedestres.

2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE ROTATÓRIAS

As rotatórias constituem uma solução adotada no Brasil para o gerenciamento do tráfego urbano, especialmente em contextos nos quais se busca promover maior fluidez operacional sem a implantação de sistemas semaforicos. Sua configuração geométrica é caracterizada pela presença de uma ilha central que organiza a circulação dos veículos em sentido anti-horário, garantindo prioridade àqueles que circulam no anel da interseção, conforme estabelecido pelo Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) e descrito por Moita e Almeida (2012).

De acordo com o Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005), quando adequadamente projetadas, as rotatórias possibilitam a circulação ordenada, contínua e segura do tráfego, ao eliminar cruzamentos diretos e reduzir a severidade dos conflitos veiculares. Esses dispositivos contribuem para a diminuição do número de pontos de conflito, dos tempos de espera e das interrupções no fluxo, além de favorecerem a redução do consumo de combustível e das emissões de poluentes. Adicionalmente, permitem manobras de retorno com maior eficiência e podem agregar valor paisagístico ao espaço urbano. Neris (2019) destaca que, em cenários com elevado volume de conversões à esquerda, as rotatórias tendem a apresentar desempenho superior, ao favorecerem o escoamento contínuo e minimizarem interrupções no tráfego.

Sob condições de demanda compatíveis com sua capacidade operacional, estudos indicam que rotatórias apresentam desempenho superior quando comparadas a interseções semaforizadas ou controladas por prioridade. Esses ganhos são observados na redução dos atrasos médios, no menor número de paradas e, conseqüentemente, na diminuição do consumo de combustível e das emissões de poluentes atmosféricos

(FHWA, 2010; Bertoni e Demarchi, 2005; Melo Neto *et al.*, 2020). Tais benefícios estão associados ao caráter contínuo do fluxo e à eliminação das fases semaforizadas, que reduzem períodos de ociosidade veicular.

A avaliação do desempenho operacional de rotatórias é fundamentada, conforme o Highway Capacity Manual - HCM (TRB, 2022), principalmente no atraso médio de controle por veículo (*average control delay*), parâmetro utilizado para a determinação do Nível de Serviço (NS). O NS é classificado em seis categorias, de A a F, em função dos valores médios de atraso observados nas aproximações da interseção, variando desde condições de operação livre, com baixos atrasos e elevada fluidez, até situações de saturação, caracterizadas por instabilidade operacional e degradação do desempenho viário.

A eficiência operacional das rotatórias está relacionada às suas características geométricas. Elementos como o diâmetro da ilha central, a largura das faixas de entrada e de circulação, os ângulos de aproximação e o número de faixas de tráfego exercem influência significativa sobre a capacidade e a segurança do dispositivo. Segundo FHWA (2000), larguras de faixas de entrada entre 4,0 e 5,0 m para aproximações com faixa simples, ou em torno de 6,0 m para faixas duplas, associadas a faixas de circulação interna aproximadamente 20% mais largas, contribuem para o aumento da capacidade operacional e para a melhoria das condições de segurança viária.

Além disso, intervenções geométricas e operacionais, como a implantação de ilhas canalizadoras adequadamente dimensionadas, a otimização das tangências de entrada e a ampliação da visibilidade nas aproximações, têm se mostrado eficazes na redução de conflitos e na organização dos fluxos veiculares, conforme evidenciado por Braga Neto (2013) e Cruz et al. (2021). A sinalização vertical e horizontal exerce papel complementar relevante, ao reduzir a variabilidade no comportamento dos condutores e assegurar o cumprimento das prioridades de passagem, conforme diretrizes do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2022) e da CET-SP (2020).

Do ponto de vista da segurança viária, as rotatórias modernas, projetadas para induzir a redução de velocidades por meio de deflexões adequadas e geometrias compactas, apresentam desempenho superior ao reduzir a frequência e a severidade dos sinistros. A eliminação de conflitos de cruzamento direto resulta na substituição por pontos de entrelaçamento em ângulos menos severos, associados a colisões de menor impacto (ANTP, 2013; Souza e Raia Junior, 2016). Quando associadas a travessias de

pedestres recuadas e devidamente sinalizadas, as rotatórias também oferecem melhores condições de segurança para usuários vulneráveis.

Em termos ambientais, o desempenho operacional da rotatória influencia os níveis de emissão de poluentes. Em condições de operação dentro da capacidade, a redução de paradas e de ciclos repetidos de aceleração e desaceleração contribui para a diminuição das emissões de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx), além da redução do consumo de combustível (Bertoncini e Demarchi, 2005). Porém, quando submetidas a volumes excessivos ou fluxos desbalanceados, as rotatórias podem apresentar longos tempos de espera e formação de filas, reduzindo ou revertendo esses benefícios ambientais, conforme observado em estudos de simulação como o de Melo Neto *et al.* (2020).

Apesar de suas vantagens, as rotatórias apresentam limitações operacionais. Em cenários de tráfego intenso ou com forte desbalanceamento entre os ramos da interseção, sua eficiência tende a diminuir, podendo tornar-se necessária a adoção de soluções semaforizadas, permanentes ou parciais. Melo Neto *et al.* (2020), por exemplo, demonstraram que a implantação de semaforização em horários de pico pode melhorar a fluidez e reduzir conflitos em rotatórias operando próximas ou acima da capacidade. Além disso, a necessidade de maior espaço físico e o processo de adaptação dos usuários ao dispositivo representam desafios adicionais à sua implantação em áreas urbanas consolidadas (Sousa e Raia, 2022).

Dessa forma, a escolha entre a implantação de uma rotatória ou de uma interseção semaforizada deve ser orientada por uma análise técnica criteriosa, que considere volumes de tráfego, equilíbrio entre os fluxos, segurança viária, custos de implantação e manutenção, impactos ambientais e características do entorno urbano (DAER-RS, 2016). A decisão deve buscar o equilíbrio entre eficiência operacional, segurança e sustentabilidade, de modo a garantir a solução mais adequada às condições específicas da interseção analisada

2.5 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SEMÁFOROS DE TEMPO FIXO

Os semáforos de tempo fixo constituem dispositivos de controle de interseções baseados em ciclos com duração previamente definida, nos quais as fases verde, amarela e vermelha seguem intervalos temporais constantes, independentemente das variações

instantâneas da demanda de tráfego. Conforme o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Volume V: Sinalização Semafórica (CONTRAN, 2022), a definição desses tempos deve ser precedida de estudos técnicos que considerem os volumes veiculares, as características geométricas da interseção, o comportamento dos condutores e as condições ambientais locais, de modo a garantir segurança e eficiência operacional.

A estrutura básica do ciclo semafórico compreende o tempo de verde, destinado à liberação do fluxo veicular; o tempo de amarelo, que atua como intervalo de transição e segurança; o tempo de vermelho, responsável pela retenção do fluxo; e o tempo total de ciclo, correspondente à soma de todas as fases. Em conformidade com a Resolução CONTRAN nº 483/2014, os tempos de verde e vermelho devem ser dimensionados de forma a atender adequadamente tanto a demanda veicular quanto as necessidades de travessia de pedestres, respeitando critérios mínimos de segurança, visibilidade e fluidez.

As interseções semaforizadas são indicadas em situações nas quais a demanda veicular se aproxima ou excede a capacidade operacional da interseção, especialmente quando há predominância de um fluxo principal. Nesses contextos, o controle semafórico assegura a alternância ordenada do direito de passagem, evitando a sobrecarga de determinados acessos. Segundo o MBST - Volume V (CONTRAN, 2022), considera-se que há “alto volume” quando o fluxo veicular atinge valores próximos ao fluxo de saturação estimado para a interseção, tornando necessária a organização do tráfego por meio de fases bem definidas.

Os sistemas de controle semafórico podem ser classificados conforme o grau de integração e a forma de operação. De acordo com Pietrantonio (2018), o controle isolado é aplicado a elementos viários específicos, como cruzamentos individuais ou rampas de acesso, sendo adequado a locais com baixa interação entre interseções adjacentes. Já o controle coordenado envolve a sincronização de múltiplas interseções ao longo de um corredor viário, estratégia conhecida como “onda verde”, que contribui para a redução de paradas sucessivas, melhora da fluidez e diminuição do consumo de combustível.

Quanto à lógica de operação, os sistemas podem ser programados ou responsivos. Os métodos programados baseiam-se em padrões históricos de demanda e capacidade, mantendo ciclos e tempos fixos ao longo de períodos pré-determinados. Já os métodos responsivos utilizam informações coletadas em tempo real por meio de detectores veiculares ou de pedestres. Nesse grupo, destacam-se: (i) o controle atuado pelo tráfego, que ajusta a duração das fases em função da detecção imediata de usuários; (ii) o controle adaptativo, que revisa a programação a cada ciclo com base em dados atualizados de

demanda; e (iii) os sistemas de controle em tempo real, que aplicam lógica adaptativa integrada a uma rede ou área monitorada, permitindo intervenções coordenadas em escala mais ampla (PIETRANTONIO, 2018).

Em relação aos modos de comando, distingue-se o controle local, no qual o próprio equipamento instalado na interseção realiza as decisões operacionais, e o controle centralizado, em que uma unidade de gerenciamento supervisiona diversos dispositivos, possibilitando diferentes níveis de intervenção e ajustes estratégicos em tempo real (FHWA, 2006).

A eficiência operacional dos semáforos de tempo fixo está relacionada à adequada calibração dos tempos de ciclo. Conforme orientações da CET (2015), a definição ou revisão desses tempos requer a realização de estudos de contagem volumétrica, que podem ser conduzidos por observação direta, registros em vídeo, sensores automáticos ou ferramentas digitais. Programações incompatíveis com a demanda real tendem a resultar em aumento dos tempos de espera, formação de filas extensas e intensificação das emissões de poluentes (COELHO *et al*, 2006).

O desempenho de interseções semaforizadas é comumente avaliado por indicadores como o tempo médio de espera e o nível de serviço (NS). Segundo o Highway Capacity Manual - HCM (2022), o NS é determinado com base no atraso médio por veículo, sendo classificado em seis níveis, de A a F, variando desde condições de operação eficiente, com atrasos inferiores a 10 s/veículo, até situações de saturação, com atrasos superiores a 80 s/veículo.

Do ponto de vista ambiental, a operação de semáforos de tempo fixo está associada ao aumento da frequência de paradas e retomadas de movimento, o que contribui para maiores emissões de poluentes, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado. Nesse sentido, Deschle *et al.* (2021) demonstraram que a eliminação de uma única parada em interseções pode resultar em reduções médias de até 0,32kg de CO₂ e 1,8g de NO_x por veículo pesado, evidenciando a relevância da eficiência operacional para a mitigação de impactos ambientais.

Dessa forma, a adoção de semáforos de tempo fixo deve ser fundamentada em uma análise técnica detalhada das condições locais, considerando padrões de demanda, custos de implantação e manutenção, além dos impactos operacionais e ambientais associados. Essa solução mostra-se mais adequada para interseções com tráfego relativamente estável, baixo nível de conflitos modais e restrições espaciais que inviabilizem a implementação de alternativas mais complexas de controle viário.

2.6 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SEMÁFOROS INTELIGENTES

Os semáforos inteligentes, também denominados semáforos adaptativos, consistem em sistemas avançados de controle de tráfego que utilizam sensores, comunicação em tempo real e algoritmos de otimização para ajustar dinamicamente os tempos semafóricos em função das condições instantâneas de demanda veicular. Diferentemente dos sistemas de tempo fixo, cuja programação permanece inalterada ao longo do tempo, os sistemas adaptativos são projetados para responder de forma contínua às flutuações do fluxo de tráfego, com o objetivo de minimizar atrasos, reduzir filas e otimizar a fluidez operacional (CAVALHEIRO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2024).

A operação desses sistemas é viabilizada por uma infraestrutura de sensoriamento composta por dispositivos como laços indutivos, câmeras de vídeo, detectores infravermelhos, radares e, mais recentemente, dados provenientes de veículos conectados. Esses sensores fornecem informações continuamente atualizadas sobre volumes, velocidades, ocupação das faixas e formação de filas, as quais são processadas pelo controlador semafórico em tempo real (CAVALHEIRO *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022). Com base nesses dados, os tempos de verde, amarelo e vermelho são ajustados automaticamente, permitindo maior aderência entre a oferta de capacidade e a demanda momentânea.

Do ponto de vista operacional, o Highway Capacity Manual (HCM, 2022) reconhece que sistemas semafóricos adaptativos apresentam elevado potencial para a redução do atraso médio por veículo, uma vez que a programação dos ciclos é continuamente ajustada às variações da demanda. Estudos indicam que essa capacidade de resposta imediata está associada à redução do tempo médio de espera (TME) e à mitigação de congestionamentos recorrentes, especialmente em vias urbanas que possuem elevada variabilidade de fluxo ao longo do dia (CAPECE & MANHIÇA, 2016; SONG *et al.*, 2025). Resultados apresentados por Song *et al.* (2025) demonstram reduções de até 40% no TME quando comparados a sistemas de tempo fixo, sobretudo em redes urbanas complexas com padrões de tráfego instáveis.

No que se refere ao Nível de Serviço (NS), a literatura indica que a adoção de semáforos inteligentes pode resultar em melhorias no desempenho operacional das interseções. Conforme o HCM (2022), a redução do atraso médio proporcionada por esses sistemas possibilita a elevação do NS em uma ou duas categorias, por exemplo, de níveis

D ou E para níveis B ou C. Zrigui *et al.* (2023) corroboram esses resultados ao evidenciarem que interseções controladas por sistemas adaptativos, calibrados com dados em tempo real, apresentaram desempenho superior em comparação a configurações de tempo fixo, sobretudo sob condições de alta variabilidade de demanda. Ainda nesse sentido, simulações conduzidas por Song *et al.* (2025) indicam que a otimização semafórica baseada em algoritmos avançados contribui não apenas para a melhoria do NS, mas também para a redução do número de paradas e do consumo energético dos veículos.

Entre as tecnologias mais consolidadas de controle semafórico adaptativo destacam-se os sistemas SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) e SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*), amplamente utilizados em cidades como Londres, Melbourne e Cingapura (CAPECE e MANHIÇA, 2016). No Brasil, experiências em cidades como São Paulo e Belo Horizonte indicam ganhos operacionais relevantes, embora a expansão desses sistemas ainda enfrente desafios relacionados à infraestrutura de comunicação, aos custos de implantação e manutenção e à integração com redes semafóricas preexistentes (CAVALHEIRO *et al.*, 2021).

Além dos benefícios operacionais, os semáforos inteligentes apresentam impactos positivos sob a perspectiva ambiental. A redução do número de paradas e das oscilações repetidas de aceleração e frenagem contribui para a diminuição do consumo de combustível e das emissões de poluentes atmosféricos. Estudos baseados em medições reais indicam que a eliminação de uma parada em interseções semaforizadas pode resultar em reduções de até 0,32 kg de CO₂ e 1,8 g de NO_x por veículo pesado, evidenciando o papel estratégico do controle semafórico adaptativo na mitigação de impactos ambientais (DESCHLE *et al.*, 2022). Resultados semelhantes são reportados em pesquisas recentes que integram controle adaptativo, veículos conectados e estratégias cooperativas de gestão do tráfego (XIN *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2024).

Apesar de suas vantagens, a implantação de semáforos inteligentes apresenta limitações relevantes. Entre os principais entraves destacam-se o elevado custo inicial de implementação, a necessidade de infraestrutura robusta de comunicação e processamento de dados, a manutenção contínua dos sensores e a capacitação técnica de operadores e gestores públicos. No entanto, avanços recentes em aprendizado de máquina, redes veiculares e sistemas cooperativos de transporte têm ampliado a viabilidade técnica e econômica desses sistemas, inclusive em ambientes urbanos complexos e heterogêneos (ZHAO *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2024).

Dessa forma, os semáforos inteligentes configuram-se como uma alternativa tecnicamente eficiente para o controle de interseções em contextos urbanos com elevada variabilidade de demanda e restrições operacionais, desde que sua adoção seja precedida por estudos técnicos detalhados que considerem custos, infraestrutura disponível, integração com sistemas existentes e objetivos operacionais e ambientais do sistema viário.

2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS DO TRÁFEGO URBANO

O tráfego urbano é uma das principais fontes de poluição atmosférica em áreas metropolitanas, exercendo influência sobre a qualidade do ar, a saúde pública e os processos associados às mudanças climáticas. A combustão de combustíveis fósseis em veículos automotores resulta na emissão de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), poluentes amplamente associados a doenças respiratórias, cardiovasculares e ao agravamento do efeito estufa (CETESB, 2020; ALVES *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, o setor de transportes representa uma parcela considerável das emissões de gases de efeito estufa. Dados do Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento indicam que, em 2022, aproximadamente 13% das emissões nacionais estiveram associadas ao transporte, sendo cerca de 74% atribuídas ao uso de automóveis em áreas urbanas (ITDP, 2023). Esse cenário é intensificado pelo crescimento populacional, pela expansão da frota veicular e pela predominância do transporte individual motorizado, fatores que contribuem para a recorrência de congestionamentos e para o aumento do tempo de operação dos motores em condições pouco eficientes.

Além da poluição atmosférica, o tráfego urbano é fonte relevante de poluição sonora. As sucessivas acelerações e frenagens, associadas à circulação em regime intermitente e ao uso inadequado de dispositivos sonoros, elevam os níveis de ruído ambiental. A Organização Mundial da Saúde reconhece a poluição sonora como um fator de risco à saúde, associando-a a distúrbios do sono, estresse crônico e aumento da incidência de doenças cardiovasculares (OMS, 2022).

A relação entre desempenho operacional do tráfego e impactos ambientais é reconhecida na literatura. Condições de operação caracterizadas por interrupções frequentes do fluxo, longos tempos de espera e elevada variabilidade de velocidade

tendem a apresentar maior consumo energético e maiores taxas de emissão de poluentes. Nesse sentido, estratégias de controle de tráfego que promovam maior regularidade do fluxo veicular, como a coordenação semafórica e a adoção de sistemas adaptativos, têm demonstrado potencial para reduzir emissões ao minimizar ciclos repetitivos de parada e retomada (WANG *et al.*, 2024; ZRIGUI *et al.*, 2025). Estudos indicam reduções significativas nas emissões de CO₂ e NO_x associadas à eliminação de paradas desnecessárias em interseções, quando comparados cenários de controle adaptativo e de tempo fixo (DESCHLE *et al.*, 2021; ZRIGUI *et al.*, 2025).

No caso das rotatórias, embora essas interseções apresentem vantagens ambientais sob condições de tráfego equilibrado, a ocorrência de filas nas aproximações pode resultar em padrões operacionais semelhantes aos observados em interseções semaforizadas congestionadas, com aumento do consumo de combustível e das emissões veiculares. Assim, o desempenho ambiental das rotatórias está diretamente condicionado à adequação entre demanda, geometria e capacidade operacional, reforçando a necessidade de avaliações integradas que considerem simultaneamente indicadores de fluidez e de impacto ambiental (Song *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a aplicação de modelos de simulação microscópica, como Vissim e SUMO, associada aos procedimentos analíticos do *Highway Capacity Manual* (HCM, 2022), permite estimar de forma prospectiva os impactos ambientais decorrentes de diferentes configurações geométricas e estratégias de controle de tráfego. A incorporação sistemática de critérios ambientais às análises de desempenho operacional contribui para decisões de projeto mais alinhadas aos princípios da mobilidade sustentável, ao permitir a avaliação conjunta da eficiência viária, da segurança e da mitigação dos impactos ambientais associados ao sistema de transporte urbano.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais fundamentos técnicos associados ao controle de interseções no contexto da engenharia de tráfego urbano, com ênfase na eficiência operacional, na segurança viária e nos impactos ambientais. Foram abordados parâmetros utilizados para a avaliação do desempenho viário, como tempo médio de espera, nível de serviço (NS), volumes de tráfego, características geométricas e condições operacionais, bem como os principais tipos de controle aplicáveis às interseções urbanas, incluindo rotatórias, semáforos de tempo fixo e sistemas semafóricos inteligentes.

Os resultados da revisão indicam que a definição da solução de controle mais adequada depende de uma análise integrada das condições locais e dos padrões de demanda. Interseções caracterizadas por geometrias complexas, fluxos desbalanceados ou elevados volumes veiculares tendem a demandar formas de controle mais restritivas, como a semaforização, a fim de assegurar níveis adequados de operação e segurança. Porém, contextos com distribuição mais homogênea de tráfego podem se beneficiar da adoção de rotatórias, as quais favorecem a fluidez e a redução de conflitos. Já os sistemas semaforicos inteligentes mostram-se mais apropriados para ambientes urbanos dinâmicos, nos quais a variabilidade temporal da demanda exige respostas operacionais adaptativas e maior eficiência energética e ambiental.

A análise dos impactos ambientais do tráfego permitiu constatar que há relação entre o tipo de controle de interseções e as emissões veiculares. Estratégias que promovem a redução de paradas, a regularidade do fluxo e a mitigação de congestionamentos contribuem significativamente para a diminuição das emissões de poluentes atmosféricos, como CO_2 e NO_x , além de favorecerem o uso mais eficiente da energia. Nesse sentido, o controle de interseções assume papel relevante não apenas na mobilidade urbana, mas também na promoção de soluções alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

Diante desse cenário, a simulação computacional destaca-se como uma ferramenta fundamental para o planejamento e a avaliação de alternativas de controle viário. A modelagem de interseções por meio de softwares especializados permite estimar, de forma controlada e antecipada, indicadores de desempenho operacional e impactos ambientais associados a diferentes cenários, reduzindo incertezas e riscos na tomada de decisão, sem a necessidade de intervenções diretas no sistema real.

Os fundamentos técnicos e conceituais apresentados neste capítulo fornecem o embasamento necessário para o desenvolvimento das análises subsequentes. Assim, o Capítulo 3 aprofunda os aspectos teóricos e metodológicos relacionados à simulação computacional, estabelecendo as diretrizes que orientam a construção, a calibração e a interpretação de modelos aplicados à avaliação do tráfego urbano.

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO: CONCEITOS E FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE INTERSEÇÕES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo aborda a modelagem e a simulação de tráfego como instrumentos essenciais para a análise e a avaliação do desempenho operacional de interseções viárias. Diante da crescente complexidade das redes urbanas, das restrições orçamentárias associadas à implantação de intervenções físicas e da necessidade de decisões técnicas fundamentadas em dados, a simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta estratégica no âmbito da engenharia de tráfego.

Por meio da representação detalhada do comportamento dos usuários e das interações veiculares, a simulação permite a análise prospectiva de diferentes alternativas de controle e de configuração geométrica, possibilitando a antecipação de impactos sobre indicadores como atraso, nível de serviço, formação de filas e variabilidade operacional. Dessa forma, torna-se viável comparar cenários de forma controlada e sistemática, reduzindo incertezas e riscos associados à implementação de soluções no sistema viário real, sem a necessidade de intervenções diretas durante a fase de planejamento.

3.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A simulação de tráfego consiste em uma técnica computacional utilizada para representar o comportamento dos fluxos veiculares em redes viárias. Essa abordagem permite analisar o desempenho operacional de sistemas de tráfego sob diferentes condições de demanda, controle e geometria, possibilitando a avaliação prévia de intervenções antes de sua implementação física. Dessa forma, torna-se possível reduzir incertezas, custos e riscos associados à experimentação direta no sistema real.

De acordo com Cervellera *et al.* (2022), os modelos de simulação viária possibilitam a construção de cenários hipotéticos com elevado grau de realismo, nos quais variáveis operacionais podem ser sistematicamente controladas e comparadas. De modo complementar, Kapusta e Trúchly (2023) destacam que essas ferramentas conseguem prever os efeitos de decisões de planejamento sobre a circulação urbana, contribuindo para a formulação de estratégias que conciliem eficiência operacional, segurança viária e sustentabilidade.

A avaliação do desempenho operacional de interseções é tradicionalmente baseada em indicadores consolidados, entre os quais se destaca o Nível de Serviço (NS), conforme estabelecido pelo *Highway Capacity Manual* (HCM, 2022). O NS expressa a qualidade das condições de operação do tráfego a partir de métricas como o atraso médio por veículo, os volumes de tráfego e o grau de utilização da capacidade viária. Para interseções semaforizadas, o atraso médio constitui o principal parâmetro de classificação, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 -Classificação do Nível de Serviço (NS) em interseções semaforizadas segundo o tempo médio de atraso.

NS	Tempo Médio de Atraso (segundos/veículo)	Descrição
A	≤ 10	Fluxo livre, sem atrasos perceptíveis
B	10 - 20	Pequenos atrasos, boa fluidez
C	20 - 35	Atrasos moderados, fluxo estável
D	35 - 55	Atrasos significativos, tráfego próximo à capacidade
E	55 - 80	Condições instáveis, tráfego próximo à saturação
F	> 80	Congestionamento severo, necessidade de intervenção

Fonte: Adaptado de TRB (2022).

A análise do NS permite identificar pontos críticos de operação e avaliar, de forma comparativa, a eficácia de diferentes alternativas de controle de tráfego. Nesse contexto, a simulação computacional potencializa o processo de avaliação ao possibilitar a mensuração dos impactos de alterações operacionais, como mudanças nos tempos semaforicos, na geometria da interseção ou na distribuição dos fluxos, sem interferir diretamente na operação real do sistema viário (PEDROSA *et al.*, 2020).

Além do Nível de Serviço alguns outros parâmetros são utilizados e avaliados dentro de softwares de microssimulação, dentre eles destacando-se: formação de filas, tempo de atraso médio, número de paradas, tempo perdido, gasto de combustível e emissão de poluentes.

A extensão média de fila mensura o comprimento da fila de espera durante período de análise, refletindo ocupação desnecessária do espaço público. A dinâmica de formação é governada pela relação entre taxa de chegada (demanda) e taxa de saída (capacidade): quando a demanda excede a capacidade, filas formam-se continuamente (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2016).

Do ponto de vista de planejamento urbano, filas longas representam ocupação desnecessária do espaço público por infraestrutura de transportes estática, limitando espaço disponível para mobilidade ativa (pedestres, ciclistas), comércio de rua, ou outros usos urbanos.

Em contextos de saturação crônica, filas podem estender-se além da interseção propriamente dita para vias anteriores e bloqueando entrelaçamento de tráfego (weaving) em seções anteriores, gerando efeitos em cascata de congestionamento em rede viária maior. Por isso, a compreensão da dinâmica de formação de filas é fundamental para desenho tanto de geometria de interseção (através de alargamento de abordagens, criação de faixas adicionais) quanto de estratégias de controle (semáforos, priorização de fluxos).

O número total de veículos processados por uma interseção durante período representa a capacidade de tráfego, englobando todas as categorias veiculares (automóveis leves, motocicletas, veículos comerciais, ônibus, caminhões). Essa métrica permite o estudo e entendimento de escala de movimento através da interseção e permite avaliação de utilização de capacidade teórica. A capacidade teórica de uma interseção é determinada por fatores geométricos (número e largura de faixas), fatores comportamentais (velocidades desejadas, aceitação de gaps), e fatores de controle (tempos de semáforo, prioridades).

Em geral, interseções operando abaixo de 70-80% de capacidade teórica mantêm operação estável com filas mínimas; acima desse patamar, filas começam a formar; e acima de 95-100% de capacidade, operação torna-se instável com oscilações grandes de comprimento de fila. O conceito de fluxo crítico refere-se ao volume máximo que pode ser processado em condições estáveis; ultrapassado esse ponto, sistema entra em regime de congestão onde pequenas perturbações (variação de demanda, evento inesperado) causam degradação rápida de desempenho. A análise de volumes permite identificar períodos críticos (picos) onde intervenções operacionais são mais necessárias (WU, 2008).

O total de pessoas transportadas representa uma perspectiva negligenciada em análises focadas em volume veicular. Um automóvel particular transporta cerca de 1,3 pessoas enquanto ônibus transporta 40-80 pessoas (IPEA, 2017). Essa desigualdade demonstra a ineficiência da mobilidade urbana: volume alto de veículos particulares resultando na ocupação e saturação viária para transportar menor número de pessoas.

O atraso médio por veículo é a métrica utilizada para avaliar a eficiência operacional, sendo definido como tempo adicional gasto em relação ao tempo em escoamento livre (UFC, 2017; USP, 2019). É composto por atraso uniforme (paradas semaforicas) e atraso contínuo (atraso por fila). O atraso resulta em: custo econômico (tempo perdido), custo ambiental (consumo elevado de combustível e emissão de gases poluentes), e custo social (redução da atratividade do transporte público). A redução de atraso é um dos objetivos primários de toda intervenção da engenharia de tráfego.

Monóxido de carbono (CO) é produto de combustão incompleta associado a operação fria, baixa velocidade ou acelerações intensas, já os Óxidos de nitrogênio (NOx) formam-se em combustão a alta temperatura e são precursores de ozônio troposférico, causando problemas respiratórios; essas variáveis são impactadas pelo volume de tráfego e velocidades média, uma vez que emissões são particularmente sensíveis a perfis dinâmicos de aceleração forte (AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2021).

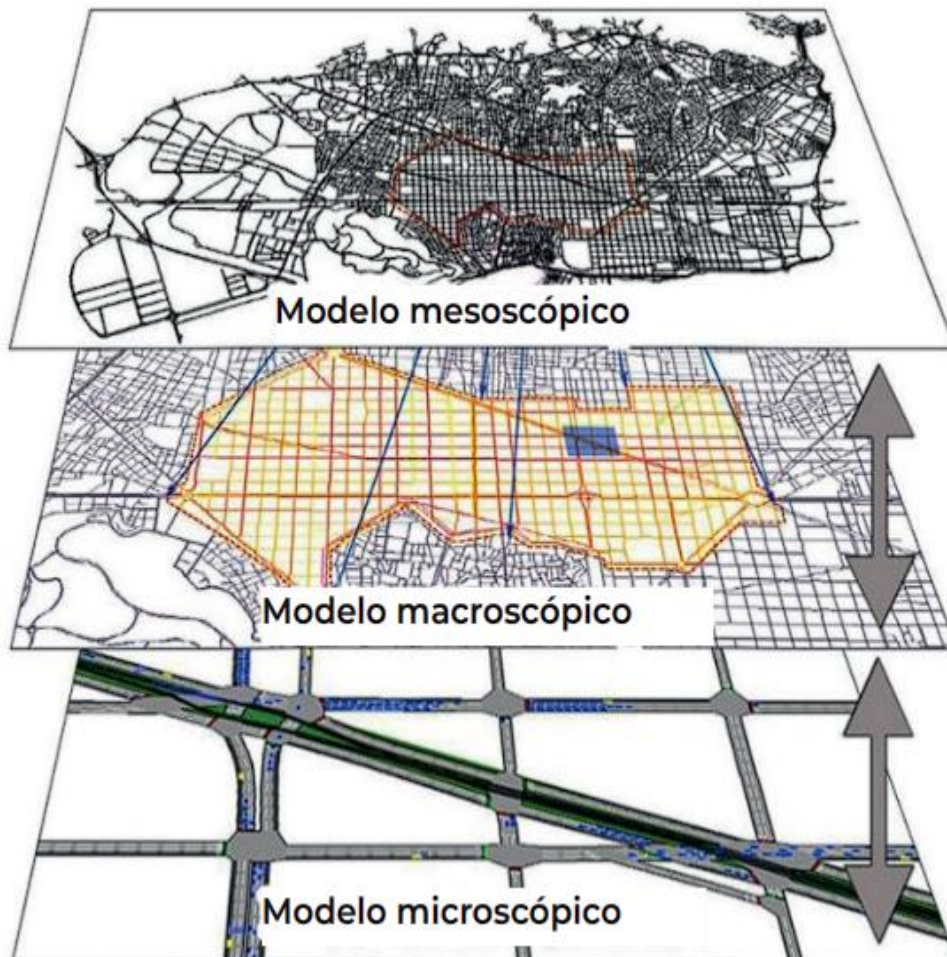
Dessa maneira, a simulação de tráfego consolida-se como uma ferramenta usada para a análise dos sistemas viários. Ao modelar digitalmente uma interseção ou rede, ela possibilita a reprodução e medição dos indicadores de desempenho operacional (NS, extensão de filas, volume processado e atraso médio) e, também, a quantificação de impactos (emissões de poluentes - CO e NOx). Através da criação de cenários hipotéticos, a simulação viabiliza a avaliação comparativa de diferentes intervenções, testando desde ajustes semaforicos até modificações geométricas, com o objetivo final de equilibrar eficiência operacional, segurança viária, equidade no transporte e sustentabilidade ambiental, antes mesmo de qualquer intervenção física ou alocação definitiva de recursos.

Historicamente, a aplicação da simulação ao estudo do tráfego teve início a partir da década de 1950, com modelos macroscópicos baseados em analogias entre o fluxo veicular e o comportamento de fluidos, como os modelos clássicos de Lighthill e Whitham (1955). A partir das décadas de 1960 e 1970, surgiram os primeiros modelos computacionais voltados à análise de tráfego em vias expressas e interseções, incluindo ferramentas como *FREQ*, *CORQ* e *INTRAS*. O avanço da capacidade computacional, especialmente a partir da década de 1990, possibilitou o desenvolvimento de modelos mais detalhados, dando origem aos simuladores microscópicos modernos, como *FRESIM*, *PARAMICS*, *INTEGRATION*, *AIMSUN*, *SUMO* e *Vissim* (Lighthill e Whitham, 1955).

A evolução dos modelos de simulação de tráfego refletiu não apenas os avanços computacionais, mas também a necessidade crescente de representar o sistema viário em diferentes níveis de detalhe, conforme os objetivos da análise. Nesse contexto, os modelos passaram a ser classificados, de forma consolidada na literatura, em macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos, de acordo com o grau de agregação das variáveis e a forma de representação do comportamento veicular (GARTNER *et al.*, 2002). Essa classificação permite selecionar a abordagem mais adequada em função da escala de análise, da complexidade operacional do sistema e do nível de precisão requerido.

Os modelos de fluxo são classificados em macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos, conforme o nível de detalhamento adotado (GARTNER *et al.*, 2002), conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Níveis de Simulação de Tráfego.



Fonte: Adaptado de ITS International (2014).

Os modelos macroscópicos constituem a forma mais agregada de representação do tráfego, descrevendo o sistema viário a partir de variáveis médias, como fluxo, densidade e velocidade, sem considerar o comportamento individual dos veículos. Nessa abordagem, o tráfego é tratado como um meio contínuo, fundamentado em analogias com a mecânica dos fluidos, sendo sua dinâmica representada por equações diferenciais que descrevem a evolução espaço-temporal do escoamento veicular. Esses modelos são amplamente utilizados em estudos de planejamento estratégico, avaliação de capacidade e análise de congestionamentos em redes de grande porte, em função de sua simplicidade conceitual e elevada eficiência computacional (FIEMS e PRABHU, 2021; FOSU e ODURO, 2020).

Os modelos mesoscópicos situam-se em um nível intermediário entre as abordagens macro e micro, representando o tráfego por meio de grupos de veículos com características semelhantes, frequentemente organizados em platoons. Essa abordagem busca equilibrar o detalhamento comportamental com a eficiência computacional, sendo adequada para simulações de redes urbanas de maior porte, nas quais a modelagem individual de todos os veículos se torna computacionalmente onerosa. Os modelos mesoscópicos são amplamente utilizados em avaliações estratégicas e táticas, permitindo análises rápidas de cenários alternativos com níveis satisfatórios de precisão (JAMSHIDNEJAD *et al.*, 2017).

Os modelos microscópicos, por sua vez, representam explicitamente o comportamento individual dos veículos, incorporando interações como seguimento veicular (*car-following*), mudança de faixa, aceleração e frenagem. Esse nível de detalhamento permite reproduzir com maior fidelidade os processos decisórios dos condutores e as dinâmicas locais do tráfego, sendo amplamente empregado em ambientes urbanos e em análises de interseções. Esses modelos são particularmente adequados para a avaliação de intervenções operacionais e geométricas, como ajustes semafóricos, reconfiguração de faixas e implantação de dispositivos de controle, uma vez que possibilitam a simulação precisa de manobras específicas e interações complexas entre veículos (ZHANG *et al.*, 2024).

Estudos recentes têm ampliado essa abordagem ao integrar técnicas de aprendizado de máquina e aprendizado por reforço, visando representar de forma mais realista o comportamento dos condutores, especialmente em processos de mudança de faixa e aceitação de brechas (ZHAO *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo das principais características e aplicações desses modelos.

Tabela 2 - Resumo dos Modelos de Fluxo de Tráfego.

Modelo	Descrição	Variáveis Consideradas
Macroscópicos	Representam o tráfego como um fluxo contínuo, análogo a um fluido.	Densidade (veículos/km), fluxo (veículos/h), velocidade média (km/h).
Mesoscópicos	Intermediários entre os modelos macroscópicos e microscópicos, analisam grupos de veículos (platoons).	Características agregadas de grupos de veículos, incluindo tempos médios de viagem.
Microscópicos	Simulam o comportamento individual de cada veículo.	Tempo de reação, aceleração, distância entre veículos.

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2024); Zhao *et al.* (2021); Fiems e Prabhu (2021); Fosu e Oduro (2020); Jamshidnejad *et al.* (2017); Souza *et al.* (2019).

A escolha do tipo de modelo de simulação depende de diversos fatores, incluindo os objetivos do estudo, o grau de detalhamento requerido, a disponibilidade e qualidade dos dados, bem como restrições de tempo e orçamento. No presente estudo, optou-se pela modelagem microscópica, em razão da necessidade de uma análise detalhada do desempenho operacional de interseções urbanas, caracterizadas por interações complexas entre veículos e, frequentemente, por conflitos com pedestres e outros modos de transporte (LUK *et al.*, 2006; ZHAO *et al.*, 2022).

A simulação de tráfego depende da qualidade e abrangência dos dados utilizados como entrada. Entre as principais informações requeridas destacam-se matrizes origem-destino, contagens volumétricas horárias, velocidades médias observadas, características geométricas das vias, tempos semafóricos e parâmetros representativos do comportamento dos condutores. Esses dados constituem a base para a configuração do modelo, permitindo que as condições reais de operação da interseção sejam adequadamente representadas no ambiente de simulação (FHWA, 2004).

A partir dessa configuração inicial, procede-se às etapas de calibração e validação do modelo. A calibração consiste no ajuste sistemático dos parâmetros mais sensíveis, como os relacionados ao seguimento veicular, mudança de faixa, comportamento lateral e fluxo de saturação, de modo que os resultados simulados se aproximem dos valores observados em campo. Esse processo é geralmente conduzido de forma iterativa, iniciando-se por parâmetros globais e avançando para ajustes mais específicos conforme necessário (MALEANU & RACANEL, 2023).

Bandi e George (2020) destacam a importância de priorizar parâmetros de maior impacto operacional, como distância média entre veículos consecutivos em regime de parada (*average standstill distance*), distância mínima de antecipação (*minimum look-ahead distance*) e limites da velocidade desejada (*lower limit of desired speed*), a fim de garantir maior eficiência e robustez ao processo de calibração.

A validação, etapa subsequente, tem como objetivo verificar a capacidade do modelo calibrado de reproduzir adequadamente o comportamento do sistema real quando aplicado a conjuntos de dados distintos daqueles utilizados na calibração. Essa etapa envolve a comparação entre dados simulados e observados em campo, utilizando métricas de desempenho como volumes por faixa ou abordagem, tempos médios de viagem,

comprimentos de fila, atrasos e tempos de parada (SHAFIEI *et al.*, 2018; MALEANU e RACANEL, 2023).

3.3 A MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A microsimulação de tráfego é uma técnica de modelagem que representa explicitamente o comportamento individual de veículos e condutores em redes viárias, considerando variáveis como aceleração, tempo de reação, distância de seguimento, mudanças de faixa, interações em interseções e aceitação de brechas. Esse elevado nível de detalhamento permite reproduzir com maior fidelidade a dinâmica operacional do tráfego, sendo particularmente adequado para a análise de ambientes urbanos complexos, como interseções semaforizadas, rotatórias e corredores com múltiplos modais. A incorporação de mecanismos comportamentais, como a aceitação de brechas em interseções não sinalizadas, contribui para aumentar o realismo dos modelos, aproximando os resultados simulados das observações empíricas (BAGHERI *et al.*, 2022).

Novas abordagens recentemente desenvolvidas têm ampliado o potencial da microsimulação ao integrar técnicas de inteligência artificial e aprendizado por reforço, permitindo o refinamento das decisões individuais de condução, como mudanças de faixa, escolha de velocidade e aceitação de risco. Essas abordagens contribuem para maior capacidade preditiva dos modelos microscópicos, especialmente em contextos caracterizados por elevada variabilidade comportamental (ZHAO *et al.*, 2024; SONG *et al.*, 2025).

Entre os principais softwares de microsimulação utilizados na literatura e na prática profissional destacam-se o Vissim, o AIMSUN e o SUMO, que permitem a modelagem de redes viárias e a avaliação de cenários de tráfego (CUNTO e LOUREIRO, 2011). Esses sistemas são estruturados em três componentes centrais:

- Modelos de *car-following*: descrevem o comportamento longitudinal de veículos, simulando como cada condutor ajusta sua velocidade em função do veículo à frente
- Modelos de *lane-changing*: representam decisões de mudança de faixa, considerando critérios como segurança, vantagem de tempo e pressão lateral;
- Modelos de *gap-acceptance*: analisam a aceitação de brechas por condutores em cruzamentos e acessos a vias prioritárias.

A microssimulação tem aplicação em estudos operacionais e estratégicos, incluindo:

- Interseções semaforizadas: permite testar diferentes planos semafóricos e verificar seus efeitos na fluidez e no tempo médio de espera (PINHEIRO, 2018; ZHAO *et al.*, 2024; SONG *et al.*, 2025);
- Segurança viária: simula pontos de conflito e avalia o impacto de intervenções geométricas na redução de riscos (CUNTO e LOUREIRO, 2011);
- Planejamento do transporte público: analisa os efeitos de corredores exclusivos de ônibus sobre o tráfego geral (ARAÚJO e MELO, 2015);
- Avaliação ambiental: estima o impacto de estratégias operacionais nas emissões veiculares e no consumo energético (ZHAO *et al.*, 2024; SONG *et al.*, 2025).

A análise da mobilidade urbana em interseções semaforizadas demanda métodos capazes de representar adequadamente as interações dinâmicas entre veículos e a variabilidade estocástica inerente ao tráfego, aspectos que nem sempre são contemplados por abordagens analíticas tradicionais baseadas em valores médios. Nesse contexto, a microssimulação de tráfego tem se consolidado como uma alternativa robusta na engenharia de tráfego, ao permitir a representação detalhada do comportamento individual de veículos e pedestres e das interações entre eles (KHADHIR *et al.*, 2020).

A aplicação da microssimulação viária possibilita a avaliação comparativa de diferentes configurações semafóricas e seus efeitos sobre a operação do sistema. Ao contrário dos modelos macroscópicos, essa abordagem reproduz a trajetória e o comportamento de cada unidade veicular, permitindo identificar padrões de congestionamento, seus fatores determinantes e os pontos críticos da rede viária (IMTRAFF, 2007). Além disso, a simulação microscópica viabiliza o teste de estratégias de controle em ambiente virtual antes de sua implementação, incorporando incertezas associadas à chegada dos veículos e às decisões dos condutores.

A microssimulação de tráfego constitui uma abordagem robusta e versátil para a avaliação das condições operacionais de interseções urbanas, fornecendo subsídios técnicos consistentes para o desenvolvimento e a comparação de soluções de controle viário adaptadas às particularidades do tráfego urbano.

3.4 ESTUDOS ENVOLVENDO A MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A microsimulação de tráfego tem se consolidado como ferramenta que auxilia na avaliação de intervenções operacionais em redes urbanas. Sua aplicação permite testar diferentes cenários de controle viário, estimar indicadores de desempenho e antecipar os efeitos de modificações na geometria ou na sinalização sem a necessidade de implementação física.

Diversos estudos mostram o potencial da microsimulação para reproduzir condições reais de tráfego e apoiar a tomada de decisão. Nesse sentido, em Ruma, na Sérvia, Bogdanović *et al.* (2017) simularam os efeitos do fechamento de uma via central, avaliando alternativas de redistribuição viária. O modelo indicou aumento no atraso médio por veículo e no número de paradas, justificando ajustes no plano de circulação.

Zheng *et al.* (2021), ao aplicarem o método BOSSO em uma rede urbana composta por 15 interseções semaforizadas, observaram reduções significativas no atraso total e na ocorrência de conflitos, ao considerar simultaneamente objetivos de eficiência e segurança sob condições de incerteza. De forma semelhante, Khadhir *et al.* (2020) demonstraram que o algoritmo SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation), aplicado à otimização de uma interseção isolada, resultou em tempos semafóricos mais eficientes, com menor número de iterações e maior estabilidade dos resultados.

Em Volos, na Grécia, Karakikes *et al.*, (2020) calibraram um modelo com dados de GPS de táxis e rotas de entregas urbanas. A análise mostrou que o tráfego de carga reduzia a velocidade média e comprometia a fluidez, apontando a necessidade de restrições horárias para veículos pesados.

Em Islamabad, no Paquistão, Riaz *et al.* (2023) testaram intervenções geométricas em cruzamento com altos índices de congestionamento. Após ajustes simulados, houve redução de emissões veiculares de poluentes, aumento de velocidade média e melhoria do nível de serviço de “E” para “C”.

De forma complementar, Pacher (2024) utilizou o *software* Vissim para simular três cenários em corredores urbanos da cidade de Joinville (SC), constatando que a reorganização dos fluxos e a otimização dos tempos semafóricos possibilitaram reduzir as filas em mais de 90%, em alguns segmentos. Esse resultado reforça a eficácia da técnica na avaliação operacional de interseções sob diferentes configurações.

Baggio (2023) avaliou a influência de diferentes estratégias de controle semafórico em uma via arterial. O pesquisador constatou que o ajuste dos tempos de ciclo e a implementação de fases adicionais permitiram ganhos na redução de congestionamentos e atrasos, evidenciando a importância da calibração precisa dos parâmetros semafóricos.

Estudos comparativos entre ferramentas de simulação de tráfego também têm sido realizados. Galdino (2024) comparou os softwares Vissim e SUMO na modelagem de uma interseção urbana, verificando que o Vissim apresentou maior precisão na simulação das interações entre veículos, enquanto o SUMO se destacou pela menor exigência computacional e pela facilidade de integração com algoritmos de controle inteligente. A escolha do software, portanto, deve considerar o objetivo da análise, a escala do sistema e os recursos disponíveis.

Cunto e Loureiro (2011) aplicaram a microssimulação para prever riscos de sinistros em interseções urbanas. O modelo incorporou variáveis como tempo de reação e aceitação de brechas, permitindo identificar pontos críticos e propor intervenções mitigadoras.

No contexto de Polos Geradores de Viagens (PGVs), Fernandes e Beltrão (2018) aplicaram a microssimulação para analisar os impactos do fluxo viário no entorno do Instituto Federal de Goiás (IFG - Câmpus Goiânia), propondo ajustes na geometria e na sinalização para melhorar a acessibilidade e reduzir conflitos entre modais.

Zhao *et al.* (2024) aplicaram a microssimulação em cenários urbanos na China para avaliar impactos ambientais e operacionais de estratégias inteligentes de controle semafórico. A sincronização dinâmica dos tempos de verde, associada a algoritmos de otimização, reduziu atrasos e emissões veiculares.

Esses estudos demonstram que a microssimulação de tráfego auxilia no diagnóstico e na avaliação de intervenções viárias. Sua utilização neste trabalho visa comparar diferentes alternativa de controle de tráfego (semáforo fixo, semáforo inteligente ou ajustes na geometria e sinalização da rotatória), considerando métricas de desempenho, como tempo médio de espera, nível de serviço e emissões de poluentes.

3.5 SOFTWARES DE MICROSSIMULAÇÃO

No âmbito da Engenharia de Tráfego, os softwares de microssimulação constituem ferramentas computacionais voltadas à representação detalhada das interações

entre veículos, usuários e infraestrutura viária, possibilitando a análise do desempenho operacional de redes de transporte sob diferentes níveis de oferta e demanda. Diferentemente de abordagens agregadas, esses sistemas reproduzem o comportamento individual de veículos e pedestres, incorporando decisões de aceleração, frenagem, mudança de faixa, aceitação de brechas e resposta a dispositivos de controle, o que os torna especialmente adequados para a análise de interseções urbanas e ambientes viários complexos (SILVA, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

A aplicação de softwares de microsimulação abrange estudos de interseções semaforizadas e não semaforizadas, avaliação de projetos viários futuros sob diferentes cenários de demanda, análise de impactos de polos geradores de tráfego, planejamento e operação de corredores de transporte público (BRT), bem como a gestão do tráfego em situações temporárias, como eventos de grande porte ou alterações operacionais emergenciais (RAIA JUNIOR *et al.*, 2004; ANJOS, 2018; SONG *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a microsimulação permite testar virtualmente alternativas de intervenção antes de sua implementação física, reduzindo incertezas, riscos operacionais e custos associados a experimentações em campo. A Tabela 3 a seguir destaca os principais softwares de microsimulação e modelagem de tráfego e suas respectivas características.

Tabela 3 - Comparativo entre softwares de simulação e modelagem de tráfego

Software	Desenvolvido r e Origem	Objetivos e Aplicações	Linguagem e Base Matemática	Vantagens	Desvantagens
Vissim	PTV Group (Alemanha), a partir de 1992	Simulação microscópica de veículos e pedestres (Análise multimodal em ambientes urbanos, como interseções, rotatórias e corredores de BRT).	Programação orientada a objetos em C++ com motor gráfico OpenGL. Baseado no modelo de Wiedemann (1974) para seguimento de veículo e modelos estocásticos para mudanças de faixa.	Alta precisão comportamental; Integração com outros softwares; Módulos complementares (pedestres, emissões, transporte público).	Custo de licenciamento; Requer um certo nível conhecimento prévio de softwares de modelagem.
SUMO	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Alemanha), a partir de 2001	Software open- source para simulação microscópica e mesoscópica do tráfego urbano (Pesquisa de ITS, veículos autônomos e planejamento de transporte)	C++ e Python. Utiliza modelos como o Krauss e lógica de celulares para seguimento de veículo e decisões.	Software livre e de código aberto; Altamente flexível; Suporte a multimodalidade e integração com sensores.	Interface menos intuitiva (baseada em arquivos XML e linha de comando); Exige conhecimento em programação para funcionalidades avanzadas.
SYNCHRO / SimTraffic	Trafficware (EUA), anos 1990	Modelagem e otimização de interseções semaforizadas e	Modelos determinísticos e semi-estocásticos com algoritmos	Interface simples e intuitiva; Rápido para análises básicas de tráfego;	Simulação microscópica simplificada; Pouca

		coordenação de tempos. SimTraffic fornece a visualização microscópica.	baseados na fórmula de Webster para tempos de ciclo e atraso.	Relatórios automáticos e integração com HCS.	adaptabilidade para redes complexas ou multimodais; Limitado ao ambiente Windows e à lógica semafórica.
TransCAD / TransModeler	Caliper Corporation (EUA), anos 2000	TransCAD (Planejamento de transportes em nível macroscópico e mesoscópico) TransModeler oferece simulação microscópica.	C++ e GISDK. Utiliza modelos gravitacionais, alocação de viagens e, no módulo micro, algoritmos de Wiedemann.	Forte integração com SIG; Versátil para planejamento e análise de grandes áreas; Visualização 3D e animação de tráfego.	Licenciamento complexo e caro; Pouca documentação técnica aberta; Necessita treinamento técnico específico.
FRESIM / CORSIM	FHWA (EUA), décadas de 1970 e 1980	Utilizado para análise de corredores rodoviários e redes de interseções urbanas sinalizadas, com suporte a interações entre rampas, semáforos e rotatórias.	Fortran e C. Baseado em modelos de seguimento de veículo e regras de mudança de faixa.	Ampla validação em contextos norte-americanos; Adequado para avaliação de medidas de controle de tráfego.	Interface desatualizada e pouco intuitiva; Pouco flexível para redes complexas ou urbanas modernas.
KRONOS	Desenvolvido na Alemanha, 1989	Simulação microscópica de ambientes urbanos com elevado grau de incerteza, como redes congestionadas e comportamentos não-lineares.	C++. Utiliza lógica fuzzy e modelos probabilísticos para representar as decisões do condutor.	Realismo comportamental; Alta sensibilidade a variabilidades do sistema.	Complexidade técnica; Pouca disseminação global e suporte limitado.
Integration	<i>Queen's University</i> (Canadá), anos 1990	Software híbrido para estudos que envolvem o impacto ambiental do tráfego, análise de consumo energético e estratégias de sinalização adaptativa.	C++ e algoritmos numéricos para equações diferenciais, modelos de fluxo contínuo e <i>car-following</i> adaptativo.	Integração entre tráfego, emissões e energia; Elevada capacidade de simulação de redes grandes.	Complexidade computacional; Curva de aprendizagem acentuada.
PARAMICS	<i>University of Edinburgh</i> (Reino Unido), anos 1990	Simulação microscópica com ênfase em paralelização e redes de grande escala para estudos de corredores urbanos e redes metropolitana.	C++. Baseado em modelos de <i>car-following</i> , <i>gap-acceptance</i> e <i>lane-changing</i> com randomização estocástica.	Suporte a grandes redes com execução paralela; Interface gráfica amigável e possibilidade de customização por API.	Custo elevado; Suporte reduzido após descontinuidade pela Quadstone.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Entre as principais alternativas de intervenção avaliadas por meio desses softwares destacam-se a alteração de sentidos de circulação, a implantação ou reprogramação de sistemas semafóricos, a inserção de novas vias, os ajustes geométricos, a readequação da sinalização vertical e horizontal e a reorganização de travessias de pedestres. Em particular, a reprogramação semafórica constitui uma aplicação recorrente, sendo

utilizada para a definição de tempos de ciclo, divisões de verde e defasagens entre interseções, com o objetivo de maximizar a progressão veicular (“onda verde”) e reduzir atrasos e paradas sucessivas (NASCIMENTO & MIRANDA, 2022; FHWA, 2014).

A consolidação da microsimulação como ferramenta de análise está associada à evolução histórica dos modelos computacionais de tráfego. Os primeiros modelos, desenvolvidos entre as décadas de 1950 e 1970, apresentavam caráter determinístico e macroscópico, tratando o tráfego como um fluxo contínuo e desconsiderando o comportamento individual dos condutores (Campos Araújo, 2011). Um marco desse período foi o desenvolvimento do TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) pelo *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL), no Reino Unido, na década de 1960, voltado à otimização de tempos semafóricos com base em modelos agregados de fluxo (ROBERTSON, 1969).

Com o avanço da capacidade computacional e o amadurecimento das teorias comportamentais, surgiram os simuladores microscópicos, capazes de representar explicitamente as decisões individuais dos condutores. Exemplos iniciais incluem o FRESIM, desenvolvido pela *Federal Highway Administration* (FHWA), e sistemas baseados em lógica fuzzy, como o KRONOS, que buscavam aproximar a modelagem das decisões humanas no processo de condução (PAPPIS e MAMDANI, 1977). A partir da década de 1990, softwares comerciais com interfaces gráficas avançadas, bases de dados integradas e maior flexibilidade de modelagem passaram a dominar o campo, destacando-se ferramentas como Vissim, AIMSUN e SUMO.

O Vissim, em particular, tem sido utilizado em estudos acadêmicos e aplicações técnicas devido à sua capacidade de representar interações complexas em interseções, à flexibilidade na calibração de parâmetros comportamentais e à integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), linguagens de programação e algoritmos de inteligência artificial (BETHÔNICO, 2016; AQUINO, 2013; ZHAO *et al.*, 2024). De forma complementar, plataformas de código aberto, como o SUMO, vêm ganhando relevância por permitirem maior customização, integração com modelos avançados de controle adaptativo e menor custo de licenciamento, aspectos relevantes em estudos experimentais e acadêmicos (KHATTAK *et al.*, 2021; BAZA-SOLARES *et al.*, 2022).

A diversidade de softwares disponíveis reflete o grau de maturidade e consolidação da microsimulação como recurso analítico na Engenharia de Tráfego. No entanto, a escolha da ferramenta mais adequada deve considerar critérios como os objetivos do estudo, a escala da rede viária analisada, a disponibilidade e qualidade dos

dados, o nível de detalhamento requerido, a experiência do usuário na calibração do modelo e aspectos relacionados ao licenciamento e à interoperabilidade com outras plataformas (FHWA, 2014; XIN *et al.*, 2024).

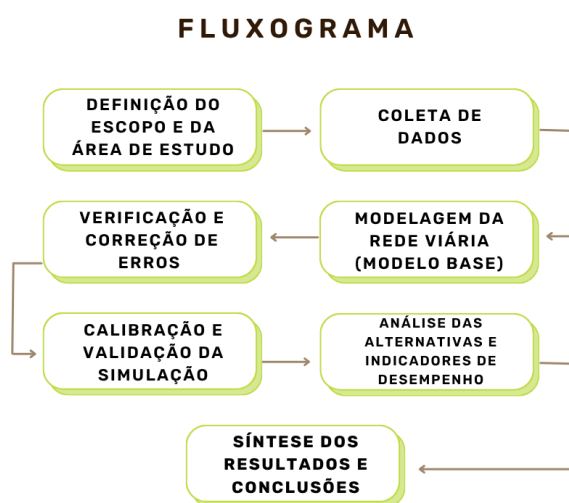
Dessa forma, a microssimulação, apoiada por softwares especializados, configura-se como uma abordagem robusta para a análise operacional e a comparação de alternativas de controle viário. No presente estudo, essa abordagem é adotada como base metodológica para a avaliação das estratégias propostas, conforme detalhado no capítulo seguinte, dedicado aos procedimentos metodológicos e à configuração do modelo de simulação.

4. MÉTODO

O método adotado neste estudo baseia-se em uma adaptação da abordagem sistematizada no *Traffic Analysis Toolbox - Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software* (FHWA, 2019), documento de referência utilizado em estudos de microsimulação de tráfego. A escolha dessa estrutura metodológica justifica-se por sua consistência técnica, aplicabilidade em contextos urbanos complexos e ampla aceitação na literatura científica e em práticas institucionais de planejamento e engenharia de tráfego.

A partir dessa abordagem, foram definidas sete etapas, organizadas de forma sequencial, conforme apresentado no fluxograma da Figura 12. Esse encadeamento metodológico permite assegurar coerência entre a definição do problema, a representação computacional do sistema viário, o ajuste do modelo às condições reais observadas e a análise comparativa dos cenários propostos.

Figura 12 - Fluxograma do Método



Fonte: Adaptado de FHWA (2019).

Conforme pode ser observado, as etapas contemplam: (i) a definição do escopo e da área de estudo; (ii) a coleta e a preparação dos dados de entrada; (iii) a modelagem computacional da rede viária (modelo base); (iv) a verificação lógica e a correção de inconsistências; (v) a calibração e a validação do modelo de simulação; (vi) a análise das alternativas de intervenção com base em indicadores de desempenho previamente definidos; e (vii) a síntese dos resultados e conclusões.

As sete etapas descritas no fluxograma foram definidas com base em diretrizes amplamente utilizadas em estudos de microssimulação de tráfego, em especial nas orientações da Federal Highway Administration (FHWA), que propõem um processo sequencial envolvendo escopo, coleta de dados, desenvolvimento do modelo-base, verificação, calibração/validação, aplicação de cenários e análise de resultados (WUNDERLICH *et al.*, 2019; FHWA, 2018).

A primeira etapa, de definição do escopo e da área de estudo, segue recomendações de que todo estudo de simulação comece pela delimitação do problema, dos objetivos e dos indicadores de desempenho a serem avaliados (DOWLING *et al.*, 2004; OLIVEIRA, 2011). Em seguida, a etapa de coleta de dados foi estruturada conforme procedimentos adotados em trabalhos nacionais que combinam contagens de volume, composição de frota e características geométricas para alimentar o modelo, como em Coelho (2017) e Pinto (2017).

A modelagem da rede viária e a construção do modelo-base acompanharam o padrão descrito em teses e TCCs que tratam de interseções urbanas e rotatórias, nos quais a rede é representada em detalhe e comparada com observações de campo (JACOBSEN, 2011; COSTA, 2024).

A etapa de análise das alternativas e verificação de desempenho foi inspirada em estudos que comparam cenários de controle (semáforo fixo, atuado, não semaforizado) a partir de medidas como atraso, filas e emissões (COELHO, 2017; ANTONIOU *et al.*, 2014). Já a calibração e validação da simulação seguiu o procedimento em múltiplos passos proposto pela FHWA e por Dowling *et al.* (2004), ajustando primeiro parâmetros de capacidade e depois parâmetros de comportamento até reproduzir volumes, atrasos e filas observados (FHWA, 2018; DOWLING *et al.*, 2004).

Por fim, a etapa de síntese dos resultados e conclusões refletiu a estrutura adotada em diversos trabalhos acadêmicos brasileiros de simulação microscópica, nos quais os indicadores consolidados de todos os cenários são comparados e discutidos de forma crítica à luz de limitações do modelo e de implicações para o planejamento viário (JACOBSEN, 2011; COELHO, 2017).

4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

As etapas que compõem o método de análise ilustrado na Figura 11 são descritas a seguir.

Etapa 1: Definição do Escopo e da Área de Estudo

A primeira etapa consiste na definição do escopo e da área de estudo, envolvendo a delimitação espacial e temporal da análise, bem como a explicitação dos objetivos a serem alcançados por meio da simulação de tráfego (FHWA, 2019; ZIEMSKA-OSUCH e OSUCH, 2022). Nessa fase, estabelece-se o recorte da rede viária a ser modelada, priorizando segmentos e interseções caracterizados por elevada criticidade operacional.

A seleção da área de estudo fundamenta-se em critérios técnicos, tais como a ocorrência de atrasos médios elevados, níveis de serviço classificados como “E” ou “F” segundo o *Highway Capacity Manual* (HCM, 2022), taxas de saturação superiores a 0,85 - valor amplamente adotado em diretrizes da FHWA e em manuais estaduais por indicar operação próxima à capacidade e maior instabilidade do fluxo -, bem como registros de conflitos, incidentes ou recorrência de congestionamentos (FHWA, 2016; TxDOT, 2020; NCDOT, 2024).

Além disso, define-se o horizonte temporal da análise, de modo a contemplar períodos representativos do comportamento crítico da demanda, como horários de pico, janelas temporais associadas a polos geradores de tráfego (PGVs) ou intervalos nos quais se observam variações significativas nos padrões de fluxo. Isso assegura que os cenários simulados reflitam condições operacionais relevantes e permitam comparações consistentes entre alternativas.

Ainda nessa etapa, realiza-se a escolha do software de microsimulação a ser utilizado, considerando critérios como a capacidade de representação do comportamento individual dos condutores, a modelagem detalhada de interseções, a integração com bases de dados geoespaciais, o suporte a algoritmos de otimização e controle semafórico, os requisitos computacionais e as condições de licenciamento (FHWA, 2019; ZHAO *et al.*, 2024). Quando viável, recomenda-se a priorização de plataformas de código aberto, como o *Simulation of Urban MObility* (SUMO), por favorecerem maior transparência metodológica, reprodutibilidade dos experimentos e possibilidade de auditoria e compartilhamento integral dos modelos por outros pesquisadores ou órgãos gestores (KHATTAK *et al.*, 2021).

Etapa 2: Coleta de Dados

A segunda etapa do método consiste na coleta, organização e tratamento dos dados de entrada necessários à construção e ao ajuste do modelo de microsimulação. Conforme

recomendado pelo FHWA, (2019) essa etapa envolve a obtenção de informações geométricas, operacionais, de demanda e de variáveis destinadas aos processos de calibração e validação do modelo, sendo fundamental para assegurar a representatividade e a confiabilidade dos resultados simulados.

Os dados coletados podem ser classificados em quatro grupos principais: dados geométricos, dados operacionais, dados de demanda e dados para calibração e validação, conforme adotado em estudos recentes de microssimulação urbana (IŠTOKA OTKOVIĆ *et al.*, 2023).

Os dados geométricos compreendem características físicas da infraestrutura viária, tais como o número e a largura das faixas de tráfego, comprimentos das aproximações, presença de ilhas canalizadoras, refúgios para pedestres e demais elementos geométricos relevantes. Essas informações podem ser obtidas por meio de levantamentos em campo, utilizando instrumentos como trena eletrônica e estação total, bem como a partir da consulta a projetos executivos, plantas cadastrais, ortofotos e bases geoespaciais, como imagens de satélite (Google Earth) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) disponibilizados por órgãos municipais ou plataformas de acesso público (FHWA, 2019).

As informações operacionais referem-se ao funcionamento do sistema viário e incluem planos semaforicos, tempos de ciclo, divisões de verde, defasagens entre estágios, localização e tipo de detectores, além da sinalização horizontal e vertical existente e de eventuais restrições de circulação. Esses dados podem ser obtidos junto aos órgãos gestores de trânsito, por meio de inspeções técnicas em campo com uso de cronômetros e registros em vídeo, ou ainda por extração direta de dados de controladores semaforicos e sistemas de monitoramento, quando disponíveis (WISDOT, 2019; FHWA, 2019).

Os dados de demanda correspondem às informações relacionadas aos volumes de tráfego e aos padrões de circulação, incluindo contagens volumétricas classificadas por tipo veicular, taxas de conversão, padrões de chegada e, quando disponíveis, matrizes origem-destino. A coleta desses dados pode ser realizada por meio de contagens manuais, gravações em vídeo com posterior processamento, sensores automáticos, como laços indutivos, câmeras e radares, ou sistemas de detecção integrados, conforme a disponibilidade tecnológica e o nível de detalhamento requerido (FHWA, 2019).

Para as etapas de calibração e validação são necessários dados observados de desempenho operacional, tais como tempos médios de viagem, atrasos, comprimentos de

fila, número de paradas e velocidades médias. Conforme destacado por Ištoka Otković *et al.* (2023), esses indicadores são particularmente adequados por serem mensuráveis em campo e sensíveis às variações nos parâmetros comportamentais dos modelos microscópicos. A coleta desses dados pode ser realizada por meio de registros em vídeo, rastreamento por GPS, sensores veiculares ou outras tecnologias de monitoramento, assegurando compatibilidade com os indicadores gerados pelo software de simulação.

Após a coleta, todo o conjunto de dados é submetido a um processo de verificação de consistência e tratamento, incluindo a identificação e remoção de valores atípicos, padronização de unidades e adequação dos formatos de entrada exigidos pelo software de microsimulação. Esse procedimento é essencial para reduzir vieses, evitar erros de modelagem e garantir que as etapas subsequentes de calibração e validação produzam resultados estatisticamente confiáveis (FHWA, 2019; IŠTOKA OTKOVIĆ *et al.*, 2023).

Etapa 3: Modelagem da Rede Viária (Modelo Base)

A terceira etapa do método consiste na construção do modelo base de microsimulação, a partir dos dados previamente coletados, verificados e tratados. Conforme FHWA (2019), essa fase tem por objetivo representar computacionalmente a rede viária selecionada de forma fiel às condições reais de operação, estabelecendo a base sobre a qual serão conduzidas as etapas subsequentes de verificação, calibração, validação e análise de cenários.

O processo inicia-se com a codificação da rede viária no software de microsimulação adotado, incorporando as características geométricas das vias, tais como número e largura das faixas, comprimentos das aproximações, limites de velocidade e elementos físicos relevantes. São também inseridas as informações relativas aos dispositivos de controle de tráfego existentes, incluindo o tipo e a localização de semáforos, a sinalização horizontal e vertical, bem como eventuais restrições de circulação, de modo a assegurar a correspondência entre o ambiente simulado e o sistema real (FHWA, 2019).

Nesta etapa procede-se ainda à configuração operacional dos dispositivos de controle, definindo-se no modelo os tempos e a sequência das fases semaforicas, as defasagens entre estágios, as prioridades de passagem, as regras de conversão e demais parâmetros observados em campo. Esses ajustes são fundamentais para reproduzir

adequadamente a lógica de funcionamento da interseção e o comportamento esperado dos usuários, conforme recomendado em manuais técnicos e diretrizes operacionais (WISDOT, 2019).

A modelagem do modelo base inclui também a definição dos parâmetros iniciais de simulação, tais como o horizonte temporal da análise, os períodos de aquecimento (*warm-up*), os intervalos de coleta de dados e os critérios de término da simulação. Adicionalmente, são estabelecidos os pontos de inserção e retirada dos veículos na rede, garantindo a correta representação dos fluxos de entrada e saída do sistema (FHWA, 2019).

O período de aquecimento em microsimulação serve para “limpar” os efeitos artificiais do início da simulação, quando a rede ainda está vazia e as filas e interações ainda não se estabilizaram. Durante esse intervalo, os veículos vão sendo inseridos até que o sistema atinja um regime representativo do pico analisado; por isso, os resultados gerados no aquecimento não são considerados nas estatísticas finais. A escolha desse tempo costuma levar em conta o tempo de viagem típico na rede e o tempo necessário para que as principais aproximações formem filas e padrões de operação semelhantes aos observados em campo (WISDOT, 2020).

Especificamente no PTV Vissim, o aquecimento é definido como um intervalo inicial em que a simulação roda normalmente, mas os dados não são gravados nos relatórios, sendo o usuário quem determina a sua duração em função da extensão da rede e da intensidade de tráfego (PTV GROUP, 2025). Na prática, é comum adotar valores da ordem de um a vários ciclos semafóricos para interseções isoladas, ou ainda de alguns minutos para redes maiores, ajustando por tentativa até que indicadores como fluxo, atraso e comprimento de filas se estabilizem antes do início do período efetivo de coleta (WISDOT, 2020).

Com isso, garante-se que as métricas calculadas (atraso médio, nível de serviço, emissões etc.) reflitam um estado quase estacionário do sistema, e não um “*ramp-up*” - período em que os veículos começam a entrar na rede até que se forme o padrão de fluxo e de filas típico do pico; enquanto isso acontece, os resultados ainda não representam bem a realidade, e por isso se usa o tempo de aquecimento para descartá-los - artificial de veículos sendo inseridos em uma rede inicialmente vazia.

A etapa conclui-se com a incorporação dos dados de demanda veicular ao modelo, podendo ser representados por volumes específicos por aproximação e movimento ou por matrizes origem-destino, conforme as capacidades do software utilizado e os objetivos da

análise. A escolha da forma de representação da demanda deve assegurar a reprodução consistente dos padrões de circulação observados em campo, especialmente em períodos críticos de operação (FHWA, 2019).

Ao final dessa etapa, obtém-se um modelo computacional inicial, denominado modelo base, que representa as condições reais de operação da rede viária estudada. Esse modelo constitui o ponto de partida para as etapas subsequentes de verificação lógica, calibração e validação, nas quais serão avaliadas e ajustadas as discrepâncias entre os resultados simulados e os dados observados em campo, de modo a garantir a confiabilidade das análises posteriores (FHWA, 2019).

Etapa 4: Verificação e correção de erros

Esta etapa corresponde à verificação lógica e operacional do modelo base, tendo como finalidade identificar e corrigir erros de codificação, inconsistências de dados ou representações inadequadas do sistema viário antes do início dos procedimentos de calibração e validação. Isso assegura que o modelo computacional esteja estruturalmente correto e coerente com as condições reais observadas em campo (FHWA, 2019).

Para tal, realiza-se uma revisão sistemática das informações inseridas no software de microsimulação, verificando-se a integridade e a consistência dos dados geométricos, operacionais e de demanda. Esse procedimento inclui a conferência das características físicas das vias, da configuração das faixas de tráfego, dos limites de velocidade, da lógica dos dispositivos de controle, das regras de conversão e da coerência entre os volumes inseridos e as observações empíricas coletadas em campo (WISDOT, 2019).

Na sequência, são conduzidas simulações exploratórias acompanhadas de inspeções visuais detalhadas das animações geradas pelo modelo. Essa análise qualitativa permite identificar comportamentos não condizentes com a realidade, tais como trajetórias incorretas de veículos, conflitos artificiais, formações de filas incompatíveis com a realidade observada, velocidades excessivas ou muito reduzidas, bloqueios indevidos de faixas e falhas na operação dos dispositivos de controle (FHWA, 2019).

Os erros e inconsistências identificados são então registrados, analisados e corrigidos, por meio do ajuste das entradas de dados, da revisão da geometria codificada ou da reconfiguração dos parâmetros operacionais do modelo. Esse processo pode ser realizado de forma iterativa, repetindo-se as simulações preliminares até que o

comportamento do sistema simulado apresente coerência lógica e operacional com o sistema real.

Essa etapa garante que o modelo base esteja livre de falhas estruturais, fornecendo uma representação consistente da rede viária antes do início das etapas de calibração e validação. Ao assegurar a qualidade técnica do modelo nesta fase, reduzem-se vieses e incertezas nos ajustes posteriores, aumentando a confiabilidade, a robustez e a precisão dos resultados obtidos nas análises subsequentes (FHWA, 2019; WISDOT, 2019).

Etapa 5: Calibração e validação da simulação

A quinta etapa do método corresponde aos procedimentos de calibração e validação do modelo de microssimulação, cujo objetivo é assegurar que o comportamento do sistema simulado represente adequadamente as condições reais de operação da rede viária. De acordo com o *Traffic Engineering, Operations and Safety Manual* (WISDOT, 2019), a calibração consiste no ajuste sistemático dos parâmetros de entrada do modelo - relacionados ao comportamento dos condutores, às características dos veículos e às condições da infraestrutura - a fim de reduzir as discrepâncias entre os resultados simulados e os dados observados em campo. A validação, por sua vez, consiste na verificação independente do desempenho do modelo calibrado, por meio da comparação entre indicadores simulados e dados reais não utilizados na etapa de ajuste, a fim de confirmar sua capacidade preditiva.

Esses dois processos apresentam caráter iterativo e complementar. Caso os critérios de aceitação não sejam atendidos durante a validação, o modelo deve ser novamente calibrado, com ajustes adicionais nos parâmetros relevantes, até que se obtenha um nível satisfatório de aderência entre os resultados simulados e observados (WISDOT, 2019).

O processo de calibração inicia-se com a identificação dos parâmetros mais sensíveis ao desempenho da rede, tais como tempos de reação dos condutores, distâncias de seguimento, taxas de aceleração e desaceleração, parâmetros de mudança de faixa e fatores associados ao grau de agressividade ou cautela dos usuários. Em seguida, são realizadas simulações sucessivas, com ajustes progressivos desses parâmetros, buscando minimizar as diferenças entre os valores simulados e aqueles obtidos em campo. Essa abordagem incremental permite compreender a influência individual de cada parâmetro sobre os indicadores de desempenho e evita ajustes excessivos ou inconsistentes.

A avaliação da aderência entre os resultados simulados e observados é realizada por meio de métricas estatísticas consagradas na literatura, conforme discutido no referencial teórico. A validação do modelo-base desenvolvido foi conduzida diretamente no software do PTV Vissim, priorizando análise visual de trajetórias e inspeção de resultados *multi-runs*. Optou-se por calibração iterativa integrada ao software, ajustando parâmetros comportamentais (brechas críticas, áreas de conflito, áreas de redução de velocidade), em detrimento de modelos estatísticos externos como GEH, que embora amplamente referenciados em literatura (HCM 2022; FHWA 2004), são mais adequados para validação de fluxo agregado em redes extensas.

Essa abordagem pragmática, recomendada por diretrizes da PTV Group e prática consolidada em teses nacionais (Lima, 2024; Costa, 2024), permitiu ajustes em tempo real com feedback visual imediato, alcançando aderência sem necessidade de exportação de dados para softwares estatísticos externos, otimizando o processo de calibração para o contexto específico da interseção estudada.

Como os modelos de microsimulação utilizam processos aleatórios que podem gerar pequenas variações entre diferentes execuções, recomenda-se o uso de sementes aleatórias fixas durante as simulações. Essa prática permite que os resultados obtidos sejam reproduzidos em execuções sucessivas do modelo, facilitando a comparação entre cenários e a avaliação dos efeitos dos ajustes realizados, conforme indicado por Bandi e George (2020).

A calibração consiste no ajuste dos parâmetros comportamentais do modelo (como distância de segurança, aceleração e desaceleração, áreas de conflito) utilizando dados de tráfego coletados em um período específico. Durante essa etapa, comparam-se os resultados simulados com os dados observados em campo, e os parâmetros são iterativamente modificados até que o modelo atinja indicadores de desempenho dentro de critérios pré-estabelecidos (GETTMAN *et al.*, 2007).

A validação, por sua vez, não consiste em novo ajuste de parâmetros, mas sim em verificação da capacidade preditiva do modelo. Nessa etapa, com o modelo calibrado o desempenho foi verificado frente a um conjunto independente de observações do mesmo dia de contagem, composto por outro intervalo de tempo (faixas horárias não utilizadas na calibração). Logo, calibração e validação diferenciam-se por: a primeira dedica-se ao ajuste dos parâmetros, enquanto a segunda verifica a capacidade do modelo em reproduzir condições não utilizadas no processo de ajuste.

Assim, embora os dados sejam provenientes do mesmo dia de medição essa separação preserva o papel científico de cada etapa e reduz o risco de incoerências do modelo às condições específicas da calibração. Os mesmos indicadores são utilizados, mas o objetivo é validar se o modelo mantém precisão preditiva quando exposto a cenários não utilizados durante a calibração.

Após a conclusão da calibração, procede-se à validação do modelo. Nessa etapa, são aplicados os mesmos indicadores e critérios de aceitação adotados na calibração, de modo a verificar se o modelo mantém desempenho satisfatório sob condições distintas. O atendimento a esses critérios indica que o modelo é capaz de reproduzir de forma confiável o comportamento operacional da rede viária analisada, estando apto para a avaliação de cenários e alternativas de controle propostas nas etapas subsequentes (WISDOT, 2019; HAFRAM *et al.*, 2023).

Etapa 6: Modelagem dos cenários

A sexta etapa do método consiste na modelagem dos cenários operacionais, utilizando o modelo de microsimulação previamente calibrado e validado. Nessa fase, são analisadas diferentes alternativas de controle de tráfego para o local em estudo, definidas de acordo com os objetivos da pesquisa e formuladas de modo a permitir a verificação das hipóteses de pesquisa.

Com o objetivo de garantir a comparabilidade entre os cenários, todas as simulações são executadas mantendo-se constantes as condições de demanda, os períodos de análise (horários de pico), os parâmetros comportamentais calibrados, a semente aleatória base e a configuração geral da rede viária. Dessa forma, eventuais diferenças nos resultados podem ser atribuídas exclusivamente às intervenções propostas, conforme recomendado pelas diretrizes metodológicas para estudos de microsimulação (FHWA, 2019).

Etapa 7: Avaliação dos Cenários e Síntese dos Resultados

Por fim, a etapa final do método consiste na consolidação, análise e interpretação dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas, culminando na formulação de conclusões fundamentadas nos indicadores de desempenho operacional e ambiental adotados. Nessa fase, os resultados associados a cada cenário são organizados e

comparados de maneira estruturada, possibilitando a identificação de padrões de comportamento do tráfego, restrições operacionais recorrentes e os efeitos decorrentes das alternativas de controle avaliadas.

A avaliação do desempenho operacional geral dos cenários foi realizada a partir de indicadores como:

- o tempo médio de atraso por veículo (s/veículo), diretamente associado à eficiência operacional e à percepção de qualidade do tráfego;
- a velocidade média de operação (km/h), indicativa da fluidez do sistema;
- a extensão média das filas (m), relacionada à ocupação do espaço viário e ao risco de bloqueios; e
- o Nível de Serviço (NS), classificado conforme os critérios do HCM para interseções semaforizadas, permitindo a síntese do desempenho operacional em classes padronizadas (Wang e Xu, 2018; Hafram *et al.*, 2023; HCM, 2022).

De forma complementar, são avaliados indicadores ambientais, estimados a partir dos módulos de emissões disponíveis nos softwares de microsimulação utilizados. As estimativas baseiam-se em metodologias consolidadas de fatores de emissão, como o *Handbook Emission Factors for Road Transport* (HBEFA), permitindo quantificar os impactos ambientais associados a cada alternativa operacional.

A combinação de indicadores operacionais e ambientais possibilita uma análise integrada dos efeitos das intervenções propostas, atendendo ao objetivo geral do estudo de identificar a alternativa mais eficiente sob a ótica da mobilidade e do meio ambiente. Os resultados são organizados em tabelas e gráficos comparativos, considerando a situação atual como linha de base, e analisados com o suporte de intervalos de confiança e testes de significância estatística, de modo a verificar se as diferenças observadas entre os cenários são estatisticamente relevantes.

Essa abordagem metodológica permite testar as hipóteses formuladas, verificando se a substituição da rotatória por sistemas semafóricos - de tempo fixo ou inteligente - ou a adequação geométrica e de sinalização da rotatória existente resulta em reduções significativas no tempo médio de espera, melhorias no nível de serviço e diminuição das emissões veiculares durante os períodos de pico. Os resultados obtidos nesta etapa subsidiam a identificação da alternativa de melhor desempenho e fundamentam as recomendações técnicas apresentadas na etapa final do método.

A interpretação dos resultados é conduzida considerando os objetivos e as hipóteses de pesquisa previamente estabelecidos, verificando-se, para cada cenário simulado, a ocorrência de variações no tempo médio de atraso, no nível de serviço, na extensão das filas e nos indicadores ambientais, em relação à situação de referência. A análise contempla tanto as variações absolutas quanto relativas dos indicadores, bem como a coerência técnica dos resultados e sua relevância para o contexto operacional da interseção estudada.

Os resultados obtidos permitem a avaliação comparativa do desempenho das alternativas propostas, evidenciando os ganhos operacionais e os impactos ambientais associados a cada intervenção. A partir dessa análise integrada, torna-se possível identificar a alternativa que apresenta o melhor desempenho global, considerando simultaneamente os critérios de fluidez do tráfego, eficiência operacional e redução de emissões veiculares.

As conclusões obtidas servem de subsídio para a elaboração de recomendações técnicas aplicáveis ao contexto real da interseção analisada.

Adicionalmente, são explicitadas as limitações inerentes ao processo de modelagem e simulação, incluindo simplificações adotadas, restrições relacionadas à disponibilidade e qualidade dos dados e incertezas associadas aos parâmetros comportamentais. Essas considerações fundamentam a proposição de diretrizes para estudos futuros, indicando possibilidades de aprimoramento metodológico, ampliação do escopo de análise e incorporação de novos indicadores ou cenários.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a aplicação prática do método de análise desenvolvido no capítulo anterior, por meio de um estudo de caso em uma interseção urbana com reconhecida criticidade operacional. A abordagem metodológica baseada em microsimulação de tráfego é empregada para avaliar o desempenho da interseção sob diferentes alternativas de controle viário, possibilitando a comparação sistemática de seus efeitos sobre a eficiência operacional e os impactos ambientais associados.

O estudo foi realizado na interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, localizada no município de Goiânia, estado de Goiás, cuja configuração atual apresenta recorrentes problemas de fluidez nos períodos de pico, formação de filas extensas e potenciais conflitos veiculares, conforme mostra a Figura 13. Tais características tornam a interseção representativa de situações urbanas que demandam avaliação técnica aprofundada e justificam sua seleção para a aplicação do método proposto.

Figura 13: Interseção em estudo no período de contagem volumétrica



Fonte: Autores.

O objetivo deste capítulo é avaliar o desempenho operacional da interseção por meio de microsimulação, comparando a situação existente com cenários alternativos de controle e intervenção. A utilização da microsimulação justifica-se pela sua capacidade de representar, de forma detalhada, as interações entre veículos, pedestres e elementos de controle, bem como os efeitos de modificações geométricas e operacionais, aspectos que não são plenamente capturados por métodos analíticos tradicionais. Conforme destacado

por Barceló (2010), modelos microscópicos são particularmente adequados para a análise de interseções urbanas, por reproduzirem o comportamento individual dos condutores e suas implicações sobre o desempenho global do sistema viário.

A aplicação do método contempla inicialmente a modelagem da situação existente, considerada como cenário base, seguida da simulação de alternativas de intervenção definidas de acordo com os objetivos da pesquisa. Foram analisados quatro cenários distintos:

- Cenário 1 - Situação atual, correspondente à configuração existente da rotatória;
- Cenário 2 - Implantação de semáforo de tempo fixo, com substituição da rotatória por um cruzamento semaforizado com tempos constantes; e
- Cenário 3 - Implantação de semáforo inteligente, baseado em controle semafórico adaptativo com tempos de ciclo ajustados em função da demanda.

Os cenários são avaliados a partir de indicadores operacionais e ambientais previamente definidos, permitindo identificar a alternativa que apresenta melhor desempenho no contexto da mobilidade urbana e da mitigação dos impactos ambientais. A seguir, é apresentada a caracterização da área de estudo, detalhando os aspectos geométricos, funcionais e operacionais da interseção, que fundamentam a construção do modelo de microsimulação e a análise comparativa dos cenários propostos.

5.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, localizada no município de Goiânia, estado de Goiás, em uma região urbana caracterizada por elevada intensidade de tráfego e função estratégica na articulação do sistema viário local, conforme mostra a Figura 14. A interseção apresenta relevância na conexão entre bairros predominantemente residenciais e áreas de uso misto, com presença expressiva de atividades comerciais, serviços e acessos locais, o que resulta em padrões de circulação heterogêneos ao longo do dia.

Figura 14: Interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana



Fonte: Google Earth (2025).

A Avenida Transbrasiliana apresenta classificação funcional de via arterial, dispondo de duas faixas de tráfego por sentido e velocidade regulamentada de 50 km/h, sendo responsável pelo escoamento de volumes elevados e pela conexão entre diferentes setores da cidade. A Avenida Feira de Santana, por sua vez, caracteriza-se como via coletora, com menor capacidade e velocidade regulamentada de aproximadamente 50 km/h, exercendo a função de distribuição do tráfego local e de acesso às áreas adjacentes.

O cenário atual da interseção corresponde a uma rotatória sem controle semafórico, cuja configuração geométrica e operacional tem se mostrado limitada frente às condições de demanda observadas. Durante os períodos de maior volume veicular, são observadas formações de filas e congestionamento (que consequentemente impactam os tempos de espera) sobretudo nos movimentos de entrada e saída da rotatória, com maior criticidade nas manobras de conversão à esquerda e nos acessos com desequilíbrio direcional de fluxos. Essas condições indicam operação próxima à saturação e potencial aumento do risco de conflitos veiculares.

A seleção da área de estudo fundamentou-se em critérios que caracterizam operação crítica, conforme evidenciado durante visitas *in loco* e a realização das contagens volumétricas. Adicionalmente, as inspeções de campo identificaram conflitos frequentes (veículos buscando brechas na rotatória, manobras arriscadas de entrada, formação de filas para vias adjacentes), além de registros locais de incidentes menores (colisões traseiras, quase colisões) e congestionamentos recorrentes, caracterizando a interseção como operação instável e justificando plenamente sua escolha para análise e propostas de intervenção.

Para fins de modelagem, a área de estudo compreende a rotatória existente e os trechos de aproximação das vias adjacentes, abrangendo aproximadamente uma quadra, de modo a capturar adequadamente os processos de formação e dissipação de filas. Essa delimitação espacial segue as recomendações da FHWA (2019) para estudos de microssimulação em interseções urbanas.

A análise concentra-se nos períodos de pico de demanda, definidos a partir das observações de campo, nos quais se destacaram as condições operacionais mais críticas da interseção. Esses períodos são adotados como referência para a simulação dos cenários e para a comparação dos indicadores de desempenho, sendo eles: 08:00 – 09:00 (pico da manhã), 12:00 – 13:00 (pico da tarde) e 18:00 – 19:00 (pico da noite).

A caracterização geométrica e funcional da interseção foi realizada por meio de levantamentos *in loco*, registros em vídeo e análise de imagens de satélite, permitindo a identificação precisa das condições físicas e operacionais do local. O procedimento adotado seguiu as diretrizes estabelecidas no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2022) e no Highway Capacity Manual (HCM, 2022), assegurando consistência normativa e compatibilidade com os critérios utilizados na avaliação de desempenho.

A Figura 15 apresenta a caracterização geométrica da interseção em estudo, evidenciando os principais elementos físicos que compõem a configuração viária, tais como o número e a largura das faixas de tráfego e canteiros centrais.

Figura 15: Croqui Avenida Transbrasiliana X Avenida Feira de Santana



5.3 ESCOLHA DO SOFTWARE DE MICROSSIMULAÇÃO

O PTV Vissim foi selecionado como ferramenta de microsimulação para o desenvolvimento deste estudo de caso em razão de sua ampla utilização na área de Engenharia de Transportes e de sua recorrente aplicação tanto em pesquisas acadêmicas quanto em estudos técnicos e profissionais. Trata-se de um dos simuladores microscópicos mais utilizados internacionalmente, reconhecido por sua capacidade de representar, com elevado nível de detalhamento, as interações entre veículos, pedestres e transporte público em ambientes urbanos complexos.

A escolha do Vissim justifica-se pela sua flexibilidade na modelagem de diferentes estratégias de controle de tráfego, incluindo sistemas semafóricos de tempo fixo, coordenados, atuados e adaptativos, bem como pela possibilidade de representar intervenções geométricas e operacionais com precisão. Essas características tornam este software adequado à análise da interseção em estudo, na qual se pretende comparar cenários com rotatória, controle semafórico convencional e controle semafórico inteligente, conforme os objetivos da pesquisa.

O Vissim foi desenvolvido na Alemanha, na década de 1990, pelo Instituto de Pesquisas em Transportes da Universidade de Karlsruhe, tendo sido posteriormente

incorporado ao portfólio da PTV Group, empresa internacional especializada em soluções de mobilidade e logística. Desde então, o software passou por sucessivas atualizações, incorporando avanços nos modelos de comportamento de condutores, na integração com sistemas de informação geográfica (GIS), na simulação de transporte público e no módulo VISWALK, destinado à representação do movimento de pedestres em ambientes urbanos.

Segundo documentação técnica e aplicações relatadas pela própria PTV, o Vissim consolidou-se como referência em análises de desempenho viário, sendo amplamente utilizado por agências de transporte, como a *Federal Highway Administration* (FHWA), e em numerosos estudos acadêmicos envolvendo interseções urbanas, corredores viários, rotatórias, sistemas BRT e contextos multimodais (FHWA, 2013). Hossain (2020) mostra que os resultados obtidos por meio do Vissim apresentam elevada aderência às condições reais de operação, permitindo análises comparativas consistentes entre alternativas de controle semafórico, alterações geométricas e estratégias operacionais em cenários urbanos congestionados.

O software permite a extração e a avaliação de indicadores operacionais compatíveis com os conceitos estabelecidos pelo *Highway Capacity Manual* (HCM), tais como atraso médio por veículo, tempo de viagem, número de paradas, comprimento de filas e taxa de saturação. Esses indicadores são derivados da modelagem microscópica das interações veículo-veículo e veículo-pedestre, fundamentadas no modelo de comportamento de Wiedemann, amplamente validado na literatura para a representação do seguimento veicular e das decisões de condução em ambientes urbanos.

A partir desses resultados, torna-se possível classificar o desempenho operacional da interseção sob diferentes cenários de controle, incluindo variações nos tempos semafóricos, modificações geométricas ou a introdução de faixas exclusivas. Estudos como o de Rahman *et al.* (2018) demonstram que os indicadores gerados pelo Vissim são adequados para avaliar, com elevado grau de precisão, os impactos de intervenções urbanas, como priorização do transporte público, melhorias para pedestres e otimização semafórica.

Além da análise operacional, o Vissim também se destaca pela sua aplicação em avaliações ambientais. A partir dos perfis individuais de velocidade, aceleração e desaceleração gerados pela microsimulação, é possível integrar os resultados a modelos externos de emissões, como MOVES, COPERT, ou a extensões específicas, como o EnViVer e o Vissim Environment Module. Conforme proposto por Boriboonsomsin e Barth (2009), essa abordagem permite estimar emissões de poluentes atmosféricos, como

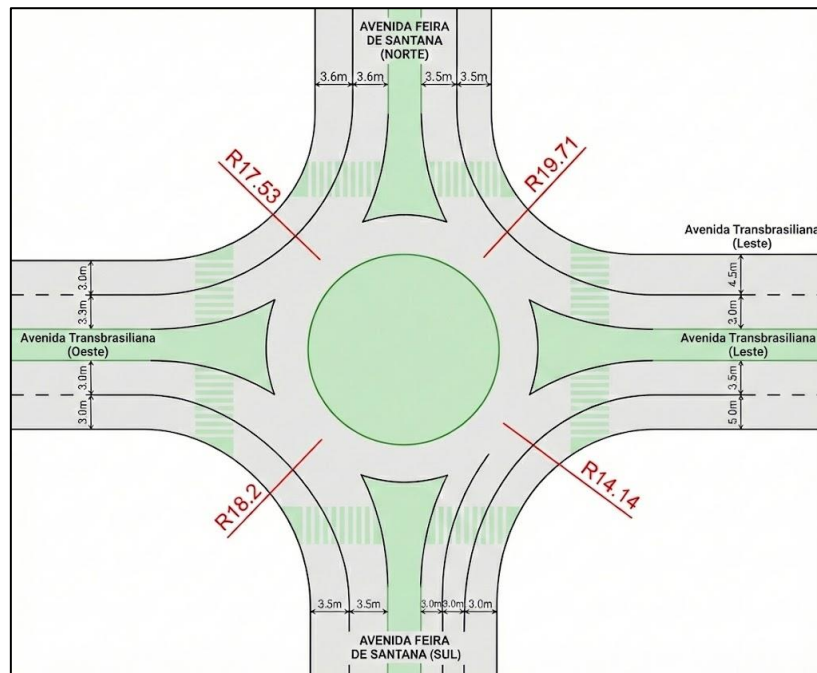
CO₂, NO_x e material particulado, associadas a diferentes estratégias de controle de tráfego.

Estudos aplicados, como o de Ahn *et al.* (2013), demonstram que intervenções voltadas à redução de paradas, à suavização do fluxo e à otimização dos tempos semafóricos podem resultar em reduções significativas no consumo de combustível e nas emissões veiculares. Esses resultados reforçam a adequação do Vissim não apenas como ferramenta de avaliação operacional, mas também como instrumento relevante para análises integradas de mobilidade urbana e sustentabilidade ambiental, em consonância com os objetivos estabelecidos nesta pesquisa.

5.4 COLETA DE DADOS

Os dados de tráfego e demanda foram coletados em campo, no dia 14 de outubro de 2025 (terça-feira) por meio de contagem volumétrica classificada, contemplando três janelas temporais distintas: 07h00-09h00, 11h00-14h00 e 17h00-19h00. Esses intervalos foram selecionados por representarem, respectivamente, os períodos de pico da manhã, do meio do dia e da noite, permitindo a caracterização dos diferentes padrões de demanda e de operação da interseção ao longo do dia. Já os dados geométricos foram levantados com auxílio do Google Earth, conforme croqui apresentado na Figura 16. Os dados operacionais (Veículos/hora, Saturação e Fator Hora Pico) foram obtidos a partir dos resultados da contagem com auxílio do Excel. Por fim, os dados de calibração foram determinados a partir de métricas como velocidade diretamente no software Vissim.

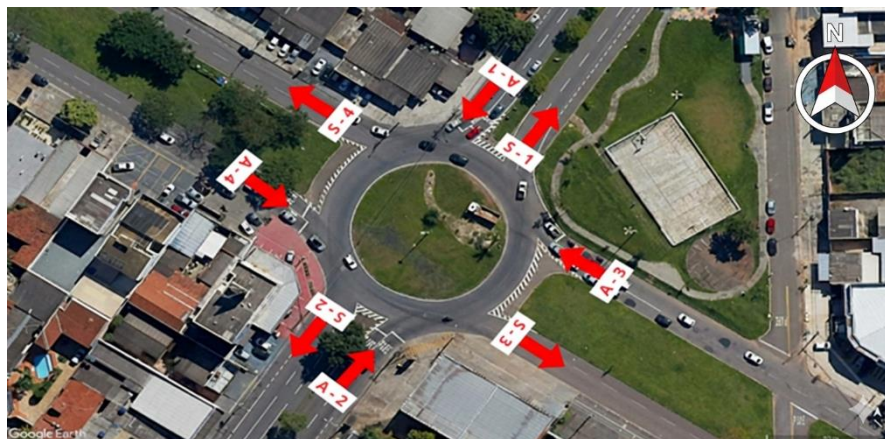
Figura 16: Croqui dos dados geométricos da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos Autores.

As contagens volumétricas foram realizadas por meio de gravações em vídeo, metodologia que possibilita a obtenção detalhada dos fluxos veiculares por movimento, incluindo entradas, saídas e conversões. Para esse fim, foram posicionadas duas câmeras em pontos estratégicos do cruzamento, sendo uma direcionada à rotatória e outra voltada para a Rua T-15, de modo a garantir cobertura adequada de todas as aproximações e movimentos relevantes. A Figura 17 apresenta a identificação dos sentidos (S) e aproximações (A) considerados na contagem volumétrica.

Figura 17: Movimentos estudados na contagem volumétrica



As nomenclaturas “A” fazem referência a Aproximações, vias de onde o volume de tráfego tem origem, e “S” para Sentido fazendo referência ao destino desses volumes de tráfego (*Vehicle Inputs*). Sendo esses movimentos as seguintes vias:

- A1: Avenida Feira de Santana – sentido Norte-Sul
- A2: Avenida Feira de Santana – sentido Sul-Norte
- A3: Avenida Transbásiliana – sentido Leste-Oeste
- A4: Avenida Transbásiliana – sentido Oeste-Leste
- S1: Avenida Feira de Santana
- S2: Avenida Feira de Santana
- S3: Avenida Transbásiliana
- S4: Avenida Transbásiliana

Os dados coletados foram tabulados e organizados em planilhas estruturadas, permitindo quantificar fluxos, demanda acumulada, porcentagem por tipo de veículo (automóvel, moto, ônibus ou caminhão), analisar direções de movimento e relações entre volumes de entrada e saída da interseção. Esse tratamento permite a criação das rotas no Vissim e a definição dos pesos de distribuição do tráfego.

O resultado da demanda observada através da contagem volumétrica de veículos se encontra na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Demanda Acumulada

DEMANDA ACUMULADA TOTAL									Total Acumulado
Período de Pesquisa	A1	S1	A2	S2	A3	S3	A4	S4	
07:00 - 08:00	1265	1308	1728	1061	435	681	992	1506	8976
08:00 - 09:00	1374	1249	1731	1091	429	610	1134	1670	9288
11:00 - 12:00	1774	1041	1224	791	943	549	1103	1654	9079
12:00 - 13:00	1799	1225	1487	808	993	589	1210	1906	10017
13:00 - 14:00	1436	1428	1597	703	811	635	1063	1299	8972
17:00 - 18:00	1923	987	1316	1442	1158	877	1231	1775	10709
18:00 - 19:00	1819	968	1572	1526	1069	768	1282	1771	10775
TOTAL	11390	8208	10655	7422	5839	4709	8014	11581	67818

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A distribuição percentual de veículos por tipo (carro, moto, ônibus e caminhão), em cada aproximação, foi determinada a partir dos resultados da contagem volumétrica classificada. Os valores obtidos para os diversos períodos analisados estão consolidados na Tabela 5.

Tabela 5: Percentual de veículos por aproximação

DEMANDA POR TIPO DE VEÍCULO (%)																
Período	A1				A2				A3				A4			
	Car-ros	Mo-tos	Ôni-bus	Caminhão	Car-ros	Mo-tos	Ôni-bus	Caminhão	Car-ros	Mo-tos	Ôni-bus	Caminhão	Car-ros	Mo-tos	Ôni-bus	Caminhão
07:00 - 08:00	89,2	25,3	0,6	0,8	75,5	63,4	1,3	0,8	37,7	75,8	1,1	7,1	85,2	34,4	0,7	1,2
08:00 - 09:00	85,7	30,0	1,1	1,4	81,4	39,9	1,2	1,8	45,7	56,2	0,9	7,5	82,5	33,2	1,0	2,6
11:00 - 12:00	81,6	38,9	0,5	2,4	83,8	33,9	0,8	1,9	144,1	22,9	0,2	4,1	81,7	29,6	0,6	3,8
12:00 - 13:00	86,2	34,7	0,3	0,9	87,6	26,6	0,6	1,3	151,2	19,1	0,2	1,8	84,7	29,6	0,6	2,3
13:00 - 14:00	84,1	35,9	0,2	1,9	88,3	25,4	0,4	1,3	108,3	23,7	0,2	3,6	84,3	26,6	0,5	3,1
17:00 - 18:00	76,1	62,8	0,8	0,9	88,5	28,5	0,7	0,5	116,7	25,7	0,3	1,3	81,2	43,7	0,6	1,8
18:00 - 19:00	76,2	67,0	0,8	0,3	86,3	34,2	1,1	0,4	125,7	25,4	0,3	0,5	81,3	50,9	0,9	0,3

Fonte: Elaborado pelos Autores.

5.5 MODELAGEM DA REDE VIÁRIA (MODELO BASE)

A modelagem da rede viária corresponde à etapa de construção do modelo base de microssimulação, cujo objetivo é representar, com fidelidade, as condições reais de operação da interseção em estudo antes da aplicação das alternativas de intervenção. Esse modelo constitui a referência para as etapas subsequentes de verificação, calibração, validação e análise comparativa dos cenários simulados.

A modelagem da rede foi realizada no software PTV Vissim, a partir dos dados geométricos, operacionais e de demanda coletados em campo. Foram inseridos no modelo os elementos físicos da interseção, incluindo o traçado das vias, o número e a largura das faixas de tráfego, os comprimentos das aproximações, as ilhas canalizadoras e as áreas destinadas à circulação e à travessia de pedestres, conforme levantamentos in loco e análise de imagens de satélite.

A modelagem adotou uma estrutura simplificada de classes veiculares, adequada ao objetivo principal de comparar alternativas de controle da interseção. Em vez de representar separadamente ônibus, caminhões, automóveis e motocicletas, optou-se por trabalhar com duas categorias de demanda: veículos leves e veículos pesados. Os volumes de ônibus observados em campo não foram inseridos como uma classe específica de transporte coletivo, mas convertidos em veículos equivalentes e somados ao fluxo de caminhões. As motocicletas, por sua vez, foram agregadas à classe de automóveis leves. Os fatores de equivalência adotados para ônibus e motos foram, respectivamente, 1,5 e 0,33 (HCM, 2022).

Essa decisão procura preservar o efeito geral da composição do tráfego sobre a capacidade da interseção, reduzindo ao mesmo tempo a complexidade do modelo e o número de parâmetros a calibrar, o que é recomendado em aplicações de microssimulação com foco na operação geral da interseção, e não na avaliação detalhada do serviço de transporte coletivo (BARCELÓ, 2010; TRB, 2022).

A agregação de ônibus e caminhões em uma única classe de veículos pesados foi fundamentada no conceito de equivalência veicular, amplamente utilizado em manuais de capacidade e em estudos de engenharia de tráfego. O *Highway Capacity Manual* propõe fatores de equivalência específicos para caminhões e ônibus, permitindo que seus efeitos sobre o fluxo sejam representados por meio de um fator multiplicador aplicado ao volume observado, em vez da modelagem individual de cada tipo (TRB, 2010; TRB,

2022). De forma semelhante, manuais nacionais, como o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT, ressaltam que a influência dos veículos de maiores dimensões sobre a capacidade pode ser tratada pela conversão da demanda observada em unidades de carro de passeio, por meio de fatores de equivalência calibrados para cada categoria veicular (DNIT, 2006; FERRAZ e TORRES, 2004). Em trabalhos aplicados brasileiros, é comum o uso de tabelas de equivalência baseadas no HCM, em que ônibus e caminhões recebem fatores superiores a 1,00, representando seu maior consumo de capacidade em relação a automóveis (HCM, 2000 *apud* SILVA, 2011).

No contexto específico desta pesquisa, como nem a geometria da interseção nem os cenários simulados incluem faixas exclusivas, ou estratégias de prioridade semafórica para o transporte coletivo, a representação explícita de linhas de ônibus, pontos de parada e tempos de embarque/desembarque teria impacto limitado nos indicadores de desempenho analisados - atraso médio, nível de serviço, extensão de filas e emissões (BARCELÓ, 2010). A modelagem detalhada de ônibus em microsimulação é essencial quando o objetivo é estudar estratégias de controle do transporte coletivo (prioridade em semáforos, desenho de paradas, integração com passageiros), mas pode ser tratada de forma agregada quando o enfoque recai sobre o desempenho geral da interseção para o tráfego misto (CIPRIANI *et al*, 2010; TRB, 2022).

A decisão de agrupar motocicletas à classe de veículos leves também encontra suporte em estudos sobre capacidade de interseções, pesquisas nacionais indicam que as motocicletas podem ser representadas por fatores de equivalência inferiores à uma unidade, refletindo seu menor espaço ocupado e maior capacidade de escoar em condições de tráfego misto (TORQUATO, 2020). Em Fortaleza, por exemplo, foi estimado fator de equivalência em torno de 0,21 carro de passeio por motocicleta em situações específicas de posicionamento na fila (TORQUATO, 2020), o que reforça que, para proporções moderadas de motos e em análises cujo foco principal é a comparação relativa entre cenários de controle, a agregação dessas ao fluxo de automóveis tende refletir em diferenças mínimas nos resultados dos indicadores globais de desempenho. Além disso, a própria teoria de fluxo recomenda que a composição veicular pode ser tratada por meio de demanda equivalente quando o objetivo é avaliar capacidade e atraso médios, e não o comportamento individual de cada tipo de veículo (FERRAZ & TORRES, 2004; VASCONCELLOS, 2000).

Dessa forma, a simplificação adotada é coerente com a literatura técnica e com os manuais de capacidade, além de alinhada ao objetivo desta pesquisa, que é comparar alternativas de controle de tráfego na interseção estudada com base em indicadores médios de desempenho operacional e ambiental, e não modelar em detalhe a operação do transporte público coletivo.

A Figura 19 apresenta a rede viária modelada no software Vissim, evidenciando a representação geométrica da interseção no modelo base.

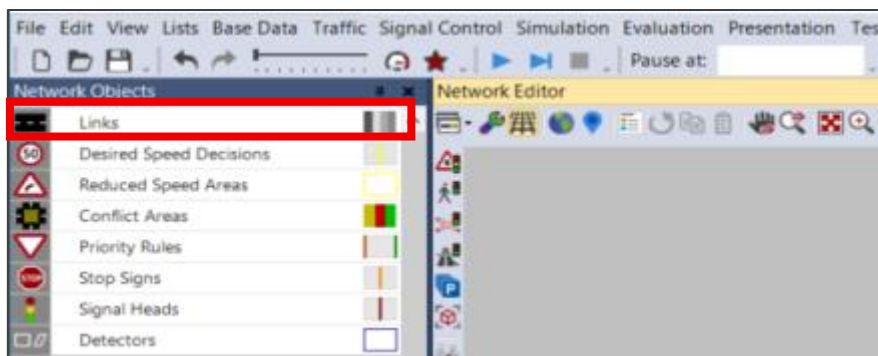
Figura 18: Rede viária da interseção modelada no PTV Vissim (modelo base)



Fonte: Vissim (Versão 2026)

A construção do modelo no Vissim iniciou-se no *Network Editor* (Figura 19) com a geração dos *links* de aproximação às vias adjacentes à rotatória. Utilizou-se a ferramenta *Link* para delinear os segmentos viários, especificando-se o número de faixas (*Number of lanes*), largura média por faixa (3,5 m), tipo de pavimento (*Link type*) e o nome do ramo criado. Os *connectors*, são links de conexão entre dois *links* e foram subsequentemente criados para estabelecer a conectividade entre os finais dos *links* de aproximação e o anel central da rotatória, assegurando continuidade geométrica dos fluxos veiculares.

Figura 19: Configuração inicial de links e conectores de aproximação



Fonte: Vissim (Versão 2026).

O anel central da rotatória foi criado mediante o comando *Add circular link* (Figura 20), definindo-se raio interno (12 m), raio externo (18 m) o número de faixas no anel (duas pistas) e o comprimento das mesmas (3,5 metros). Configurou-se a rotatória estabelecendo regras de prioridade (*Priority Rules*) com precedência ao fluxo giratório (*Give way rule*). As seções transversais do anel foram ajustadas para refletir a geometria real levantada em campo e as regras do CTB.

Figura 20: Interface do comando *Add circular link*.



Fonte: Youtube (2022).

Nas aproximações e no anel rotatório, procedeu-se à divisão das faixas em *Lane/Connector Sections* distintas por meio da função *Edit lane/connector sections* (Figura 21). Cada seção recebeu parâmetros específicos de comportamento de direção (*Driving behavior*), com restrições à mudança de faixa (*Lane change restrictions*) aplicadas nas zonas de convergência. No anel, permitiu-se mudança de faixa livre entre pistas internas e externas, reproduzindo o comportamento operacional em rotatórias.

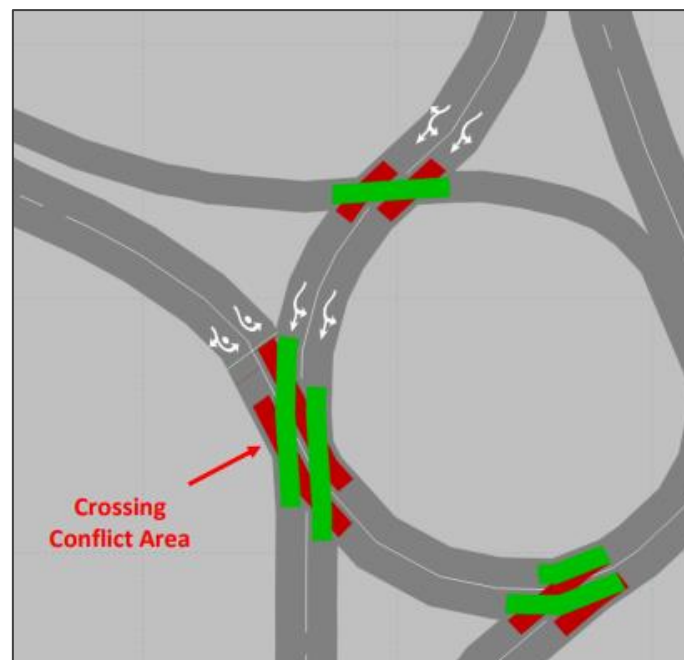
Figura 21: Interface de edição de links

Number	Index	Width	LinkBehav...	BlockedVe...	DisplayType	MarkingTy...	NoLnChLA...	NoLnChR...	NoLnChLV...	NoLnChRV...
1	1	3.00				1: Dashed...				
2	2	3.00				1: Dashed...				
3	3	3.00				1: Dashed...				
4	4	3.00				1: Dashed...				

Fonte: Vissim (2026).

As interações veiculares foram representadas por meio de *Conflict Areas* (Figura 22). Identificaram-se três categorias principais: áreas de fusão nas entradas, áreas de entrelaçamento no anel e áreas de cadência nas saídas. Cada de conflito recebeu fatores de prioridade relativa (*Relative priority factor*) e parâmetros de aceitação de folgas (Gap acceptance parameters), calibrados conforme comportamento real dos condutores.

Figura 22: Polígonos de Conflict Areas e hierarquia de precedência estabelecida

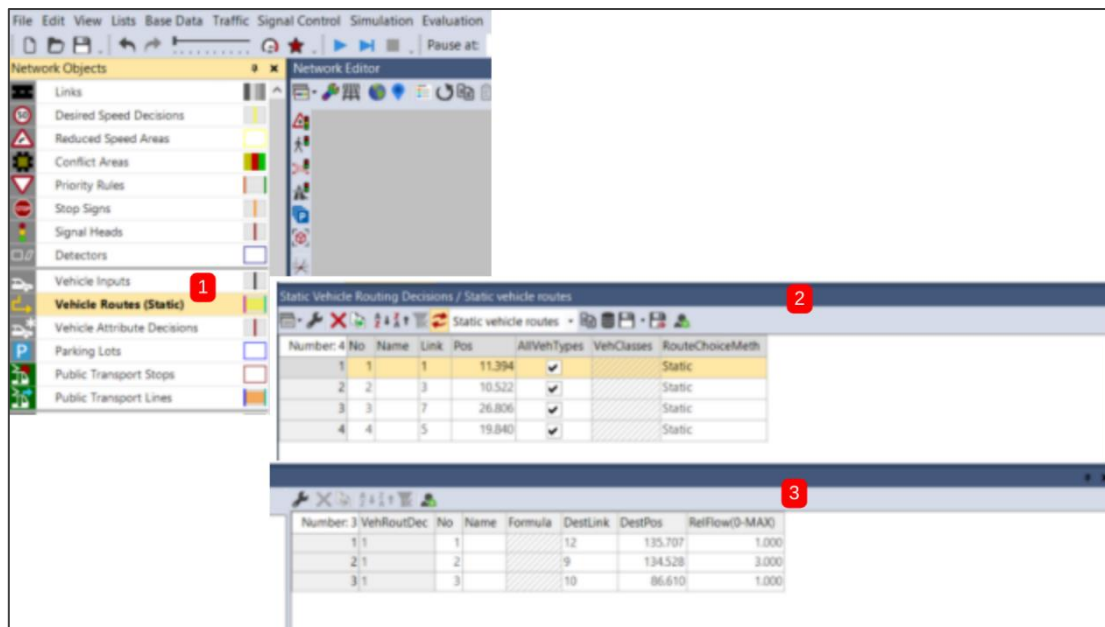


Fonte: MASSDOT (2020).

Os volumes de entrada (*Vehicle inputs*) foram definidos nas extremidades dos links de aproximação, com composição veicular em unidades de Passenger Car Unit

(PCU). As taxas de conversão direcional, foram inseridas via Vehicle Routes (Figura 23), especificando-se origem, destino de cada rota e os percentuais de conversão relativa (ex.: 88%, 14%, 30%).

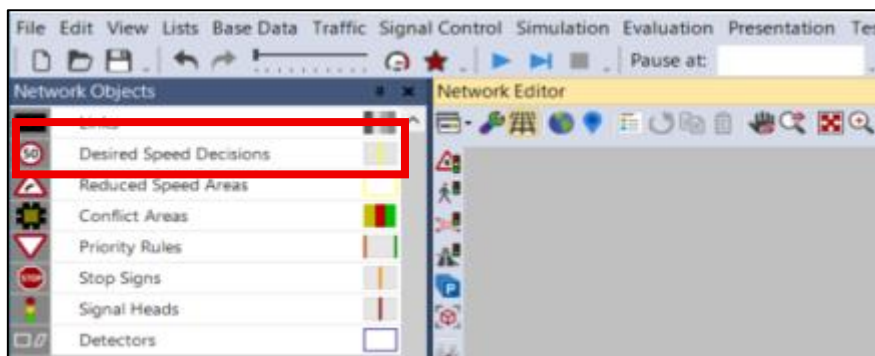
Figura 23: Inserção de Vehicles Routes e percentual por rotas



Fonte: Adaptado de PTV (2025).

Implementaram-se *Speed Areas* (Figura 24) nas aproximações (49 m), limitando velocidades operacionais a 20-30 km/h na zona de influência da rotatória. No anel central estabeleceu-se limite de 30 km/h, assegurando transições realistas de aceleração/desaceleração e estabilidade na calibração dos indicadores de desempenho.

Figura 24: Configuração espacial das *Speed Areas*.



Fonte: Vissim (Versão 2026).

A sequência metodológica descrita assegura representatividade geométrica, operacional e comportamental da interseção real, constituindo base robusta para a análise comparativa dos cenários alternativos propostos.

Com o intuito de assegurar a coerência entre a situação real e a representação computacional. A Tabela 6 apresenta um resumo dos principais parâmetros geométricos considerados, comparando os valores observados com aqueles inseridos no modelo.

Tabela 6 - Parâmetros avaliados na simulação

Parâmetro	Sigla Vissim	Unidade	Descrição / Conceito
Extensão Média da Fila	<i>QLEN</i>	m (metros)	Comprimento médio da fila de espera no período analisado. Representa quanto de via ficou ocupado por veículos em espera, permitindo avaliar o impacto geométrico da retenção no viário urbano.
Número Total de Veículos	<i>VEHS (ALL)</i>	veículos	Número total de veículos considerados naquele ramo (<i>link</i>) ou nó (<i>node</i>) durante o período (inclui todas as classes veiculares: leves, motocicletas, comerciais e pesados).
Total de Pessoas Transportadas	<i>PERS (ALL)</i>	pessoas	Total de pessoas transportadas (soma dos ocupantes de todos os veículos) no período. Útil para análises de mobilidade e eficiência de ocupação veicular, especialmente em redes de transporte coletivo.
Nível de Serviço	<i>LOS (ALL)</i>	Qualitativo (A–F)	Classificação qualitativa (de A a F) calculada a partir do atraso médio de todos os veículos, conforme diretrizes do <i>Highway Capacity Manual</i> (HCM). Nível A representa operação eficiente; Nível F representa saturação.
Atraso Médio por Veículo	<i>VEHDELAY (ALL)</i>	s/veículo (segundos por veículo)	Tempo adicional gasto por cada veículo em relação ao tempo que levaria em condições de escoamento livre. Métrica central para avaliação de eficiência operacional e comparação entre cenários.
Atraso Médio por Pessoa	<i>PERDELAY (ALL)</i>	s/pessoa (segundos por veículo)	Segue a mesma lógica do atraso por veículo, mas leva em conta quantos ocupantes há dentro de cada veículo.
Tempo de Parada Médio	<i>STOPS (ALL)</i>	s/veículo (segundos por veículo)	Parte do atraso total em que o veículo ficou completamente parado ou em velocidade muito reduzida (quase parado). Indicador de ineficiência operacional e consumo excessivo de combustível.
Emissões de Monóxido de Carbono	<i>EMISSIONSCO</i>	g (gramas)	Massa total de CO emitida pelos veículos no período, calculada a partir dos perfis de velocidade e aceleração simulados. Indicador de qualidade do ar e impacto ambiental local.
Emissões de Óxidos de Nitrogênio	<i>EMISSIONSNOX</i>	g (gramas)	Massa total de NOx (NO + NO ₂) emitida pelos veículos no período. Poluente relevante para saúde respiratória e formação de ozônio troposférico; sensível a variações de velocidade e congestionamento.
Emissões de Compostos Orgânicos Voláteis	<i>EMISSIONSVOC</i>	g (gramas)	Massa total de VOCs (<i>Volatile Organic Compounds</i>) emitidas pelos veículos no período. Precursor de ozônio e importante para análises de qualidade do ar urbano.
Consumo de Combustível	<i>FUELCONSUMPTION</i>	L (litros) ou kg (quilogramas)	Volume ou massa de combustível consumido pelos veículos no período analisado. Indicador de eficiência operacional, custos operacionais e impacto ambiental direto. Sensível a paradas frequentes e acelerações intensas.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

No que se refere à operação do tráfego, o modelo base foi configurado de modo a reproduzir o funcionamento da rotatória, caracterizado pela ausência de controle semafórico. Foram definidas as regras de prioridade de passagem, os movimentos permitidos em cada aproximação e os comportamentos de aceitação de brechas compatíveis com a operação de rotatórias urbanas.

No Vissim, *Priority Rules* (Regras de Prioridade) são mecanismos que definem qual veículo tem direito de passagem quando dois ou mais fluxos se cruzam ou competem pelo mesmo espaço de via, replicando comportamentos reais de trânsito como semáforos, e convenções de tráfego. As regras de prioridade são configuradas através da definição de links de baixa prioridade e links de alta prioridade, onde veículos no link de baixa prioridade apenas avançam se houver espaço seguro e suficiente no link de alta prioridade, respeitando distâncias de segurança e tempos de aceleração realistas.

Existem diferentes tipos de regras: *2-way stop signs* (ambos os fluxos têm igual prioridade, respeitando ordem de chegada), *priority signs* (um fluxo tem preferência absoluta sobre o outro), e *signal-controlled* (prioridade controlada por semáforos), sendo essencial calibrá-las conforme as condições reais da interseção estudada, especialmente em rotatórias onde o fluxo circulatório tem prioridade sobre as aproximações de entrada.

Foram também definidos os movimentos permitidos em cada aproximação e os comportamentos de aceitação de brechas (tempo de espera para entrada) compatíveis com a operação de rotatórias urbanas. No modelo, os parâmetros de comportamento dos condutores foram inicialmente estabelecidos conforme os padrões do VISSIM, com ajustes realizados posteriormente na etapa de calibração.

A demanda veicular foi inserida no modelo com base nos volumes observados em campo, distribuídos por aproximação e por movimento (entradas, saídas e conversões). Os fluxos foram configurados para representar os períodos de pico analisados, identificados a partir da análise do maior volume observado (Tabela 4), utilizando volumes horários acumulados de veículos por hora. A composição veicular foi definida conforme os percentuais observados, contemplando automóveis leves, motos, ônibus e caminhão). A Tabela 7 sintetiza os volumes e a distribuição direcional utilizados na modelagem.

Tabela 7 – Volume de tráfego nos períodos de maior demanda

DEMANDA X HORA PICO								
Hora de Pico	A1	S1	A2	S2	A3	S3	A4	S4
08:00 - 09:00 (manhã)	1374	1249	1731	1091	429	610	1134	1670

12:00 - 13:00 (tarde)	1799	1225	1487	808	993	589	1210	1906
18:00 - 19:00 (noite)	1819	968	1572	1526	1069	768	1282	1771

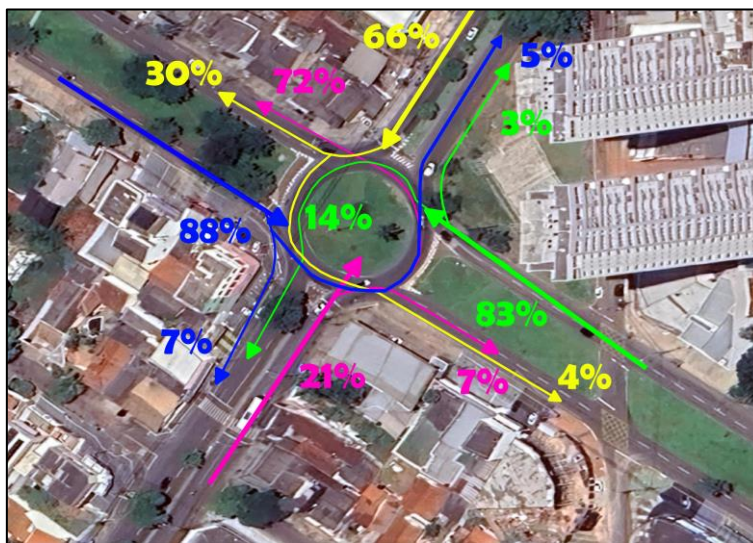
Fonte: Elaborado pelos Autores.

Além disso, o percentual de veículos por conversão e por sentido foi obtido a partir da contagem volumétrica realizada em campo, separando o fluxo horário total em movimentos de aproximação (reta, conversão à direita e conversão à esquerda) para cada braço da interseção, e transformando esses valores em porcentagem em relação ao volume total observado no respectivo movimento ou abordagem, como apresentado na Figura 18. Os valores obtidos foram usados em todos os cenários para os três picos (manhã, tarde e noite).

Os volumes veiculares coletados diretamente em campo durante os períodos de contagem (pico matutino, vespertino e noturno) foram inicialmente processados, validados e estruturada por zonas de tráfego e integrada ao Plano Diretor de Mobilidade Urbana do município (MEDRANO, 2023). Uma vez que a utilização exclusiva dos dados observados em campo não refletiria com precisão os movimentos reais dos veículos na interseção, pois a contagem não levou em conta um dia completo de viagens (24 horas), sem considerar as rotas consolidadas e padrões estruturais de deslocamento da cidade. Para superar essa limitação, as taxas de conversão direcional (expressas em porcentagem do volume total por aproximação, conforme a Figura 25, foram estimadas e confirmadas cruzando os volumes de campo com a matriz OD oficial, garantindo representatividade dos padrões reais de tráfego.

A matriz origem-destino de Goiânia, derivada de estudos sistemáticos do Plano Diretor de Mobilidade Urbana foi modelada no software PTV Vissum, por meio da funcionalidade de *paths* (caminhos veiculares) e *turning movements*, onde cada aproximação da interseção recebe fluxos parciais proporcionais às porcentagens OD (ex.: 88%, 14%, 30% etc., conforme diagrama). Procedendo-se então à definição de *partial routes* com pesos relativos às taxas de conversão, associadas a volumes totais de entrada por entrada (*input volumes*), permitindo que o simulador distribua automaticamente os veículos conforme os percentuais programados. Essa abordagem assegura que os movimentos simulados reproduzam fielmente os padrões observados na matriz OD regional, validando a modelagem para análises comparativas de cenários de controle (PTV GROUP, 2023).

Figura 25: Percentual de veículos por sentido.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Foram definidos os parâmetros gerais de simulação, incluindo o tempo de aquecimento (warm-up) e o período total de execução. Adotou-se um tempo de aquecimento de 600 segundos (10 minutos) para permitir que o tráfego simulado atingisse um estado operacional estável, livre da condição artificial inicial de rede vazia. Após este período, a simulação prosseguiu por mais 3600 segundos (1 hora), correspondendo à duração completa de um período de pico analisado. O tempo total de simulação de 4200 segundos (70 minutos) garante, portanto, a coleta de dados representativos e estáveis para a análise de desempenho.

O período de aquecimento de 600 segundos (10 minutos) é adotado em estudos de microssimulação de tráfego, incluindo rotatórias, para simulações de 3600 segundos (1 hora) de análise efetiva, conforme diretrizes da FHWA. Esse tempo permite que a rede viária inicialmente vazia alcance estado estacionário (equilíbrio), onde número de veículos entrando equilibra-se com os saindo, evitando que estatísticas iniciais sejam enviesadas por condições artificiais de fluxo livre (FHWA, 2004; MassDOT, 2020).

Ao final dessa etapa, obteve-se um modelo computacional inicial representativo da situação atual da interseção, denominado modelo base, o qual serviu como referência para a avaliação comparativa dos cenários alternativos de controle de tráfego propostos neste estudo.

5.6 VERIFICAÇÃO E CORREÇÃO DE ERROS

A etapa de verificação e correção de erros teve como objetivo assegurar a consistência lógica e operacional do modelo base de microssimulação, previamente à realização dos processos de calibração e validação. Conforme recomendado pela FHWA (2019), essa etapa garante que o modelo esteja corretamente codificado e funcional, evitando que erros de estrutura comprometam os resultados das análises posteriores.

Inicialmente, foi realizada uma revisão dos elementos inseridos no modelo, abrangendo a geometria da rede viária, os sentidos de circulação, o número e a largura das faixas, os limites de velocidade, as regras de prioridade, os movimentos permitidos e a distribuição da demanda veicular por aproximação e por movimento. Essa verificação teve como finalidade confirmar a coerência entre as informações observadas em campo e aquelas implementadas no ambiente de simulação.

Na sequência, foram executadas simulações preliminares do modelo base, acompanhadas de inspeção visual detalhada das animações geradas pelo software. Esse procedimento permitiu avaliar qualitativamente o comportamento do tráfego simulado, observando-se aspectos como:

- coerência dos trajetos percorridos pelos veículos;
- respeito aos sentidos de circulação e às regras de prioridade;
- ocorrência de conflitos ou manobras não realistas;
- formação de filas incompatíveis com as condições observadas em campo; e
- velocidades de deslocamento inconsistentes com os limites regulamentados.

Durante essa inspeção, eventuais inconsistências de codificação ou de lógica operacional foram identificadas e registradas. As principais ocorrências incluíram, por exemplo, ajustes em conectores de tráfego, revisão de regras de prioridade em acessos específicos e correção de parâmetros geométricos que influenciavam o comportamento veicular. As correções necessárias foram implementadas diretamente no modelo, e novas execuções de simulação foram realizadas para verificar a eficácia dos ajustes efetuados.

A Tabela 8 mostra os principais aspectos críticos identificados e analisados durante a simulação e as respectivas correções realizadas.

Tabela 8 – Refinamentos adotados na modelagem

Ajustes observados	Impacto nos resultados	Solução recomendada
Geometria simplificada demais (comprimentos de aproximação, faixas)	Subestima ou superestima filas, atrasos e conflitos; resultados pouco aderentes à observação de campo.	Verificar comprimentos em campo ou com auxílio de imagens de satélite; ajustar largura e posição de faixas com “background image”.
Conectores mal desenhados (curvas muito fechadas, sobreposição)	Gera desacelerações artificiais, perdas de capacidade, manobras estranhas de mudança de faixa.	Redesenhar conectores; evitar que veículos façam “cotovelos”; checar sentidos e prioridades em cada conector.
Prioridades e regras de conflito ausentes ou incorretas	Veículos “invadem” fluxos principais ou param onde não deveriam; filas e atrasos irreais; conflitos sub ou superestimados.	Inserir <i>priority rules</i> e <i>conflict areas</i> conforme o controle real (preferência, yield, give way); testar visualmente se o comportamento reproduz o observado em campo.
Rotas/movimentos mal definidos (routing decisions, static routing)	Alguns movimentos praticamente não ocorrem; outros ficam superalimentados; padrão de ocupação das faixas se torna irreal.	Verificar se todas as rotas possíveis estão definidas; ajustar percentuais de rota conforme contagens de conversão; usar <i>vehicle routes</i> ou <i>static routing decisions</i> adequadas ao caso.
Detetores posicionados mal (para semáforo atuado)	Controle atuado reage errado (verde cortado cedo ou tarde); volumes, velocidades e ocupações medidos não representam o ponto de interesse.	Posicionar detetores em locais coerentes (antes da linha de retenção, ao longo do trecho de análise); testar se a atuação semafórica responde como esperado.
Áreas de velocidade reduzida em excesso ou mal calibradas	Veículos reduzem demais a velocidade em pontos que não deveriam, ou não reduzem onde há curvas/acessos críticos; distorção de tempos de viagem.	Usar <i>reduced speed areas</i> apenas onde há justificativa física (curvas fechadas, serras, aproximações, zonas escolares etc.) e calibrar os valores com base em medições de velocidade.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Esse processo foi conduzido de forma iterativa, até que o modelo apresentasse comportamento operacional compatível com a realidade observada, sem a ocorrência de erros evidentes de estrutura ou funcionamento. Ressalta-se que, nesta etapa, não foram realizados ajustes com o objetivo de aproximar quantitativamente os resultados simulados dos valores observados em campo, uma vez que essa finalidade é própria da etapa de calibração. A verificação concentrou-se exclusivamente na garantia da coerência estrutural e funcional do modelo.

5.7 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A etapa de calibração e validação da simulação teve como finalidade ajustar o modelo de microsimulação de modo que os resultados obtidos representassem adequadamente as condições reais de operação da interseção em estudo, bem como verificar a capacidade do modelo calibrado de reproduzir o desempenho do sistema sob diferentes condições de demanda.

A calibração do modelo de simulação Vissim foi realizada através de uma abordagem semiautomática, na qual os volumes de tráfego foram obtidos a partir de coleta de dados em campo e alimentados diretamente no modelo, enquanto os demais parâmetros comportamentais dos veículos foram definidos através dos valores padrão disponibilizados pelo simulador.

Essa estratégia justifica-se pelo fato de que o Vissim, em suas configurações *default*, já incorpora calibrações empíricas baseadas em estudos de comportamento veicular internacionais, reduzindo a necessidade de ajustes manuais extensivos para contextos urbanos. Os volumes horários acumulados foram coletados em quatro períodos de pico ao longo do dia: pico da manhã entre 07:00 e 09:00, período da tarde entre 11:00 e 14:00, e pico da noite entre 17:00 e 19:00. Cobrindo as condições operacionais mais críticas, permitindo simulação de demanda dinâmica e fidedigna às condições reais observadas em campo.

Os parâmetros comportamentais dos veículos foram configurados utilizando os valores padrão do Vissim, que incorporam modelos comportamentais consolidados da literatura internacional. A velocidade desejada foi mantida em 50 km/h em regime de escoamento livre, com distribuição normal conforme a curva padrão do simulador, representativa de tráfego urbano em áreas de moderado congestionamento. O modelo de velocidade adotado foi o *vehicle-based* (baseado em veículos), que considera interações locais entre veículos e presença de obstáculos, refletindo mais adequadamente a dinâmica de circulação em interseções urbanas. O gap de seguimento (*follow-up gap*) foi mantido em 0 segundos no modelo meso, indicando comportamento de sequência contínua em condições de fila, enquanto o comportamento de mudança de faixa foi ativado conforme configuração padrão do simulador, refletindo mudanças de faixa realistas nas aproximações de rotatória. Esses parâmetros não foram manualmente ajustados, mantendo a calibração padrão do Vissim, que já é adequada para simulações de interseções urbanas em contextos brasileiros similares aos estudados.

Um aspecto importante da calibração foi a definição estratégica de áreas de redução de velocidade nas aproximações de cada ramo da rotatória (cenário 1 e 2) e dos semáforos (cenário 3 e 4), representando o comportamento realista de desaceleração que condutores apresentam ao se aproximarem da interseção. Foram implementadas áreas de redução de velocidade com cerca de 49 metros de comprimentos, dependendo da geometria e características de cada aproximação.

Essa configuração é essencial para capturar com realismo o comportamento observado em campo, onde condutores reduzem velocidade antecipadamente diante da possibilidade de parada no sinal semafórico ou na entrada da rotatória, impactando diretamente em métricas críticas como atraso médio por veículo (*VEHDELAY*) e comprimento de fila (*QLEN*), ambas fundamentais para avaliação de desempenho operacional da interseção.

Inicialmente, os fluxos de tráfego foram inseridos no modelo com base nas contagens realizadas em campo, respeitando-se as proporções dos movimentos de conversão, os volumes veiculares por aproximação e as regras de prioridade observadas na operação da rotatória. Essa configuração assegurou que a demanda representada no modelo refletisse de forma consistente os padrões de circulação observados durante os levantamentos.

Embora não tenha sido aplicada uma validação numérica formal através de métricas estatísticas como GEH (Geoffrey E. Havers) *statistic* ou MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*), o modelo foi validado sob perspectiva comportamental e visual, apropriada para estudos exploratórios comparativos. A validação incluiu três verificações principais: primeiramente, confirmação de que os volumes de saída do modelo aproximam-se dos volumes de entrada, indicando ausência de travamentos ou anomalias na rede viária; em segundo lugar, inspeção visual dos traços de simulação para confirmar que os padrões de formação de fila, comportamentos de mudança de faixa e sequências de entrada na rotatória correspondiam qualitativamente às observações coletadas em campo; e terceiromente, verificação de que os tempos de atraso estimados situam-se em escalas realistas para operação saturada, consistentes com comportamento de rotatória urbana sob alta demanda.

Essa abordagem qualitativa é justificada pelo objetivo primário da pesquisa, que é a comparação entre cenários alternativos de controle (Cenários 1, 2 e 3) em vez de previsão absoluta de desempenho operacional.

Uma limitação importante do processo de calibração foi a adoção exclusiva de parâmetros padrão do Vissim sem ajustes específicos baseados em dados comportamentais detalhados coletados em campo, tais como taxas de aceleração/desaceleração, distâncias críticas de seguimento ou comportamento de *gap-acceptance* em abordagens de rotatória. Essa simplificação foi justificada pela disponibilidade limitada de recursos para instrumentação completa da interseção e pela

complexidade operacional de coletar essas variáveis comportamentais em contexto urbano real.

Modelos microscópicos mal ajustados tendem a produzir comportamentos artificiais, como veículos se sobrepondo graficamente, invasão de faixas adjacentes sem justificativa ou remoção forçada de veículos da rede por “falta de espaço”, o que costuma aparecer em mensagens de erro semelhantes às exibidas pelo software. Esses efeitos são sintomas diretos de inconsistências geométricas (conectores muito curtos, larguras incorretas) ou lógicas (prioridades ausentes, regras de conflito mal definidas, rotas incompletas), e comprometem qualquer inferência sobre filas, atrasos ou emissões, já que o modelo passa a violar restrições físicas básicas do tráfego.

A Figura 26 mostra um exemplo de aviso dado pelo próprio software ao rodar a simulação em caso de erro na modelagem.

Figura 26: Aviso do software Vissim (Versão 2026) em caso de erro



Fonte: Vissim (Versão 2026).

Por essa razão, as correções descritas não são meros “acabamentos”, mas etapas que garante qualidade ao modelo. A literatura enfatiza que um modelo só pode ser considerado válido quando reproduz de forma consistente a operação observada, sem geração de erros internos, sem remoção forçada de veículos e sem comportamentos anômalos persistentes, mesmo antes da calibração quantitativa de volumes, velocidades e atrasos (CECIERJ, 2010).

Assim, ao eliminar situações como veículos “travando” a rotatória, mensagens de remoção automática de unidades e padrões de mudança de faixa incompatíveis com o campo, as medidas adotadas asseguram que o modelo atenda aos requisitos mínimos de plausibilidade operacional, conferindo robustez científica aos resultados apresentados e reduzindo espaço para questionamentos sobre a confiabilidade da microsimulação.

Um erro como link (via) muito curta pode causar os veículos a “passarem um por cima do outro” na modelagem, como mostra a Figura 27.

Figura 27: Veículos se sobressaindo no Vissim



Fonte: Vissim (Versão 2026).

Ajustes como aumentar o tamanho do link e definir uma distância de decisão de mudança de faixa (adotado nesse trabalho para todos os cenário e vias como 200 metros) corrigem este erro, como mostra na Figura 28.

Figura 28: Simulação Atravessando a interseção corretamente.



Fonte: Vissim (Versão 2026).

5.8 CENÁRIOS INVESTIGADOS

A etapa de análise dos cenários e indicadores de desempenho teve como objetivo avaliar comparativamente o comportamento operacional e ambiental da interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana sob diferentes estratégias de controle de tráfego. As análises foram realizadas a partir do modelo de microssimulação previamente calibrado e validado, assegurando consistência metodológica e confiabilidade nos resultados obtidos.

Todos os cenários foram codificados e executados no ambiente do software PTV Vissim (Versão 2026), mantendo-se constantes as condições de demanda, os períodos de análise, os parâmetros comportamentais calibrados e a configuração geral da rede. Para cada alternativa, foram realizadas execuções independentes do modelo, com a modificação exclusiva dos elementos associados à estratégia de controle adotada, de modo a isolar os efeitos de cada intervenção sobre os indicadores analisados. Os resultados foram extraídos diretamente das planilhas de saída do software, garantindo rastreabilidade e reprodutibilidade das análises.

A avaliação foi conduzida com base em indicadores operacionais e ambientais, selecionados em consonância com os objetivos da pesquisa e com as recomendações do *Highway Capacity Manual* (HCM). Entre os indicadores operacionais analisados destacam-se o tempo médio de atraso por veículo, o nível de serviço (NS), a velocidade média, o comprimento médio das filas e o número de paradas. Complementarmente, foram analisados indicadores ambientais, incluindo emissões de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (PM_x) e consumo de combustível, obtidos a partir dos perfis individuais de velocidade e aceleração gerados pela microssimulação.

Como mencionado, todos os cenários foram modelados usando a hora com maior volume de tráfego de cada período do dia: manhã (08:00 - 09:00), tarde (12:00 - 13:00) e noite (18:00 - 19:00). Os dados obtidos através da contagem volumétrica foram inseridos em suas respectivas aproximações a partir da função *Vehicle Input*.

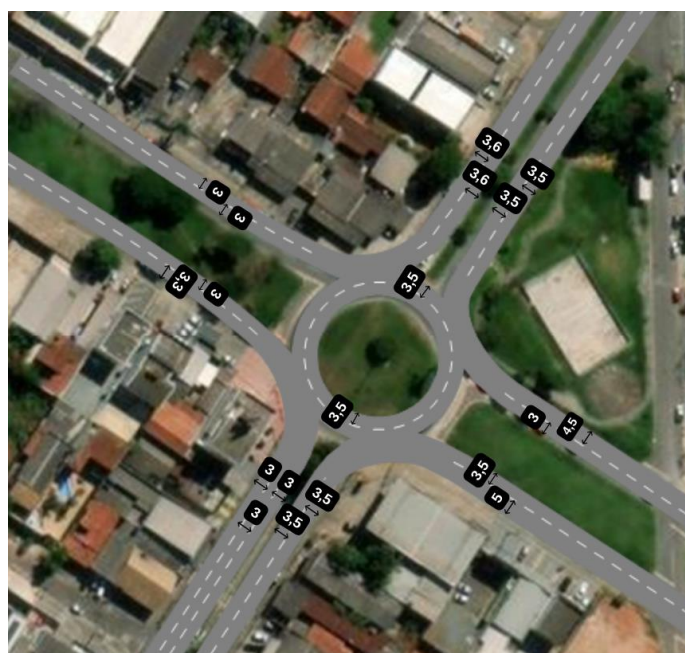
Como os volumes inseridos correspondem a 1 hora de contagem o tempo de *Evaluation* da simulação foi de 4200 segundos, com um tempo de *Warm Up* (Aquecimento) de 600 segundos. Devido a simulação começar com a rede vazia; sem warm-up, os primeiros minutos têm atrasos e filas muito menores que na realidade, pois os veículos entram em fluxo livre.

A velocidade regulamentada nas vias é de 50km/h, todos os cenários foram modelados respeitando essa velocidade desejada.

- Cenário 1: Situação Atual

A Figura 29 ilustra o modelo do Cenário 1, que representa a configuração atual da rotatória na interseção da Avenida Transbrasiliana com a Avenida Feira de Santana. Este cenário serve como base para a comparação de desempenho com as alternativas propostas nos demais cenários.

Figura 29: Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesse cenário, foram reproduzidas as condições observadas em campo, incluindo geometria existente, organização das faixas, sinalização vertical e horizontal, controle semafórico em operação, além dos volumes de tráfego obtidos contagens volumétricas.

No Vissim, a geometria foi modelada a partir de imagens de satélite (Google Earth), de forma a representar com precisão os raios de curvatura, os comprimentos de aproximação, larguras de faixas, canteiros central e ilhas de canalização, quando existentes. Os movimentos permitidos em cada aproximação (retos, conversões à direita e à esquerda) foram configurados por meio de *Vehicle Routes*, e o percentual de veículos por sentido foram inseridos de acordo com os valores obtidos na Figura 25.

A regra de prioridade foi configurada conforme o disposto no Código de Trânsito Brasileiro (CTB, 1997), atribuindo preferência aos veículos que já circulam no anel interno sobre os que desejam acessá-lo a partir das vias de aproximação. Essa prioridade

foi implementada através da ferramenta *Priority Rules* do Vissim. Para simular a dinâmica de entrada na rotatória, os parâmetros de *gap acceptance* (aceitação de intervalo) representado pelo campo *Min. Gap Time* das regras de prioridade do Vissim, foi definido para 3,0 s para a aproximação modelada.

A escolha do valor de 3,0 s para o parâmetro de aceitação de brecha está alinhada com faixas usualmente reportadas em estudos de brecha crítica em rotatórias e interseções não semaforizadas. Trabalhos que analisam o desempenho operacional de rotatórias e a calibração de modelos microscópicos indicam valores de brecha crítica tipicamente entre cerca de 2,5 s e 4,5 s para movimentos de entrada, a depender da geometria e do padrão de condução locais (MONTALVÃO, 2010; CET, 2015; SILVA; SOUZA, 2018). Dessa forma, a adoção de 3,0 s posiciona o modelo dentro do intervalo recomendado para rotatórias urbanas brasileiras, representando um comportamento de cedência moderado, coerente com o observado em campo na interseção estudada.

Esse valor indica que os veículos somente deixam a linha de parada para ingressar no anel quando observam uma brecha mínima de 3 s entre dois veículos consecutivos da circulação principal, reproduzindo o comportamento de cedência registrado em campo. Assim, a calibração desse tempo de brecha controla diretamente a agressividade das entradas: valores menores resultariam em condutores mais ousados e maior capacidade de escoamento, enquanto valores maiores descreveriam uma postura mais conservadora, com incremento de filas e atrasos na rotatória existente.

- Cenário 3:

O Cenário 3 considera a operação da interseção com um controle semafórico de tempo fixo, projetado a partir dos volumes de tráfego observados e do dimensionamento dos ciclos e repartições de verde. A proposta busca avaliar o desempenho de um plano de sinalização otimizável, porém sem capacidade de adaptação em tempo real às variações de demanda. A Figura 30 ilustra o modelo deste cenário.

Figura 30: Cenário 2



Fonte: Vissim (Versão 2026).

No modelo Vissim, esse cenário foi implementado por meio de um controlador de estágio fixo (*Fixed-time controller*), no qual o ciclo, a sequência de fases e os tempos de verde de cada estágio foram previamente definidos.

A geometria do cenário 2 representa um cruzamento em nível de dois eixos arteriais perpendiculares, ambos com múltiplas faixas por sentido e canteiro central alongado, configurando um nó típico de corredor urbano estruturador. As aproximações de norte-sul e leste-oeste apresentam três faixas por sentido, todas com 3 metros cada, com canalizações que conduzem movimentos retos e conversões à direita, evitando cruzamentos críticos no interior da caixa de interseção. As ilhas triangulares nos quatro cantos funcionam como refúgios e zonas de transição entre o espaço veicular e o espaço exclusivo de pedestres, organizando melhor os fluxos e reduzindo a área efetiva de conflito.

Quanto à representação dos pedestres, a interseção foi modelada no Vissim utilizando quatro conjuntos principais de elementos: Volume de entrada de pedestres (*Pedestrian Inputs*), Área de pedestres (*Pedestrian Areas*), Conectores (*Connectors*) e Faixa de pedestres (*Pedestrian Crossings*). Cada esquina possui um *Pedestrian Input*, que representa o ponto de entrada dos pedestres no sistema – o volume usado foi de 30 pedestres por hora, visto que durante as contagens e visitas in loco notou-se que o volume de pedestres é relativamente baixo. A partir desses pontos, *Pedestrian Areas* foram dispostas no entorno das ilhas e do perímetro externo da interseção; funcionando como calçadas e refúgios. Esses espaços permitem a movimentação livre dos pedestres, a

mudança de direção e o acúmulo em frente às faixas de travessias, reproduzindo de modo realista a ocupação observada em calçadas reais.

Para conectar as áreas de pedestres (*Pedestrian Areas*) às faixas de travessia foram definidos conectores, que atuam como pequenos canais de ligação, guiando os pedestres até o alinhamento exato do cruzamento sinalizado. Sobre as faixas zebraadas foram inseridas faixas de pedestres (*Pedestrian Crossings*), que são os elementos de travessia propriamente ditos e que podem ser associados a grupos semafóricos de pedestres e a áreas de conflito com veículos. Em cada quadrante, a faixa de pedestre (*Pedestrian Crossing*) conecta a calçada de um lado do eixo à calçada do lado oposto, atravessando tanto as aproximações norte-sul quanto leste-oeste em trechos ortogonais relativamente curtos, o que reduz o tempo de exposição dos pedestres ao tráfego.

Nas quatro esquinas, o comando de semaforização foi complementado com *Pedestrian Signal Heads* associados ao grupo específico de pedestres no controlador, garantindo que a travessia só ocorra durante o estágio exclusivo de 10 segundos. Esses sinalizadores são posicionados na extremidade da faixa de pedestre, voltados para as áreas de pedestres, de forma a reproduzir o foco luminoso visível ao pedestre antes de entrar na faixa.

Assim, a geometria combina um miolo central compactado, com ilhas canalizando os fluxos veiculares, e um anel periférico formado por áreas de pedestres que envolvem a interseção, conectadas entre si por conectores e faixas de pedestres. Essa organização reduz o comprimento das travessias, concentra pedestres em zonas de espera protegidas e facilita a associação direta dos cruzamentos aos grupos semafóricos de pedestres, melhorando tanto a segurança quanto a capacidade operacional da interseção.

O dimensionamento dos tempos de verde pode ser realizado com base em métodos clássicos de engenharia de tráfego (por exemplo, Webster ou HCM), considerando os volumes de saturação, taxas de fluxo e relações volume/capacidade das aproximações. Uma vez estabelecidos, esses tempos são mantidos constantes durante toda a simulação, reproduzindo a lógica de um plano fixo convencional.

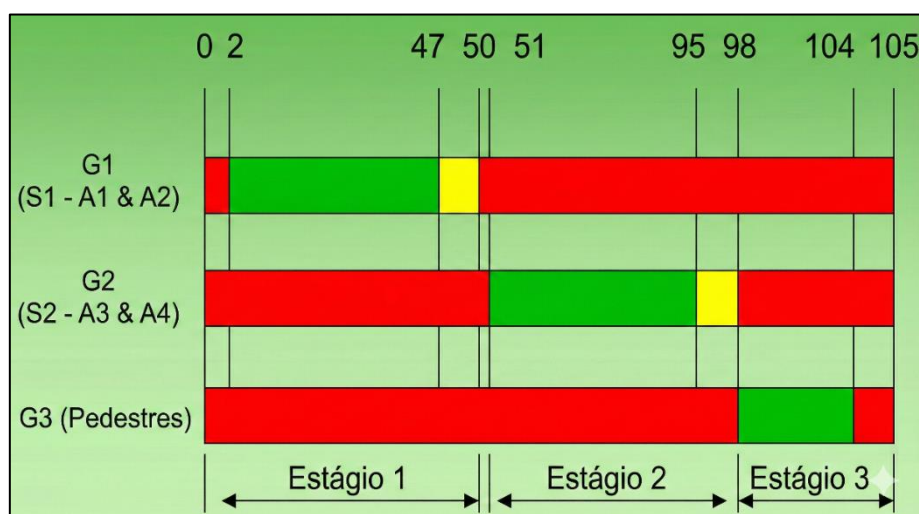
Para o Cenário 2 baseou-se na adaptação do método clássico de Webster (1958), tradicionalmente utilizado para interseções semaforizadas convencionais, mas aqui ajustado para a geometria existente. Inicialmente, calculou-se os volumes saturados por faixa ($Q_{si} = \text{volume total da aproximação} / \text{número de faixas de entrada}$), obtendo-se valores entre 850-1.200 pcu/h/faixa nos movimentos críticos durante picos. Aplicando a fórmula $C = (1,5C1 + 5)/(1-Y)$, onde $C1$ = tempo mínimo de verde por fase (15s) e Y =

soma das razões volume/saturação ($\sum y_i \approx 0,91$), resultou em ciclo de 92 segundos. A configuração final adotada, com ciclo efetivo de 105 segundos com A1 e A2 tendo 45 segundos de verde e A3 e A4 com 44 segundos de verde, acrescidos de 6 segundos para pedestres, 2 segundos de amarelo em cada ciclo e, por fim, 2 segundos de vermelho total entre o ciclo A1&A2 para A3&A4 e 3 segundos de vermelho total após o ciclo de pedestres.

A adoção de 105 segundos se deu devido aos resultados insatisfatórios de Nível de Serviço com a programação de 92 segundos obtida a partir da fórmula de Webster. Através de validação empírica de tentativa e erro, optou-se pelo ciclo de 105 segundos que, apesar de mais longo do que o determinado pela fórmula, ofereceu melhores resultados sem comprometer o conforto dos condutores das vias no estágio seguinte, em virtude de um tempo de vermelho muito longo.

A programação de tempos fixos do Cenário 2 segue o diagrama de intervalos luminosos apresentado na Figura 31.

Figura 31: Diagrama de intervalos luminosos adotado

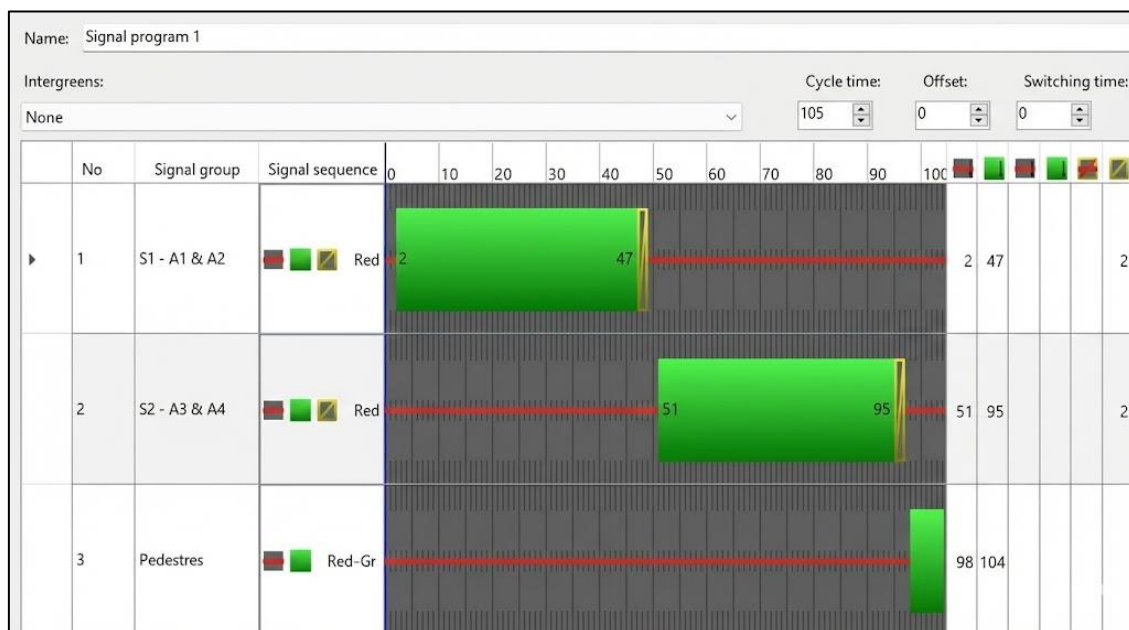


Fonte: Elaborado pelos Autores.

Na configuração desse cenário, foram implementadas melhorias geométricas e operacionais que visam aumentar a segurança e a eficiência da interseção. Destacando-se, a conversão à esquerda que foi eliminada em todas as aproximações, uma vez que os entornos da interseção dispõem de retornos (conversões em "U") acessíveis em todas as aproximações, possibilitando que os veículos que necessitam virar à esquerda o façam de forma segura e sem criar pontos de conflito direto no centro da interseção.

A configuração semaforica do Cenário 2 está apresentada a seguir na Figura 32.

Figura 32: Configuração semafórica do Cenário 2 (Vissim)



Fonte: Vissim (Versão 2026).

As nomenclaturas fazem referências, respectivamente, aos seguintes movimentos:

- S1 (*signal group* ou grupo semafórico) – A1 & A2: Movimento saindo do Norte da Avenida Feira de Santana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Transbasiiana (S3) para A1. E movimento saindo do Sul da Avenida Feira de Santana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Transbasiiana (S4) para A2;
- S2 (*signal group* ou grupo semafórico) – A3 & A4: Movimento saindo do Leste da Avenida Transbasiiana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Sul da Avenida Feira de Santana (S1) para A3. E movimento saindo do Oeste da Avenida Transbasiiana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Feira de Santana (S2) para A4;
- O ciclo exclusivo de pedestres significa vermelho total em todos os semáforos veiculares.

O plano semafórico analisado apresenta um ciclo total de 105 segundos, sendo ele o mesmo para todos os picos (manhã, tarde e noite), dividido em três estágios principais coordenados de forma sequencial. A distribuição temporal foi otimizada para atender simultaneamente aos fluxos veiculares nas duas principais direções da intersecção e garantir passagens seguras para pedestres. O offset zero e switching time nulo indicam

uma estrutura de controle determinística e sincronizada, adequada para uma intersecção com demanda previsível, típica de corredores urbanos com movimento predominantemente em duas direções perpendiculares.

Estágio 1: Eixo Norte-Sul/Sul-Norte (Links A1 e A2)

O primeiro estágio (SG 1 - S1, A1 & A2) opera com verde contínuo de 2 a 47 segundos, totalizando 45 segundos de serviço. Este período garante a progressão dos veículos que trafegam no eixo norte-sul (A1 para sul) e sul-norte (A2 para norte), permitindo a travessia segura dessa direção principal. O retângulo amarelo vazado de 47 a 49 segundos (número 2 na última coluna) representa o tempo de amarelo, já a barreira vermelha de entreverdes (*intergreen*), é visualizada entre os 49 e 51 segundos, representa o período de limpeza da intersecção (*all-red*), onde todos os movimentos veiculares são interrompidos simultaneamente. Os tempos de amarelo foram de 2 segundos para todos os movimentos. Este entreverde serve para dissipar completamente os veículos que ainda estavam na caixa de intersecção quando o sinal mudou, evitando conflitos com os movimentos perpendiculares que se iniciam logo a seguir. A alocação de 45 segundos reflete a prevalência do tráfego neste eixo ou a necessidade de capacidade adequada em uma das principais direções de circulação urbana.

Estágio 2: Eixo Leste-Oeste/Oeste-Leste (Links A3 e A4)

O segundo estágio (SG 2 - S2, A3 & A4) inicia-se aos 51 segundos e permanece verde até 95 segundos, oferecendo 55 segundos de verde para os veículos que circulam no eixo perpendicular (leste-oeste via A4 e oeste-leste via A3). O retângulo amarelo vazado de 95 a 98 segundos (número 2 na última coluna) representa o tempo de amarelo. O entreverde aparece entre 97 e 98 segundos (período de vermelho), garantindo que a intersecção seja limpa antes da sequência seguinte.

Uma característica importante desta configuração é a supressão de movimentos de conversão à esquerda em ambas as direções. A presença de retornos (intersecções T ou vias alternativas) nas proximidades elimina a necessidade de conversões à esquerda dentro do cruzamento principal, reduzindo significativamente os pontos de conflito. Veículos que desejam converter à esquerda podem utilizar os retornos nas vias adjacentes, evitando a sobreposição temporal entre fluxos opostos que seria inerente a uma conversão à esquerda protegida ou permitida. Esta estratégia resulta em:

- Simplificação do programa semafórico: sem necessidade de fases exclusivas para conversão à esquerda, o controlador executa apenas os movimentos retos e à direita, reduzindo complexidade operacional.
- Redução de conflitos críticos: elimina-se o cruzamento lateral entre veículos em conversão à esquerda e veículos frontais opostos, que é historicamente um dos cenários de maior risco de acidentes.
- Fluidez melhorada: a supressão de conversões permite alocações de tempo mais eficientes nos estágios retos, aumentando a capacidade geral da intersecção.

Estágio 3: Ciclo Exclusivo de Pedestres (10 segundos)

O terceiro estágio (SG 3 - Pedestres) é alocado entre 98 e 104 segundos, representando um período exclusivo de 6 segundos para travessias de pedestres. Este intervalo é estruturado de forma independente dos ciclos veiculares, garantindo que pedestres tenham direito de passagem sem interferência de veículos em nenhuma direção. A colocação do estágio de pedestres ao final do ciclo é estratégica: após ambos os eixos veiculares já terem sido servidos, a intersecção é completamente esvaziada, permitindo que todos os pedestres - independentemente da direção de travessia - cruzem simultaneamente em segurança.

O ciclo completo de 105 segundos do Cenário 3 reflete equilíbrio otimizado entre segurança e fluidez operacional. A sequência estruturada - Fase 1 (51-95s): 44s verde + 1s amarelo (51-95s); Fase 2 (95-105s + offset 47s): 10s verde; Pedestres (98-104s): 6s verde exclusivo - garante ausência de conflitos simultâneos, com entreverdes (*intergreens*) mínimos de 1 segundo assegurando limpeza da intersecção. A fase principal de 44 segundos prioriza eixos de maior demanda, enquanto 6 segundos exclusivos para pedestres implementam Intervalo Preferencial para Pedestres simplificado (95-101s), priorizando segurança em área urbana. O offset de 47 segundos otimiza separação temporal entre fases veiculares.

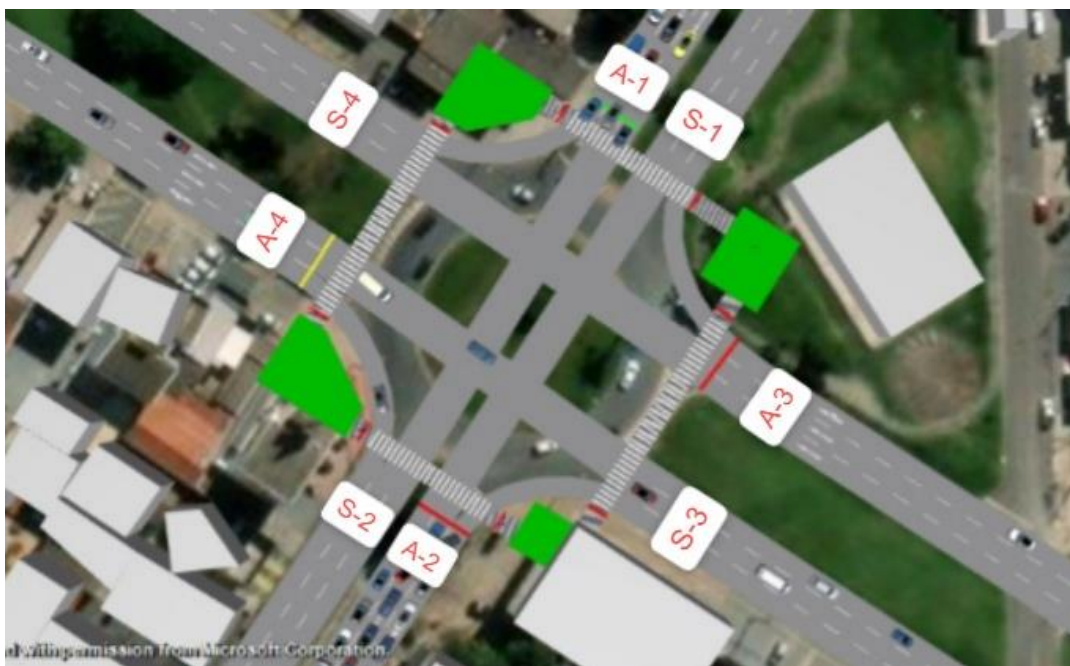
As áreas de redução de velocidade foram definidas nas 4 aproximações (A1, A2, A3, A4), simulando desaceleração progressiva, reproduzindo uma transição realista de escoamento livre para fila. Todos os demais elementos - geometria, volumes, frota e parâmetros comportamentais - foram mantidos idênticos ao Cenário 1, garantindo comparabilidade.

- Cenário 3: Semáforo Inteligente

O Cenário 3 avalia a adoção de um controle semafórico atuado (ou inteligente), capaz de ajustar a alocação de verde em função das condições de demanda em tempo real. Essa estratégia pressupõe a presença de detectores veiculares nas aproximações e tem como objetivo reduzir tempos ociosos de verde, minimizar atrasos e melhorar a utilização da capacidade da interseção, sobretudo em situações de variação significativa de fluxo ao longo do período analisado.

Neste cenário foram mantidas as configurações geométricas do Cenário 2. A Figura 33 apresenta o modelo do cenário.

Figura 33: Cenário 3: Semáforo Atuado



Fonte: Vissim (Versão 2026).

No Vissim, esse cenário foi implementado com o uso de um controlador veicular atuado (*Vehicle Actuated Controller*), configurando-se detectores em posições estratégicas nas aproximações de entrada. Os parâmetros de atuação incluem tempos mínimos e máximos de verde, extensões de verde (*Gap Extension*) e limites de tempo ocioso para mudança de fase. Dessa forma, a duração efetiva de cada estágio varia dentro de faixas pré-definidas, em resposta à presença ou ausência de veículos detectados.

No cenário 3 foi adotado um controle semafórico atuado por detector, em que os tempos de verde se ajustam dinamicamente à demanda de cada aproximação. A

programação parte de verdes mínimos diferenciados para os grupos veiculares A1–A3, A3–A2, A2–A4 e A4–A1 (entre 15 e 20 s) e de um verde máximo de 55–60 s, enquanto os grupos de pedestres associados a cada aproximação recebem cerca de 20 s de verde com chamadas por recall mínimo. Essa configuração teve como objetivo principal concentrar mais capacidade nas aproximações críticas, especialmente aquelas ligadas ao acesso A2, sem impor um ciclo fixo elevado, permitindo que aproximações com menor volume liberem o verde mais cedo e devolvam tempo ao sistema quando não há demanda.

Em termos de pesquisa, o cenário 3 representa uma solução “intermediária” entre a semaforização fixa otimizada e alternativas puramente geométricas (rotatórias), avaliando até que ponto a atuação pelo tráfego consegue reduzir atrasos, filas e emissões em um nó saturado de grande porte. A Figura 34 apresenta a configuração da programação semafórica (*Signal Control*) no *Vissim*.

Figura 34: Cenário 4: programação semafórica

Basic ...									
SG Number	1	2	3	4	9	10	11	12	⊕
SG Name	A2-A4	A1-A3	A4-A1	A3-A2	PED A1-A3	PED A3-A2	PED A2-A4	PED A4-A1	
Min Green	22	18	15	15	20	20	20	20	
Max Green 1	60	55	55	50	20	20	20	20	
Amber	3	3	3	3	0	0	0	0	
Red Clearance	2	2	2	2	0	0	0	0	
Walk	7	7	7	7					
Flashing Dont Walk	13	13	13	13					
Start Up	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Min Recall	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	
Max Recall	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Advanced ...									
Signal Group	1	2	3	4	9	10	11	12	⊕
Max Green 2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Max Green 3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sequence ...									

Fonte: Vissim (Versão 2026).

As nomenclaturas fazem referências, respectivamente, aos seguintes movimentos:

- A2-A4: Movimento saindo do Sul da Avenida Feira de Santana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Transbasiiana (S4);

- A1-A3: Movimento saindo do Norte da Avenida Feira de Santana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Transbasiiana (S3);
- A4-A1: Movimento saindo do lado Leste da Avenida Transbasiiana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Feira de Santana (S1);
- A3-A2: Movimento saindo do lado Oeste da Avenida Transbasiiana seguindo reto ou fazendo conversão à direita na Avenida Feira de Santana (S2);
- Os movimentos de pedestres seguem a mesma lógica, porém exclusivamente para pedestres.

Cada grupo veicular possui um mínimo de verde suficiente para liberar um pelotão (15–22 s) e um máximo que impede que uma aproximação “sequestre” o ciclo (55–60 s). Dentro desses limites, o controlador atuado prolonga o verde apenas se os detectores instalados nas aproximações indicarem presença de fila. O verde é interrompido quando não há mais demanda. Isso reduz os tempos perdidos de verde e otimiza a alocação do tempo de ciclo, direcionando a capacidade disponível para as aproximações que efetivamente demandam passagem.

Os pedestres foram incorporados ao modelo como fases associadas às aproximações, com cerca de 20 s de verde e chamadas automáticas, de forma a garantir um nível básico de acessibilidade sem comprometer demais a capacidade veicular destinada aos movimentos críticos. Em um semáforo atuado, “chamadas automáticas” significam que a fase de pedestres é inserida em todos os ciclos mesmo sem haver um pedido explícito por botoeira, como se o detector estivesse sempre ocupado. Isso garante um tempo mínimo de verde para travessia em cada ciclo, assegurando acessibilidade básica, mas sem depender do acionamento manual do usuário, o que é útil em vias com fluxo constante de pedestres ou onde se deseja evitar que esquecimentos ou falhas na botoeira eliminem a fase de pedestres.

Assim, o cenário 3 persegue dois objetivos simultâneos: melhorar o desempenho global frente às rotatórias saturadas e ao semáforo fixo, e mostrar que, mesmo com atuação, certas aproximações podem continuar limitadas pela própria capacidade geométrica da via.

Tal como nos demais cenários, a geometria da interseção, os fluxos de demanda e a composição de frota foram mantidos constantes, de modo que as diferenças de desempenho estejam associadas exclusivamente à estratégia de controle. Esse cenário permite testar a hipótese de que um controle atuado pode reduzir o atraso médio dos veículos quando comparado aos atrasos encontrados nos demais cenários investigados, especialmente em comparação com o semáforo de tempo fixo (Cenário 2) e o modelo existente (Cenário 1).

Adicionalmente, a análise pode considerar aspectos de robustez operacional, como a resposta do sistema a flutuações de demanda e a eventuais desequilíbrios entre as aproximações. Os detectores foram posicionados nas extremidades das aproximações e faixas de pedestres (no caso do semáforo exclusivo de pedestres).

RESULTADOS E ANÁLISES

Os indicadores de desempenho analisados foram selecionados com base em referências da literatura técnica, como Rahman *et al.* (2018), e extraídos das ferramentas de avaliação do software Vissim. As métricas adotadas incluem: atraso médio por veículo, comprimento de fila, taxa de saturação das aproximações, tempos de espera de pedestres e emissões de poluentes.

Cada um desses resultados vem de como o Vissim acompanha, a cada passo de tempo, a posição e o estado de todos os veículos na rede. Para o parâmetro de Extensão Média de Fila ($QLEN$), o Vissim identifica, em cada instante, os veículos que estão “em fila”, isto é, abaixo de uma certa velocidade e próximos uns dos outros em um trecho de aproximação. Somando o comprimento ocupado por esses veículos ao longo da aproximação para obter a extensão da fila naquele instante. A extensão média da fila é a média desses valores ao longo de todo o intervalo de análise.

O parâmetro de veículos observados ($VEHS(ALL)$) significa que toda vez que um veículo entra na área de contagem (por exemplo, um detector, um link ou um movimento da interseção) o modelo registra esse evento. No fim do intervalo, o número total de veículos é simplesmente a contagem de quantos veículos passaram pelo ponto ou trecho observado. O mesmo raciocínio aplica-se para o total de pessoas observadas ($PERS(ALL)$), o Vissim associa um número de ocupantes a cada veículo (por tipo de veículo ou por distribuição). Ao contabilizar o fluxo de veículos, multiplica-se o número

de veículos pelo respectivo número de ocupantes e soma tudo. O resultado é o total de pessoas que passaram pelo ponto ou trecho no intervalo.

No caso do atraso médio (*VEHDELAY(ALL)*), para cada veículo, o Vissim calcula quanto tempo ele levou para percorrer um trecho ou atravessar a interseção e quanto tempo levaria se estivesse em escoamento livre (sem interferência de tráfego). A diferença entre esses dois tempos é o atraso desse veículo. O atraso médio por veículo é a média dessas diferenças para todos os veículos observados no intervalo.

Para a métrica de nível de serviço (*LOS*), primeiro o Vissim calcula o atraso médio por veículo em cada movimento ou aproximação. Depois compara esse atraso com os intervalos de atraso definidos em manuais (por exemplo, HCM) que classificam NS A, B, C, D, E e F. Assim, se o atraso médio cai em uma faixa específica, o software atribui o nível de serviço correspondente.

Para os resultados de frequência de paradas (*STOPS(ALL)*) o modelo observa, para cada veículo, quanto tempo ele passou parado ou quase parado (velocidade abaixo de um limiar bem baixo). Esse “tempo parado” é acumulado ao longo da trajetória no trecho de interesse. No final, a soma do tempo parado de todos os veículos é dividida pelo número de veículos, resultando no tempo de parada médio (às vezes expresso em s/veículo ou em número médio de paradas).

No quesito de indicadores ambientais, para a emissão de Carbono (*EMISSIONS CO*) o Vissim registra perfis de velocidade e aceleração de cada veículo ao longo do tempo. Com base nesses perfis e em fatores de emissão associados ao tipo de veículo, calcula a quantidade de CO emitida em cada pequeno intervalo de tempo. Somando as emissões de todos os veículos e de todos os instantes dentro do intervalo de análise obtém-se o total de CO. No caso das emissões de óxidos de nitrogênio (*EMISSIONS NOX*) o princípio é o mesmo do CO: a partir da velocidade e aceleração ao longo da viagem e de fatores de emissão específicos para NOx, o software estima quanto é emitido em cada passo de tempo por cada veículo. Essas quantidades são acumuladas no intervalo para produzir o total de NOx. O mesmo raciocínio aplica-se para as emissões de compostos orgânicos voláteis (*EMISSIONS VOC*).

O consumo de combustível (*FUEL CONSUMPTION*) é estimado com base nos mesmos perfis de velocidade e aceleração, usando modelos que relacionam esforço do motor, tipo de veículo e consumo instantâneo. Em cada passo de simulação o software calcula quanto combustível foi consumido por cada veículo, e depois soma tudo ao longo do trecho e do intervalo analisado.

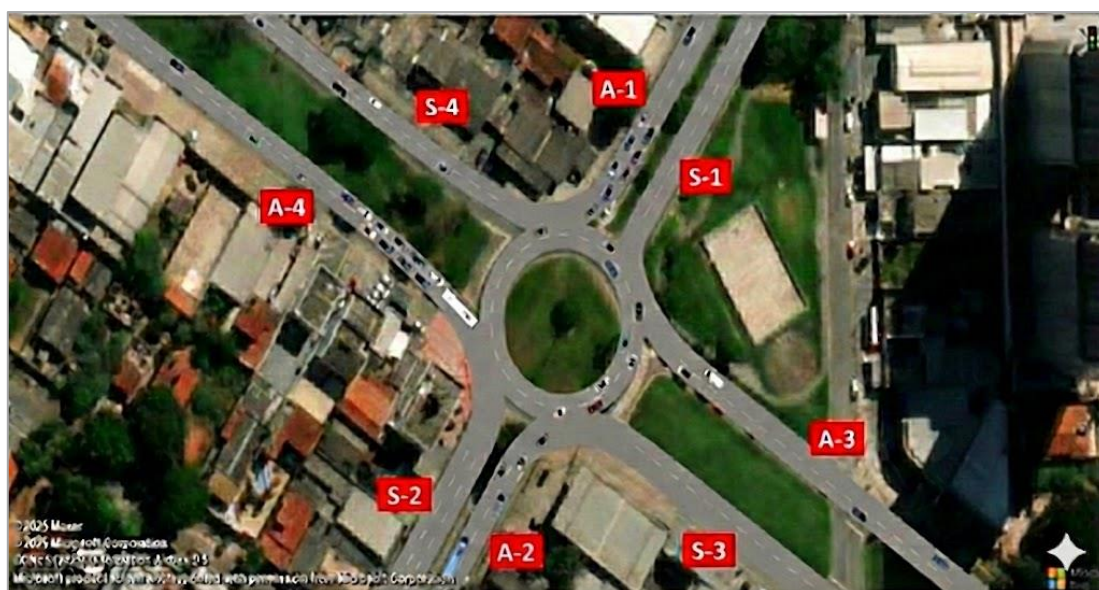
A comparação entre cenários permitiu identificar reduções significativas nos tempos de espera e aumento da fluidez geral.

A partir da modelagem dos cenários, foram obtidos os seguintes resultados:

- CENÁRIO 1: Situação atual

Os resultados da simulação do Cenário 1, que representa a condição real da rotatória em operação, (Figura 35) mostram que a situação atual do entroncamento opera com filas médias bastante extensas em todos os períodos analisados, evidenciando elevado nível de saturação da rotatória e de seus acessos principais. Mesmo com variações entre picos da manhã, tarde e noite, a configuração atual leva a níveis de serviço predominantemente classificados como F (o software calcula os resultados de níveis de serviço baseados no modelo HCM), indicando condições de operação insatisfatórias e tempos de viagem significativamente superior ao escoamento livre.

Figura 35: Cenário 1: Rotatória existente



Fonte: Vissim (Versão 2026).

Os resultados obtidos na modelagem da situação atual da área de estudo se encontram a seguir nas Tabelas 9 a 11, representando respectivamente o pico da manhã, tarde e noite.

Tabela 9: Cenário 1: Pico manhã

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A4 - ROTATÓRIA	317,83	732,00	732,00	NS F	109,30	109,30	8,80	4353,42	847,02	1008,95	62,28
A4 - S2	317,83	60,00	60,00	NS F	108,88	108,88	9,42	372,68	72,51	86,37	5,33
A4	105,98	1028,00	1028,00	NS F	84,30	84,30	6,83	4745,00	923,20	1099,70	67,88
A1 - S4	417,45	120,00	120,00	NS F	272,80	272,80	16,19	1400,04	272,40	324,47	20,03
A1 - ROTATÓRIA	417,45	232,00	232,00	NS F	288,99	288,99	17,74	2937,80	571,59	680,86	42,03
A1	210,83	911,00	911,00	NS F	110,11	110,11	6,68	4387,60	853,67	1016,87	62,77
A2 - S3	264,77	44,00	44,00	NS F	115,29	115,29	8,45	251,24	48,88	58,23	3,59
A2 - ROTATÓRIA	264,77	669,00	669,00	NS F	123,25	123,25	8,38	3951,65	768,85	915,83	56,53
A2	132,50	1455,00	1455,00	NS F	60,49	60,49	4,12	4271,17	831,01	989,89	61,10
A3 - S1	446,83	3,00	3,00	NS F	1060,51	1060,51	27,33	85,53	16,64	19,82	1,22
A3 - ROTATÓRIA	446,83	43,00	43,00	NS F	1010,06	1010,06	24,09	1117,67	217,46	259,03	15,99
A3	225,27	1410,00	1410,00	NS D	34,05	34,05	0,83	1327,31	258,25	307,62	18,99
Cenário 1	297,36	558,92	558,92	LOS F	281,50	281,50	2071,37	2433,43	473,46	563,97	34,81

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Tabela 10 - Cenário 1: Pico tarde

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A4 - ROTATÓRIA	329,68	746,00	746,00	NS F	108,01	108,01	8,18	4209,53	819,02	975,60	60,22
A4 - S2	329,68	61,00	61,00	NS F	104,00	104,00	8,52	348,54	67,81	80,78	4,99
A4	109,93	1054,00	1054,00	NS F	82,62	82,62	6,30	4580,67	891,23	1061,61	65,53
A1 - S4	417,12	118,00	118,00	NS F	264,46	264,46	15,69	1335,17	259,78	309,44	19,10
A1 - ROTATÓRIA	417,12	236,00	236,00	NS F	285,93	285,93	18,00	3010,55	585,74	697,72	43,07
A1	209,02	930,00	930,00	NS F	106,63	106,63	6,58	4389,27	853,99	1017,25	62,79
A2 - S3	264,53	45,00	45,00	NS F	116,51	116,51	7,93	246,74	48,01	57,18	3,53
A2 - ROTATÓRIA	264,53	674,00	674,00	NS F	121,58	121,58	8,72	4071,39	792,14	943,58	58,25
A2	132,31	1474,00	1474,00	NS F	59,41	59,41	4,23	4385,58	853,27	1016,40	62,74
A3 - S1	484,98	5,00	5,00	NS F	953,29	953,29	23,00	122,63	23,86	28,42	1,75
A3 - ROTATÓRIA	484,98	53,00	53,00	NS F	1013,16	1013,16	23,74	1366,02	265,78	316,59	19,54
A3	243,46	1439,00	1439,00	NS E	41,56	41,56	0,99	1615,21	314,26	374,34	23,11
Cenário 1	307,28	569,58	569,58	LOS F	271,43	271,43	10,99	2473,44	481,24	573,24	35,39

Fonte: Elaborado pelos Autores.

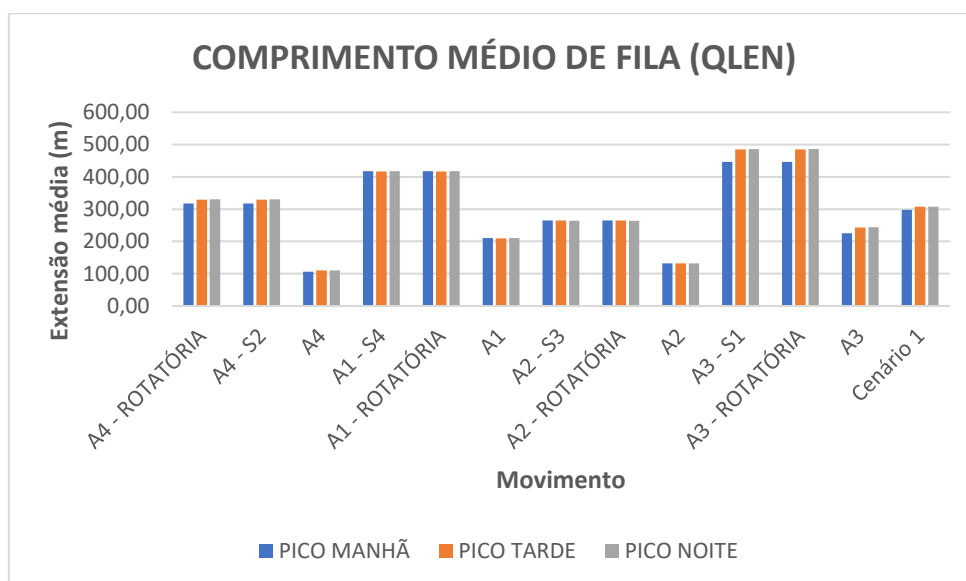
Tabela 11 - Cenário 1: Pico noite

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A4 - ROTATÓRIA	330,65	724,00	724,00	NS F	112,24	112,24	8,50	4235,63	824,10	981,65	60,60
A4 - S2	330,65	60,00	60,00	NS F	109,79	109,79	9,03	363,77	70,78	84,31	5,20
A4	110,23	1035,00	1035,00	NS F	84,97	84,97	6,48	4617,99	898,49	1070,26	66,07
A1 - S4	417,38	124,00	124,00	NS F	268,75	268,75	16,51	1452,36	282,58	336,60	20,78
A1 - ROTATÓRIA	417,38	240,00	240,00	NS F	281,44	281,44	17,64	3008,27	585,30	697,20	43,04
A1	210,04	949,00	949,00	NS F	106,83	106,83	6,64	4509,39	877,36	1045,10	64,51
A2 - S3	263,62	45,00	45,00	NS F	104,02	104,02	7,67	233,83	45,49	54,19	3,35
A2 - ROTATÓRIA	263,62	703,00	703,00	NS F	116,34	116,34	8,70	4187,93	814,82	970,59	59,91
A2	131,81	1479,00	1479,00	NS F	58,69	58,69	4,37	4484,23	872,47	1039,26	64,15
A3 - S1	485,98	5,00	5,00	NS F	927,35	927,35	23,60	122,18	23,77	28,32	1,75
A3 - ROTATÓRIA	485,98	46,00	46,00	NS F	1005,51	1005,51	23,50	1175,22	228,65	272,37	16,81
A3	243,98	1439,00	1439,00	NS E	36,31	36,31	0,86	1423,57	276,98	329,93	20,37
Cenário 1	307,61	570,75	570,75	LOS F	267,69	267,69	11,13	2484,53	483,40	575,81	35,54

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Do ponto de vista da extensão média de fila ($QLEN$), na Figura 36, observou-se comprimentos superiores a 300 m no movimento saindo de A4 para entrar na rotatória (A4-S1) em todos os picos, o que significa que grande parte da via permanece ocupada por veículos em espera durante os períodos de análise. A mesma tendência ocorre na aproximação A1, com filas médias próximas ou superiores a 400 m, reforçando a presença de gargalos estruturais na circulação interna da rotatória e nos acessos mais carregados.

Figura 36: Extensão média de fila – Cenário 1



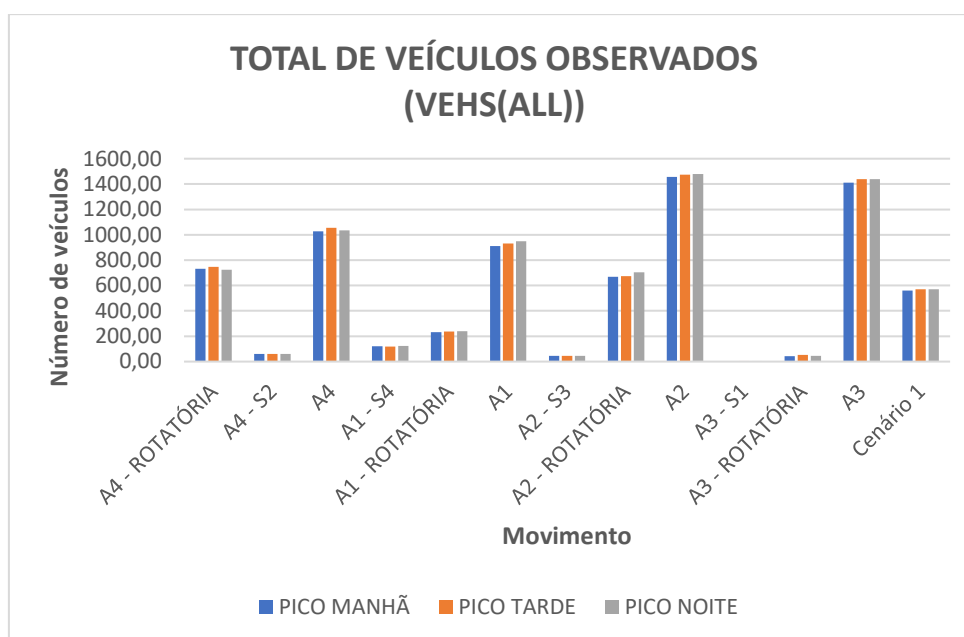
Fonte: Elaborado pelos Autores.

Os movimentos fazem referência a respectivamente:

- A4 – Rotatória: Conversão à direita saindo de A4 para S1;
- A4 – S2: Conversão à direita saindo de A4 para S2;
- A4: Seguindo reto saindo de A4 para S3;
- A1 – S4: Conversão à direita saindo de A1 para S4;
- A1 – Rotatória: Conversão à esquerda saindo de A1 para S3;
- A1: Seguindo reto saindo de A1 para S2;
- A2 – S3: Conversão à direita saindo de A2 para S3;
- A2 – Rotatória: Conversão à esquerda saindo de A2 para S4;
- A2: Seguindo reto de A2 para S1;
- A3 – S1: Conversão à direita saindo de A3 para S1;
- A3 – Rotatória: Conversão à esquerda saindo de A3 para S2.

Em relação ao número total de veículos ($VEHS(ALL)$), o cenário atual apresenta volumes elevados em praticamente todos os movimentos principais, com destaque para as aproximações A2 e A3, que superam 1400 veículos nos diferentes períodos de pico, conforme mostra a Figura 37. Essa alta demanda combinada com a capacidade limitada da interseção explica os elevados atrasos observados, uma vez que o sistema opera próximo ou além de sua capacidade de escoamento durante grande parte do tempo.

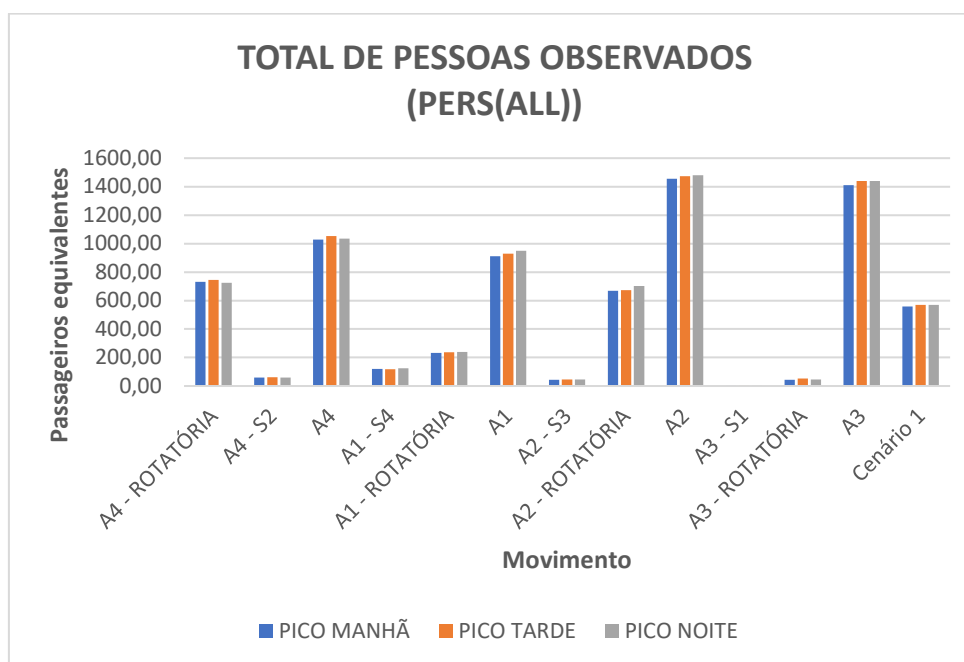
Figura 37: Número de veículos processados - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

O total de pessoas transportadas ($PERS(ALL)$) acompanha diretamente o volume de veículos, atingindo valores acima de 1400 passageiros nas aproximações mais carregadas, o que indica que o impacto operacional não se limita aos condutores, mas afeta um contingente expressivo de usuários do sistema viário. Devido a escolha de não incluir transporte público coletivo na simulação e de adotar 1 pessoa equivalente por veículo, os resultados de veículos e pessoas observadas serão sempre semelhantes. Esse resultado é particularmente relevante para futuras propostas de priorização do transporte coletivo, já que atrasos excessivos nessas aproximações comprometem a mobilidade e tempo de viagem.

Figura 38: Número total de pessoas - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Quanto ao nível de serviço (*LOS*), pela Tabela 12 observa-se que a maior parte dos movimentos apresenta classe F nos três períodos, com poucas situações alcançando classe D ou E, como observado na abordagem agregada A3 em alguns picos. Isso demonstra que, mesmo nos melhores casos, a operação está distante de um desempenho aceitável, com longos tempos de espera e significativa variabilidade nas condições de circulação.

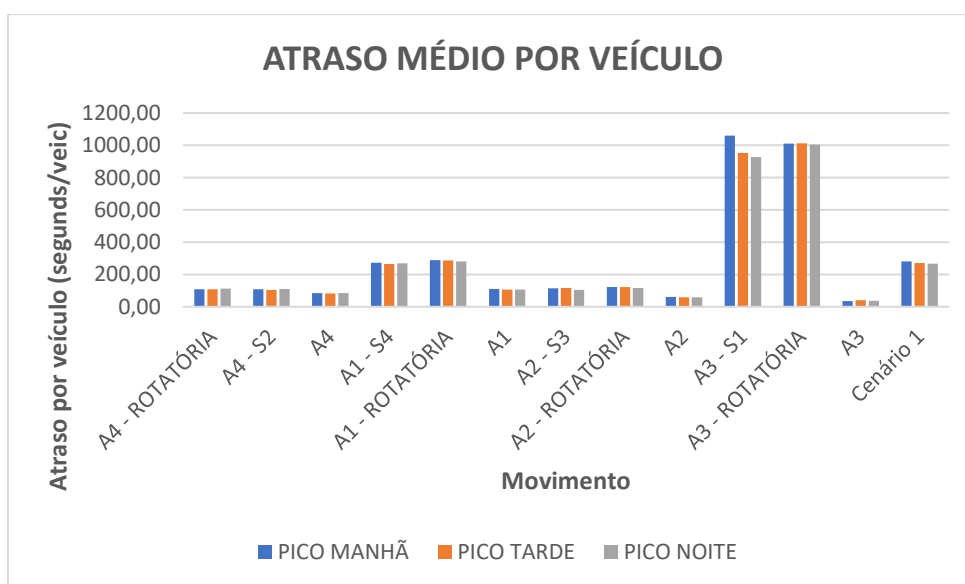
Tabela 12 - Nível de Serviço (Picos da manhã, tarde e noite) - Cenário 1

MOVIMENTO	PICO MANHÃ	PICO TARDE	PICO NOITE
A4 - ROTATÓRIA	NS F	NS F	NS F
A4 - S2	NS F	NS F	NS F
A4	NS F	NS F	NS F
A1 - S4	NS F	NS F	NS F
A1 - ROTATÓRIA	NS F	NS F	NS F
A1	NS F	NS F	NS F
A2 - S3	NS F	NS F	NS F
A2 - ROTATÓRIA	NS F	NS F	NS F
A2	NS F	NS F	NS F
A3 - S1	NS F	NS F	NS F
A3 - ROTATÓRIA	NS F	NS F	NS F
A3	NS D	NS E	NS E

Fonte: Elaborado pelos Autores.

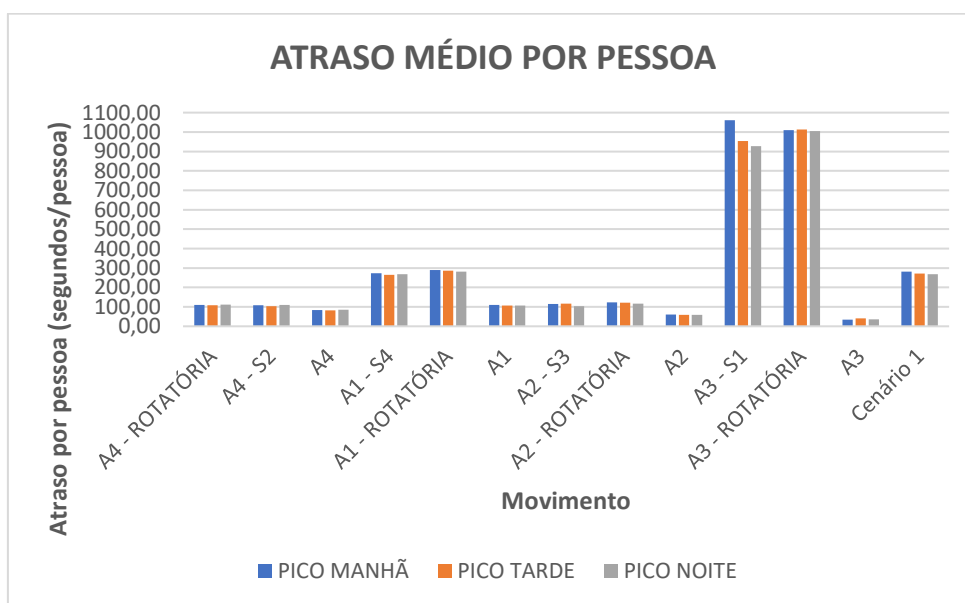
Os indicadores de atraso médio por veículo ($VEHDELAY(ALL)$) e por pessoa ($PERSDELAY(ALL)$). As figuras 39 e 40, reforçam esse quadro crítico, com valores acima de 100 s/veículo em diversos movimentos e ultrapassando 250 s/veículo nas aproximações mais carregadas, como conversões a direita saindo de A1 e nos fluxos retos na rotatória. Esses atrasos refletem tempos de viagem superiores aos obtidos em condições de escoamento livre, indicando uma redução expressiva na eficiência operacional do entroncamento.

Figura 39: Atraso médio por veículo - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

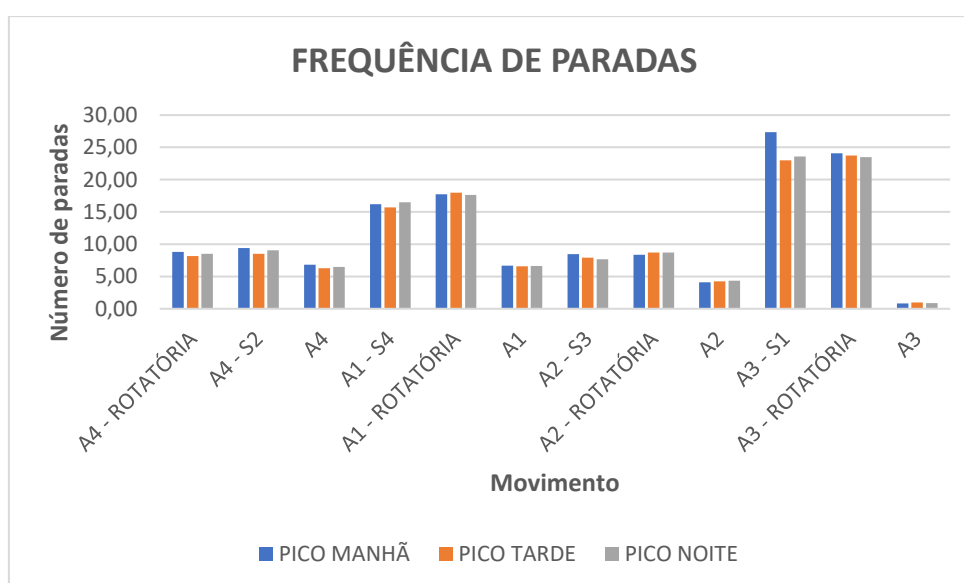
Figura 40: Atraso médio por pessoa - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

A análise do tempo de parada (*STOPS(ALL)*), analisa quantas vezes em média cada veículo precisou parar completamente ao longo do percurso analisado, evidenciando que parte significativa desse atraso é composta por períodos em que os veículos permanecem completamente parados ou deslocando-se a baixas velocidades, com valores superiores a 15 s/veículo. Esse padrão indica ocorrência recorrente de formação e dissipação de filas, além de ciclos de aceleração e frenagem que agravam tanto o conforto dos usuários quanto o consumo de combustível.

Figura 41: Tempo de parada - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

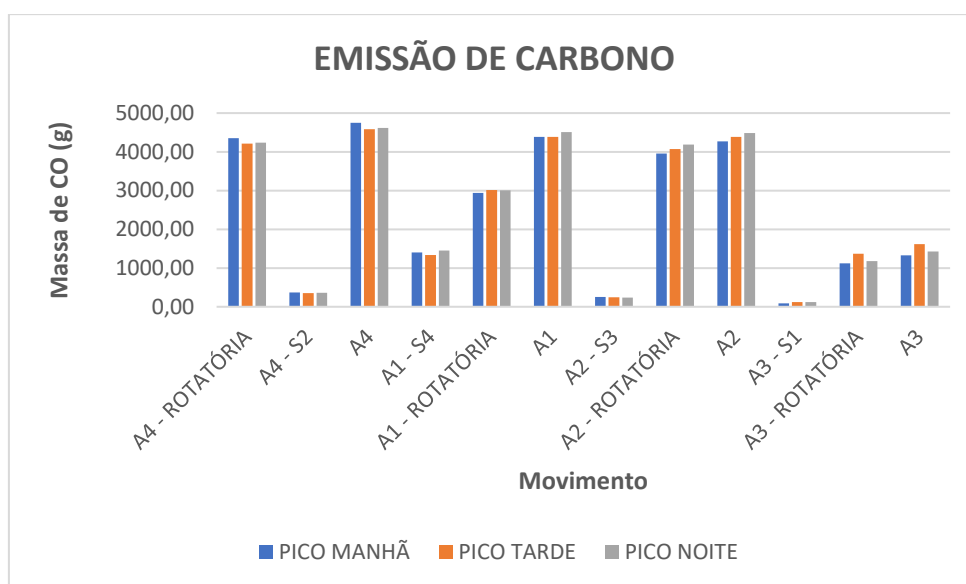
No que se refere às emissões de poluentes (*EMISSIONSCO*, *EMISSIONSNOX*, *EMISSIONSVOC*), as Figuras 42 a 44, respectivamente, os resultados revelam massas expressivas emitidas no período de análise, superando 4000 g de CO, como nos movimentos da aproximação A3. O acúmulo de veículos em regime de baixa velocidade e paradas frequentes contribui diretamente para esse aumento nas emissões, configurando um quadro ambientalmente desfavorável na situação atual.

As emissões de CO no cenário 1 revelam um padrão consistente de poluição ao longo dos três períodos de pico, com variações moderadas que refletem flutuações na demanda de tráfego. No pico matinal, as aproximações principais (A4, A1 e A2) foram responsáveis pela maior parte das emissões: A4 totalizou 4.745,00 g, A1 registrou 4.387,60 g e A2 apresentou 4.271,17 g, somando aproximadamente 13,4 kg de CO em uma hora de operação.

Estes valores elevados decorrem dos atrasos prolongados (acima de 80 segundos) e das paradas repetidas (entre 4 e 28 paradas por veículo), características de operação em

LOS F. Nos picos de tarde e noite, observa-se redução ligeira em A4 (4.580,67 g e 4.617,99 g) e aumento em A2 (4.385,58 g e 4.484,23 g), sugerindo redistribuição do congestionamento entre as aproximações, embora a carga total permaneça em patamares críticos. A contribuição significativa da rotatória propriamente dita (em torno de 2.900 a 4.100 g por período) indica que o problema está não apenas nas aproximações, mas na capacidade insuficiente do anel, que não consegue escoar adequadamente os fluxos de entrada, gerando recirculação de veículos e combustão.

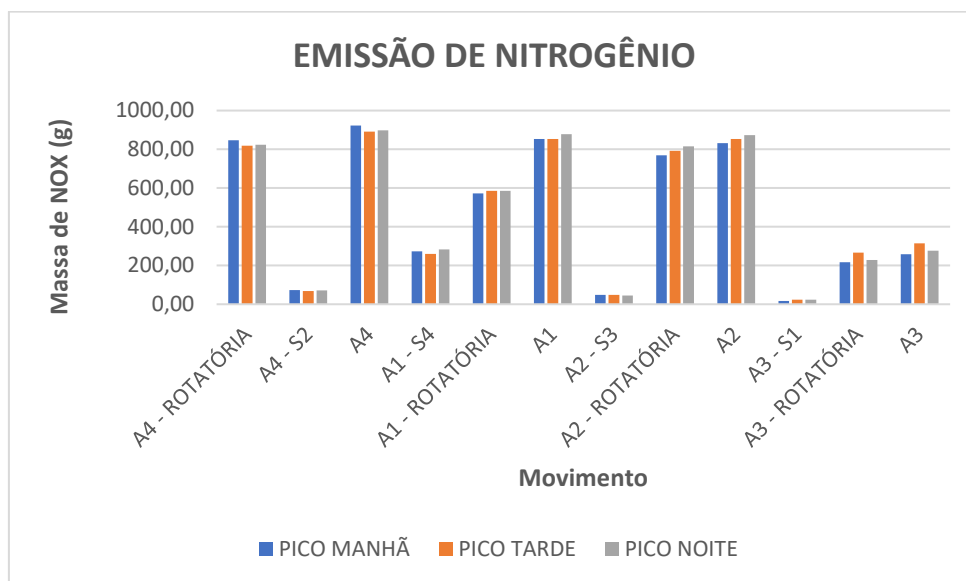
Figura 42: Emissão de CO - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

As emissões de NO_x no pico matinal nas aproximações principais somam cerca de 2,3 kg (A4: 923,20 g; A1: 853,67 g; A2: 831,01 g), com a rotatória contribuindo 4.353,42 g quando considerada globalmente. O padrão mantém-se relativamente estável na tarde (NO_x total $\approx$ 2,2 kg) e noite ($\approx$ 2,35 kg), indicando que o congestionamento da interseção produz uma emissão de NO_x praticamente invariável com o período. Dado que NO_x é precursor de ozônio troposférico e contribui para patologias respiratórias, particularmente em população vulnerável (idosos e crianças), os valores observados (acima de 800 g por aproximação em padrão diário) constituem um problema ambiental e de saúde pública.

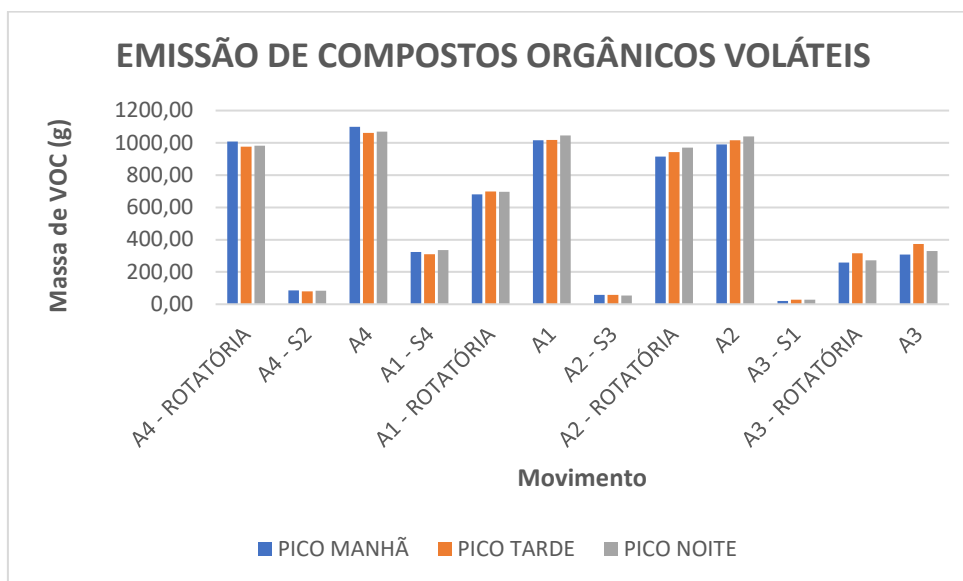
Figura 43: Emissão de NOX - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Os VOC (hidrocarbonetos não queimados) apresentam emissões intermediárias entre CO e NOx, variando de aproximadamente 1.000 a 1.100 g nas aproximações principais durante o pico matinal (A4: 1.099,70 g; A1: 1.016,87 g; A2: 989,89 g). Os VOC são particularmente relevantes por participarem de reações fotoquímicas em atmosfera urbana, gerando ozônio e outros oxidantes secundários com efeitos negativos à saúde respiratória. A persistência de emissões elevadas de VOC em todos os três períodos, combinada com a falta de fluidez do tráfego, sugere que os condutores permanecem em modo *stop-and-go* com aceleração-desaceleração frequentes, condição que maximiza a evaporação de combustível e a combustão incompleta característica deste poluente.

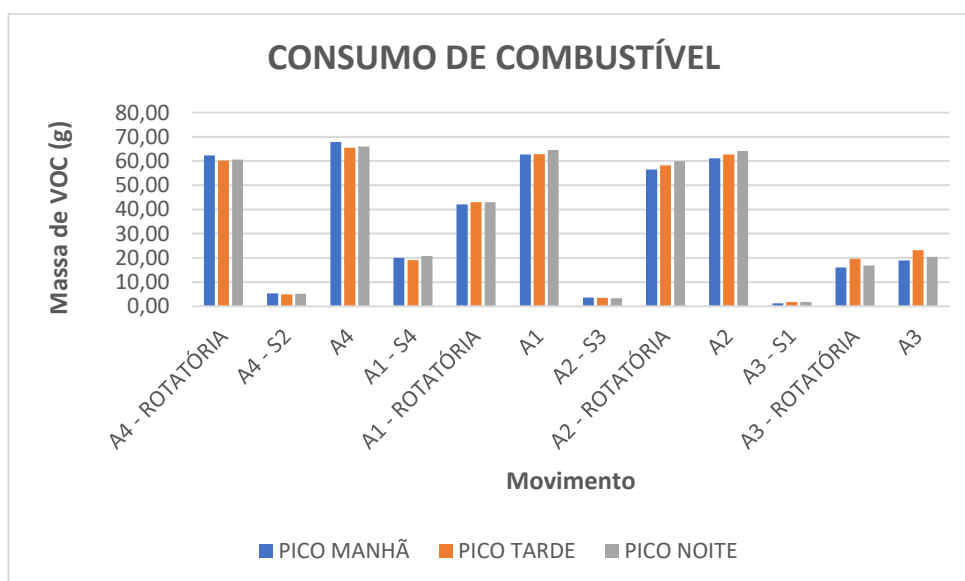
Figura 44: Emissão de VOC - Cenário 1



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Por fim, o consumo de combustível (*FUELCONSUMPTION*) acompanha a tendência dos atrasos e emissões, com volumes elevados nas abordagens com maior demanda, como A4, A1 e A2, que ultrapassam 60 unidades de consumo no período modelado. Esses valores indicam uma operação pouco eficiente do ponto de vista energético, na qual o excesso de tempo em fila e as acelerações repetidas resultam em maior gasto de combustível por viagem e, conseqüentemente, maior custo operacional para os usuários.

Figura 45: Consumo de combustível – Cenário 1

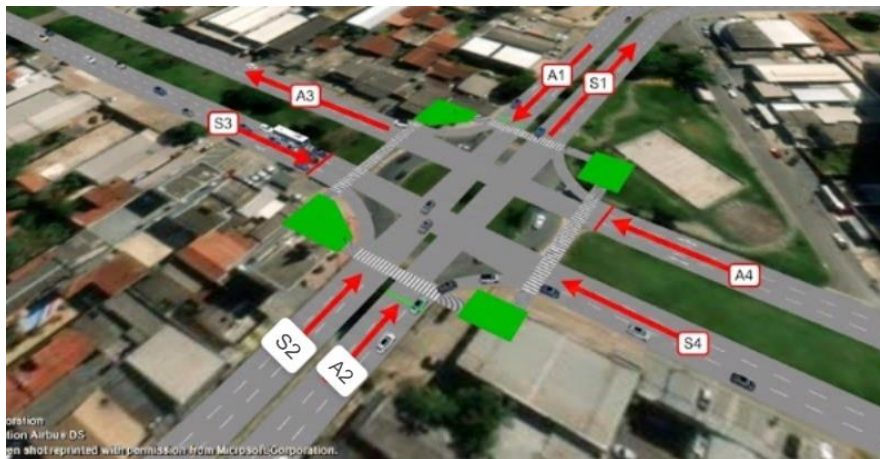


Fonte: Elaborado pelos Autores.

- CENÁRIO 2: Semáforo tempo fixo

O Cenário 2 tratou-se do ajuste geométrico - todas as aproximações com 3 faixas, sendo uma delas exclusiva para conversão a direita – aliado a eliminação da rotatória para modelagem de controle de tráfego semaforizado, conforme mostra a Figura 46.

Figura 46: Semáforo tempo fixo



Fonte: Vissim (Versão 2026).

Os resultados do Cenário 2 por pico se encontram a seguir nas Tabelas de 13 a 15.

Tabela 13 - Cenário 2: Pico manhã

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	271,24	514,00	514,00	NS F	180,85	180,85	5,85	561,40	668,72	271,24	41,28
A3 - A2	7,44	58,00	58,00	NS B	16,18	16,18	8,01	9,05	10,79	7,44	0,67
A4 - A1	22,96	115,00	115,00	NS B	18,36	18,36	0,51	18,77	22,36	22,96	1,38
A1 - A3	26,34	382,00	382,00	NS C	24,85	24,85	0,69	79,26	94,41	26,34	5,83
Cenário 2	82,00	3114,00	3114,00	NS E	58,78	58,78	1,84	1261,79	1503,02	82,00	92,78

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Tabela 14 - Cenário 2: Pico tarde

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	270,9	545,0	545,0	NS F	159,8	159,8	4,7	2610,6	507,9	605,0	37,3
A3 - A2	18,5	150,0	150,0	NS B	18,2	18,2	0,5	129,1	25,1	29,9	1,8
A4 - A1	27,2	129,0	129,0	NS C	24,0	24,0	0,6	124,0	24,1	28,7	1,8
A1 - A3	49,4	508,0	508,0	NS C	33,3	33,3	0,9	640,4	124,6	148,4	9,2
Cenário 2	91,5	4041,0	4041,0	NS D	52,8	52,8	1,5	7485,3	1456,4	1734,8	107,1

Fonte: Elaborado pelos Autores.

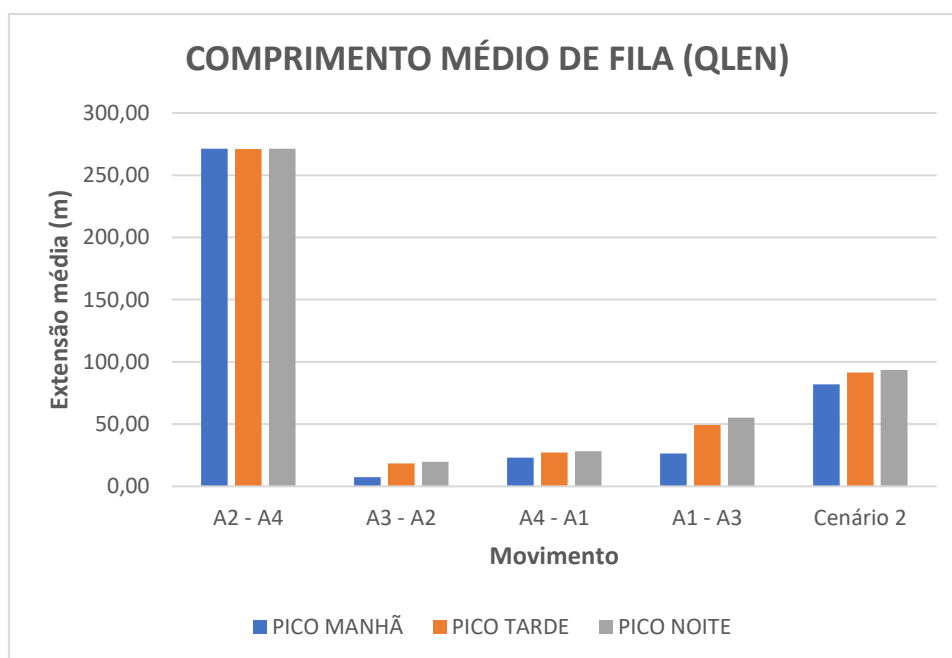
Tabela 15 - Cenário 2: Pico noite

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	271,15	535,00	535,00	NS F	168,47	168,47	5,28	2764,00	537,77	640,58	39,54
A3 - A2	19,77	162,00	162,00	NS B	18,53	18,53	0,50	140,20	27,28	32,49	2,01
A4 - A1	28,23	134,00	134,00	NS C	20,00	20,00	0,51	115,12	22,40	26,68	1,65
A1 - A3	55,23	512,00	512,00	NS C	32,47	32,47	0,86	642,03	124,92	148,796006	9,18
Cenário 2	93,60	4166,00	4166,00	NS D	52,64	52,64	1,56	7780,41	1513,78	1803,1841	111,31

Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Cenário 2, a extensão média das filas foi menor do que no Cenário 1. Enquanto a rotatória original apresentava filas médias próximas de 300 m nos três horários de pico, a solução semaforizada (Cenário 2) trabalhou com filas em torno de 80 a 90 m. Isso mostrou que a introdução do controle semafórico distribuiu melhor os tempos de espera entre os movimentos e evitou o acúmulo contínuo de veículos característico da rotatória saturada, ainda que alguns ramos, como A2–A4, continuassem apresentando filas mais expressivas que os demais.

Figura 47: Extensão média de fila - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em termos de nível de serviço, o contraste foi mais expressivo. No Cenário 1, o NS global foi classificado como F nos três picos, refletindo saturação e atrasos muito elevados em praticamente todos os movimentos. No Cenário 2, embora alguns ramos, especialmente A2–A4, ainda obtenham NS próximo de E–F, o resultado global passou para valores próximos de NS D, com vários movimentos operando em NS B ou C. Isso indicou que o controle semafórico transformou uma condição de colapso generalizado em uma situação ainda crítica, porém mais administrável e com desempenho aceitável para boa parte dos fluxos.

Tabela 16 - Nível de Serviço (manhã, tarde e noite) - Cenário 2

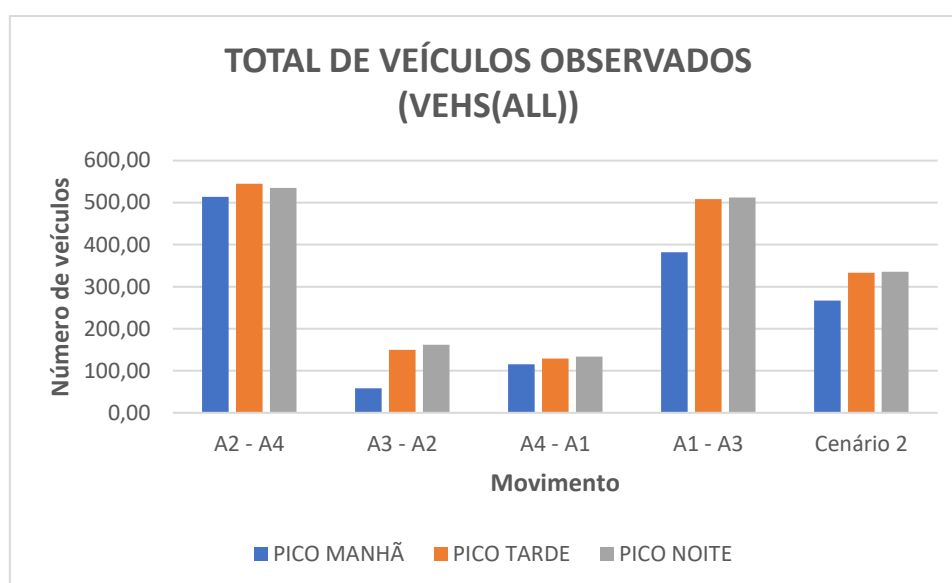
MOVIMENTO	PICO MANHÃ	PICO TARDE	PICO NOITE
A2 - A4	NS F	NS F	NS F
A3 - A2	NS B	NS B	NS B
A4 - A1	NS B	NS C	NS C
A1 - A3	NS C	NS C	NS C

Cenário 2	NS E	NS D	NS D
-----------	------	------	------

Fonte: Elaborado pelos Autores.

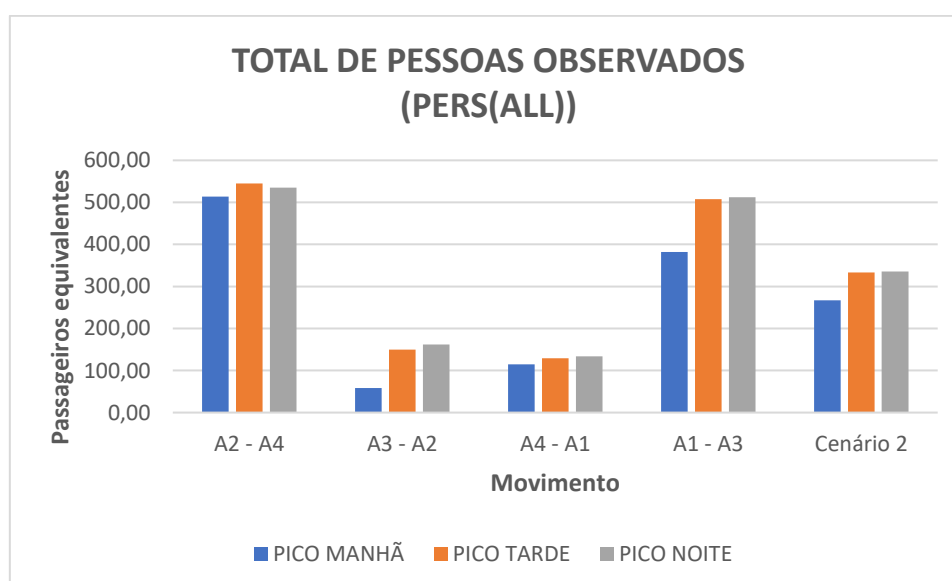
O número total de veículos e de pessoas transportadas permaneceu bastante semelhante entre os cenários 1 e 3, pois a demanda de entrada foi mantida. Isso foi importante metodologicamente porque garantiu que as diferenças observadas não decorreram de alteração de volume, mas sim da forma de controle adotada. Em outras palavras, o Cenário 2 atendeu praticamente o mesmo fluxo que o Cenário 1, porém com menos acúmulo de veículos nas aproximações e com uma organização mais “dosada” dos movimentos ao longo do ciclo semafórico.

Figura 48: Número total de veículos - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

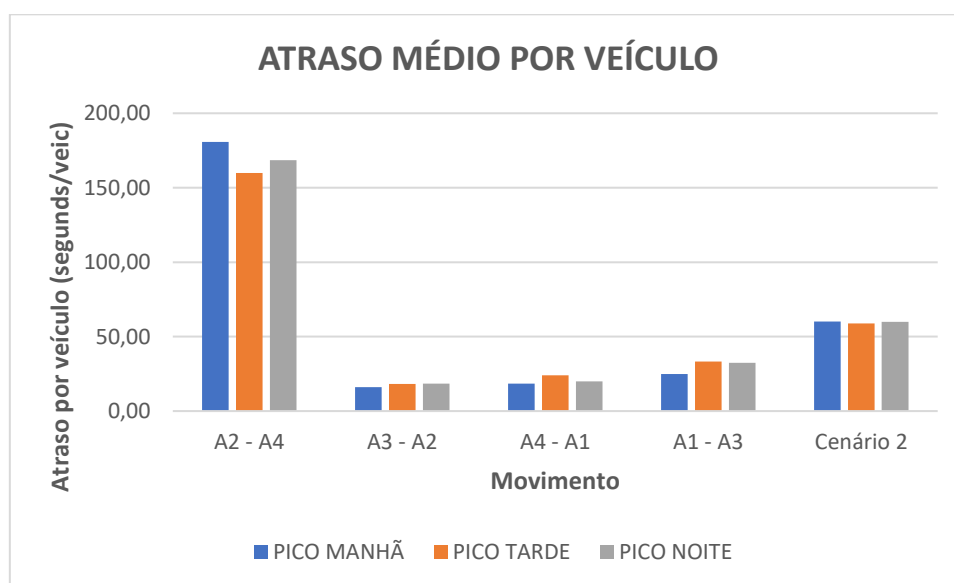
Figura 49: Número total de pessoas - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

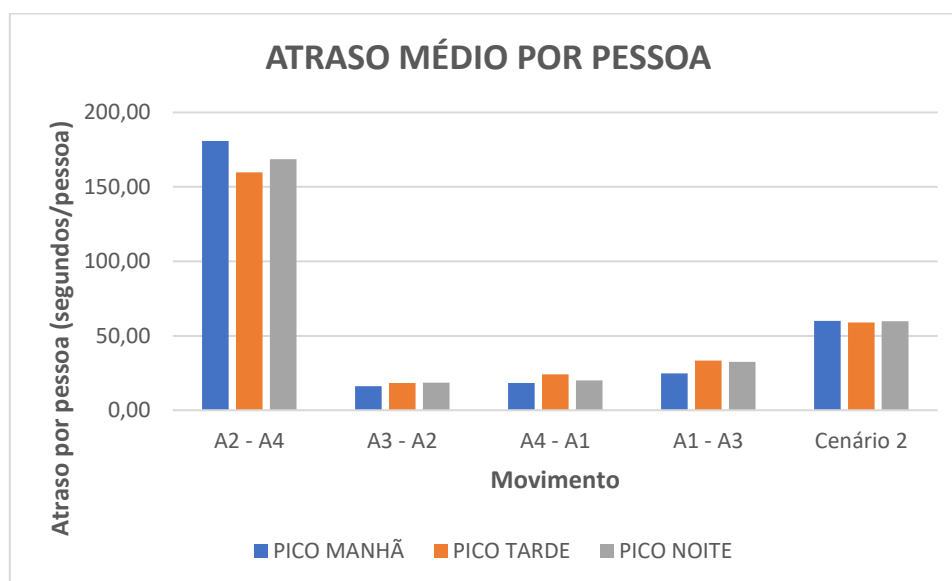
O atraso médio por veículo reforçou esse padrão de comportamento. No Cenário 1, o atraso médio global permaneceu na faixa de 270 a 280 s/veículo, praticamente estável nos três períodos, evidenciando uma operação cronicamente sobrecarregada. Já no Cenário 2, o atraso médio caiu para aproximadamente 60 s/veículo nos picos, com pequenas variações entre manhã, tarde e noite. Notando-se uma redução de ordem de grandeza no tempo adicional de viagem em relação ao Cenário 1, tornando os tempos de travessia muito mais compatíveis com o que se espera de uma interseção urbana principal. Como a ocupação por veículo foi semelhante, o atraso médio por pessoa seguiu o mesmo padrão de redução.

Figura 50: Atraso médio de veículos - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

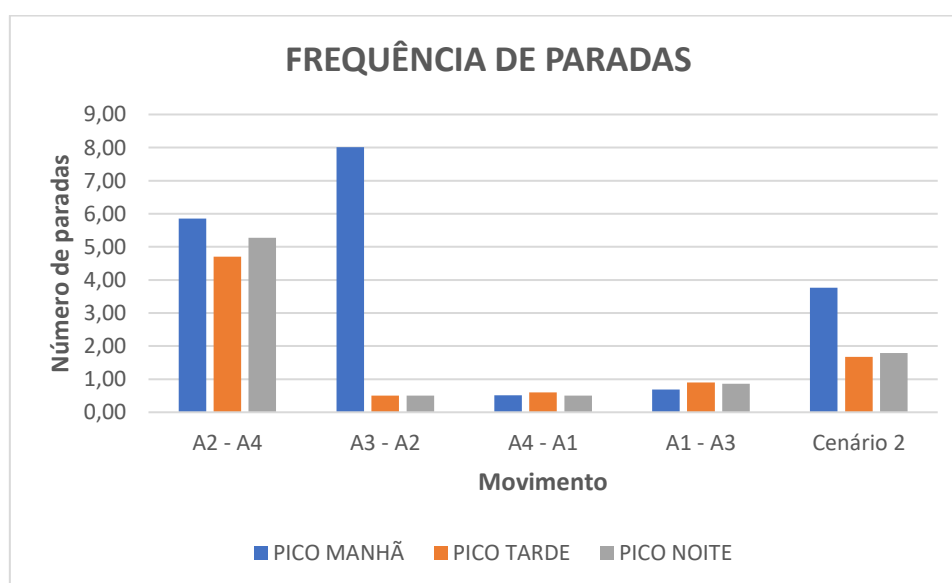
Figura 51: Atraso médio de pessoas



Fonte: Elaborado pelos Autores.

O tempo de parada médio também apresentou melhora expressiva. No Cenário 1, os veículos acumulavam em torno de 11 a 12 s/veículo parados ou em velocidade muito baixa, refletindo um padrão intenso de “anda-e-para” ao redor de toda a rotatória. No Cenário 2, esse valor caiu para cerca de 3 a 4 s/veículo, em média, nos três picos. Essa queda indicou que, com o semáforo, os usuários passaram a enfrentar paradas mais concentradas em pontos específicos (linhas de retenção), porém com menos interrupções sucessivas ao longo da aproximação, o que melhora a fluidez percebida e a previsibilidade dos tempos de viagem.

Figura 52: Tempo de parada - Cenário 2



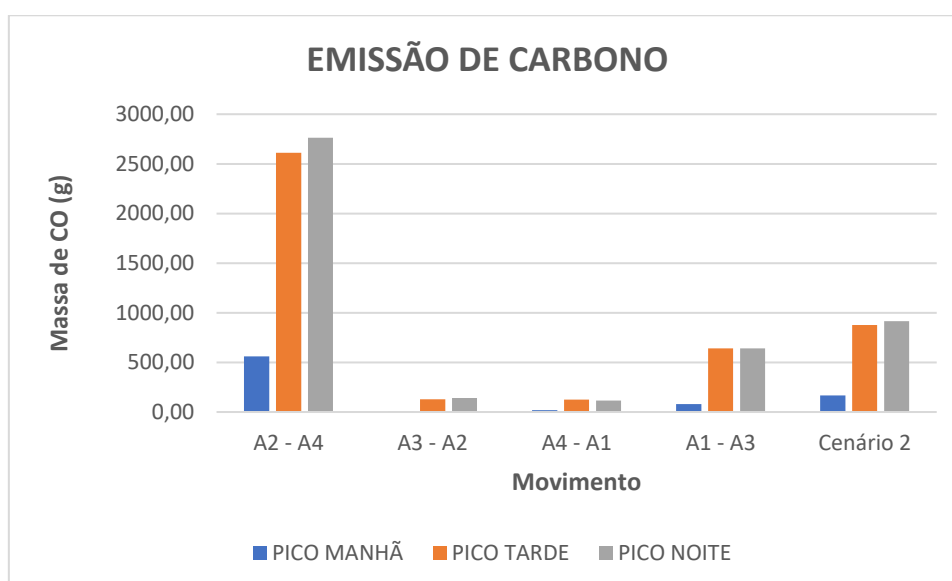
Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Cenário 2, a discrepância entre movimentos fica clara quando se observa a frequência de paradas. Enquanto vários movimentos operam com praticamente zero paradas por veículo, as aproximações A2–A4 chegam a frequências superiores a 8 paradas/veículo, indicando um padrão de “anda-e-para” intenso. Isso significa que, para esses movimentos, o condutor precisa interromper a trajetória repetidas vezes antes de concluir a travessia da interseção, o que evidencia um gargalo estrutural nessas aproximações mesmo com o layout turbo.

Esse contraste mostra que o bom desempenho observado em alguns ramos da rotatória não se estende a toda a interseção. A2 e A4 concentram conflitos e falta de capacidade suficiente para acomodar a demanda de entrada, gerando filas longas, elevado atraso individual e grande número de paradas. Do ponto de vista operacional, isso reduz a confiabilidade do sistema para usuários desses movimentos específicos; do ponto de vista ambiental, o padrão de múltiplas paradas também agrava emissões e consumo de combustível.

Do ponto de vista ambiental, as emissões de monóxido de carbono (CO) foram menores no Cenário 2 em comparação ao Cenário 1. Enquanto a rotatória existente apresentou valores agregados em torno de 2.400 a 2.500 unidades por pico, o cenário semaforizado trabalhou com emissões de CO na ordem de 170 a 900 unidades, dependendo do horário. Essa redução decorreu diretamente da combinação de menores atrasos, filas mais curtas e menor tempo em marcha-lenta, mostrando que o controle semaforico ofereceu um ganho significativo em termos de qualidade do ar local frente à rotatória saturada.

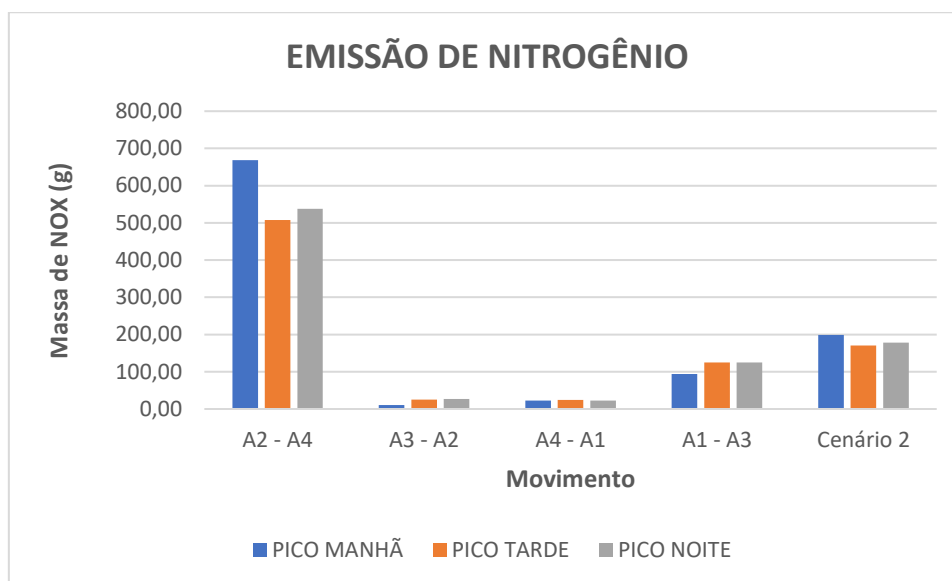
Figura 53: Emissão CO - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

As emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) seguiram a mesma tendência. No Cenário 1, os totais ficaram próximos de 470 a 480 unidades, enquanto no Cenário 2 os valores ficaram em torno de 170 a 200 unidades. Como o NOx está fortemente associado a regimes de aceleração sob carga, a redução indicou que o padrão de operação no Cenário 2 foi menos agressivo em termos de ciclos repetidos de aceleração e frenagem.

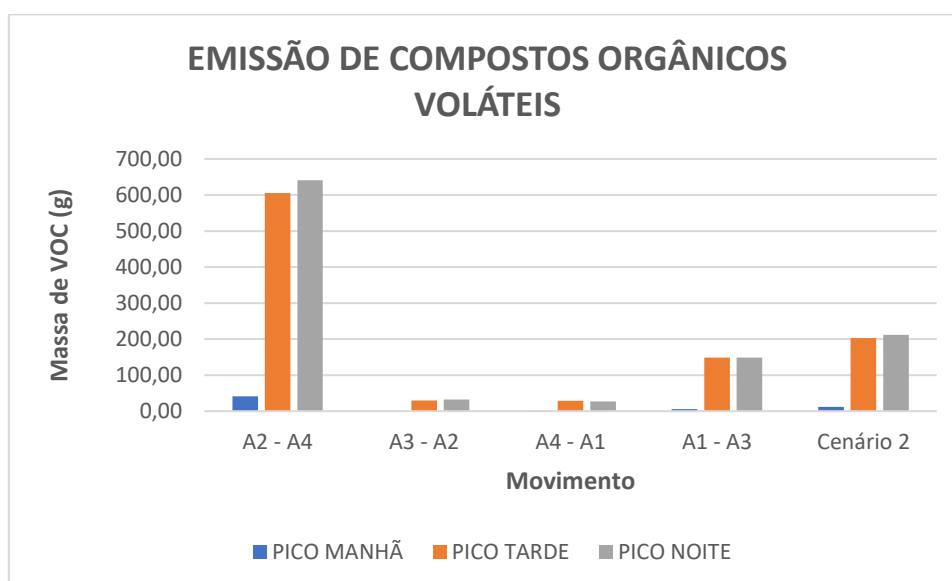
Figura 54: Emissão NOX - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Da mesma forma, as emissões de compostos orgânicos voláteis (COV/VOC) caíram de patamares na casa de 560 a 580 unidades no Cenário 1 para cerca de 12 a 210 unidades no Cenário 2, reforçando que a estratégia semafórica promoveu uma operação mais limpa sob o mesmo nível de demanda.

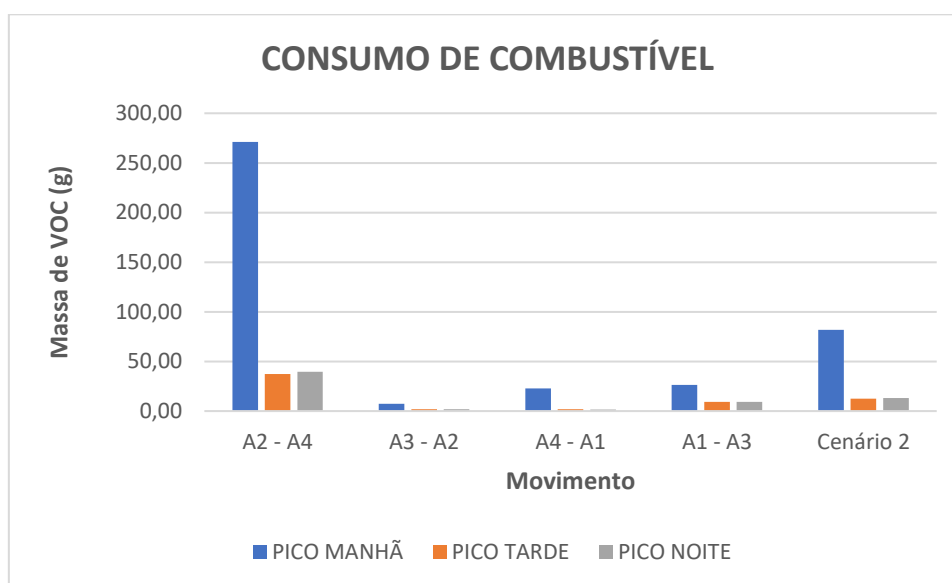
Figura 55: Emissão VOC - Cenário 2



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Por fim, o consumo de combustível no Cenário 2 foi claramente inferior ao observado no Cenário 1. Enquanto a rotatória original consumiu cerca de 35 unidades de combustível em cada período de pico, o cenário semaforizado trabalhou com valores entre aproximadamente 12 e 13 unidades. Essa redução esteve em linha com a queda de atraso, de tempo parado e de emissões. Assim, a comparação entre os cenários mostrou que, embora a demanda tenha permanecido elevada, a adoção do controle semafórico transformou uma interseção em colapso (NS F, altos atrasos e emissões) em uma situação de NS global próximo a D, com atrasos muito menores e ganhos ambientais e energéticos significativos. Reforçando que otimizar o controle semafórico também é uma medida de mitigação ambiental.

Figura 56: Consumo de combustível - Cenário 2



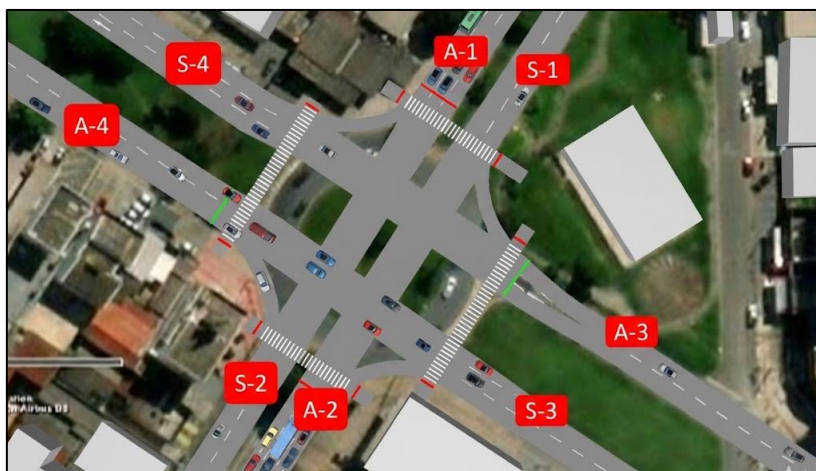
Fonte: Elaborado pelos Autores.

- CENÁRIO 3: Semáforo inteligente

O Cenário 3 manteve as configurações geométricas do cenário 3, alterando unicamente os parâmetros semafóricos, conforme mostra a Figura 57. Implementou-se um semáforo atuado (responsivo) com estrutura de 4 grupos de sinal (SG) operando as 4 aproximações da rotatória (A1-A3, A3-A2, A2-A4, A4-A1). Cada grupo com tempos de verde mínimo de 15-20 segundos (*Min Green*) e máximo de 50-60 segundos (*Max Green I*), permitindo que o controlador adapte dinamicamente o tempo de abertura conforme

detecção veicular em tempo real sem exceder limites que causariam bloqueio total de aproximações alternativas.

Figura 57: Cenário 3: Semáforo Atuado



Fonte: Vissim (Versão 2026).

O tempo de amarelo é fixo em 3 segundos (*Amber*), padrão de segurança que não varia, enquanto o tempo de vermelho é calculado automaticamente (2 segundos *Red Clearance*) para garantir limpeza completa da interseção antes de fase conflitante. A ativação de *Min Recall* garante que cada fase receba seu tempo mínimo de verde pelo menos uma vez por ciclo, evitando inanição de movimentos com demanda menor.

Os grupos de pedestres operaram com tempos fixos de 20 segundos de verde, priorizando segurança pedonal que não deve variar conforme demanda veicular. Essa configuração permite que o sistema ajuste alocação de tempo verde entre as 4 aproximações em tempo real, priorizando aproximações com maior acúmulo de veículos detectado por sensores, enquanto mantém segurança de pedestres independente de tráfego veicular, estratégia operacional que explica os resultados de atraso reduzido e distribuição desigual observados no Cenário 3.

Neste cenário, há mudanças no padrão de formação de filas em relação ao Cenário 1 (rotatória não-sinalizada). Conforme mostra a Figura 57, a aproximação crítica A2-A4 mantém uma extensão média de fila elevada, oscilando entre 262,7 m (pico tarde) e 263,2 m (pico manhã), revelando que mesmo com controle atuado, essa aproximação permanece como o principal gargalo operacional da interseção.

Os resultados da simulação se encontram a seguir nas Tabelas 17 a 19.

Tabela 17 - Cenário 3: Pico manhã

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	263,21	535,00	535,00	NS F	184,09	184,09	8,53	3696,80	719,26	856,77	52,89
A3 - A2	4,44	59,00	59,00	NS B	10,60	10,60	0,54	45,77	8,91	10,61	0,65
A4 - A1	10,71	115,00	115,00	NS A	8,78	8,78	0,50	80,28	15,62	18,61	1,15
A1 - A3	12,09	382,00	382,00	NS B	11,32	11,32	0,55	308,43	60,01	71,48	4,41
Cenário 3	72,61	3125,00	3125,00	NS D	51,26	51,26	2,39	6967,22	1355,57	1614,72	99,67

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Tabela 18 - Cenário 3: Pico tarde

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	262,74	527,00	527,00	NS F	197,41	197,41	8,39	3702,57	720,39	858,11	52,97
A3 - A2	10,91	148,00	148,00	NS B	11,49	11,49	0,51	114,32	22,24	26,50	1,64
A4 - A1	10,83	126,00	126,00	NS A	9,56	9,56	0,60	95,17	18,52	22,06	1,36
A1 - A3	19,79	506,00	506,00	NS B	14,63	14,63	0,68	462,28	89,94	107,14	6,61
Cenário 3	76,07	3987,00	3987,00	NS D	45,65	45,65	1,96	7788,56	1515,37	1805,07	111,42

Fonte: Elaborado pelos Autores.

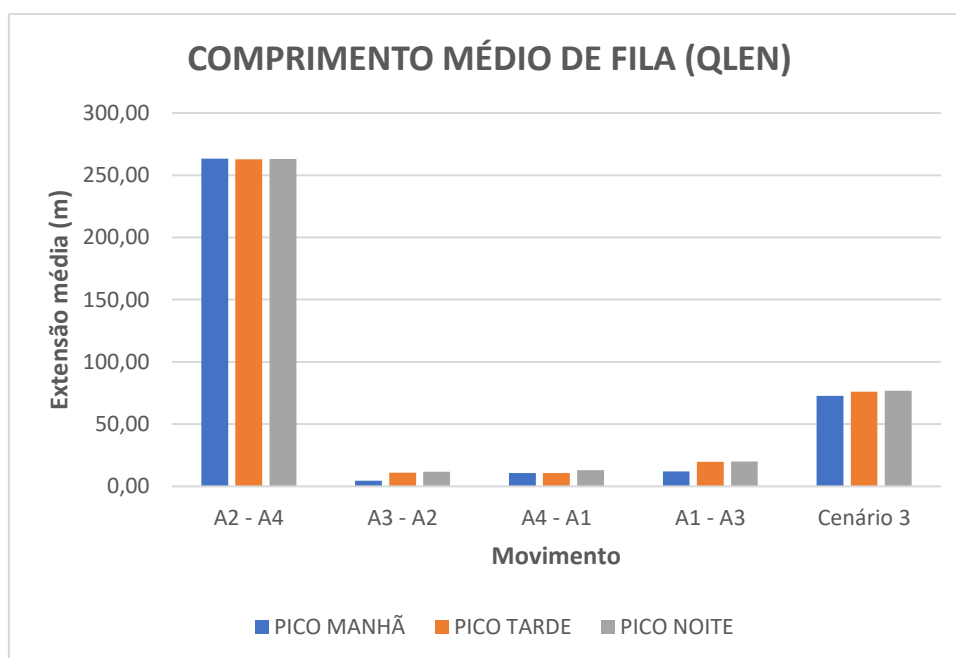
Tabela 19 - Cenário 3: Pico noite

MOVIMENTO	QLEN	VEHS (ALL)	PERS (ALL)	LOS (ALL)	VEH DELAY (ALL)	PERS DELAY (ALL)	STOPS (ALL)	EMISSIONS CO	EMISSIONS NOX	EMISSIONS VOC	FUEL CONSUMPTION
A2 - A4	263,00	519,00	519,00	NS F	197,62	197,62	8,45	3657,78	711,67	847,73	52,33
A3 - A2	11,66	162,00	162,00	NS B	14,18	14,18	0,66	142,15	27,66	32,94	2,03
A4 - A1	13,03	133,00	133,00	NS A	9,08	9,08	0,47	91,47	17,80	21,20	1,31
A1 - A3	20,09	511,00	511,00	NS B	14,10	14,10	0,63	450,44	87,64	104,39	6,44
Cenário 3	76,94	4127,00	4127,00	NS D	43,79	43,79	1,91	7851,97	1527,71	1819,77	112,33

Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Cenário 3, a extensão média das filas foi menor do que no Cenário 1. Enquanto a rotatória original apresentou filas médias da ordem de 300 m nos três picos, o controle semafórico atuado do Cenário 3 trabalhou com comprimentos médios entre cerca de 70 e 77 m. Isso significou uma redução substancial do acúmulo de veículos nas aproximações, indicando que o ajuste dinâmico dos tempos de verde distribuiu melhor a capacidade entre os movimentos, evitando o crescimento contínuo das filas que se observou na rotatória saturada.

Figura 58: Extensão média de fila - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

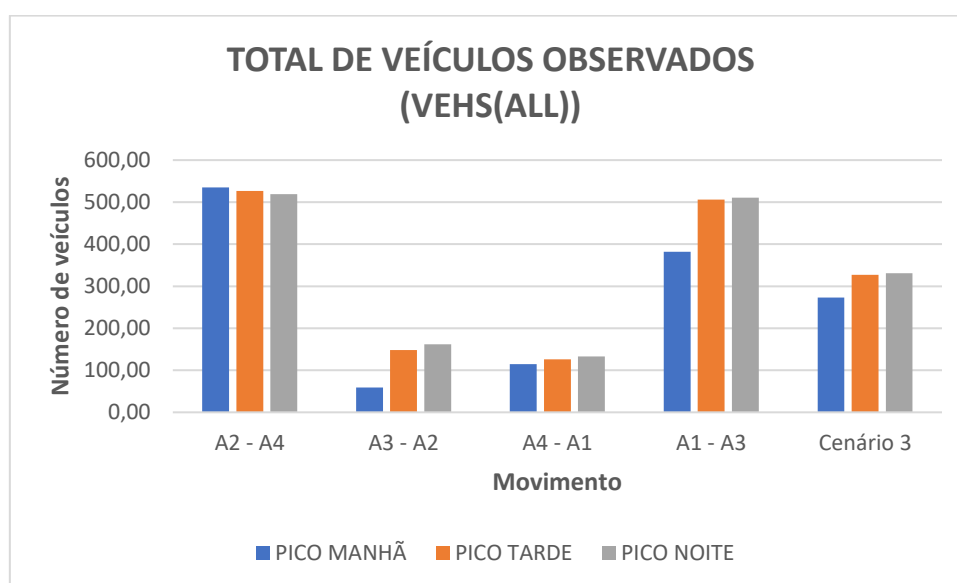
Esse resultado indica que a demanda direcionada para A4 é tão concentrada que o semáforo atuado não consegue totalmente aliviar a pressão acumulada nessa abordagem, sugerindo que fatores geométricos e de capacidade intrínseca dessa aproximação são limitantes.

Em contrapartida, as demais aproximações: A3-A2, A4-A1 e A1-A3, apresentam comprimentos de fila consideravelmente reduzidos (entre 4,4 m e 20,1 m), indicando que o sistema atuado distribui melhor o tempo de verde entre as diferentes fases, permitindo escoamento mais eficiente dos fluxos secundários.

Essa distribuição desigual de filas reflete o princípio operacional do semáforo atuado: prioriza ajustes dinâmicos conforme detecção veicular em tempo real, alocando verde preferencial às aproximações com maior demanda instantânea, ao passo que aproximações com menor volume recebem ciclos mais curtos, reduzindo espera desnecessária.

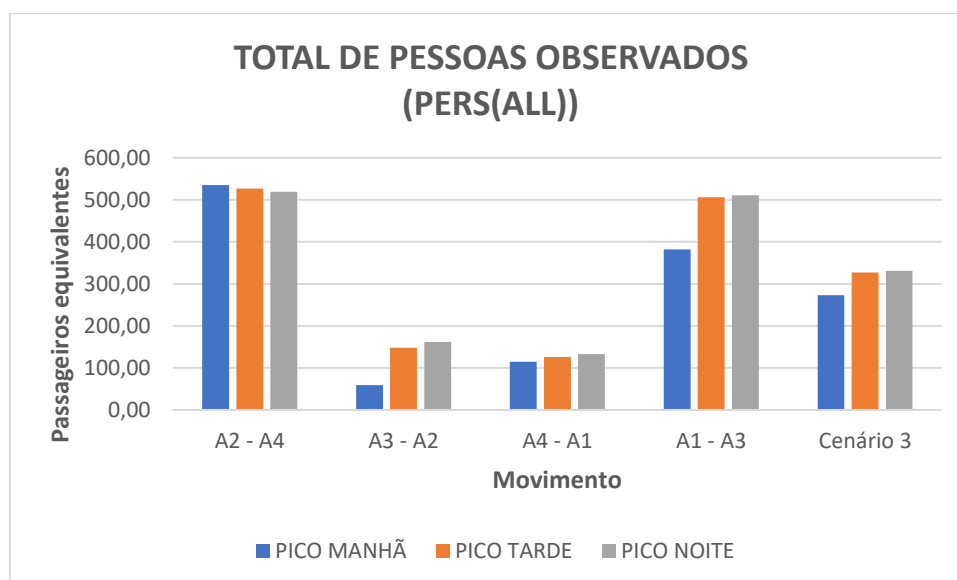
O número total de veículos e de pessoas transportadas mostrou que as melhorias obtidas no Cenário 3 não decorreram de “aliviar” o volume, mas de usar o mesmo fluxo com uma forma de controle mais eficiente. Em outras palavras, o Cenário 3 conseguiu acomodar o mesmo nível de demanda do Cenário 1 com muito menos acúmulo e com tempos de viagem bem mais previsíveis.

Figura 59: Número total de veículos - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 60: Número total de pessoas - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em relação ao nível de serviço (NS), o Cenário 1 apresentou NS global F nos três períodos, com praticamente todos os movimentos operando em condição de saturação. Já no Cenário 3, o NS global passou para D, com alguns movimentos críticos (como A2–

A4) mantendo NS F, mas com outros fluxos, especialmente A4–A1, atingindo NS A, e os demais operando em NS B ou C. Isso indicou que o sistema semafórico atuado conseguiu melhorar o desempenho médio da interseção, concentrando as piores condições em poucos ramos, em vez de concentrar a saturação por toda a geometria como ocorria na rotatória.

Tabela 20 - Nível de Serviço (pico manhã, tarde e noite) - Cenário 3

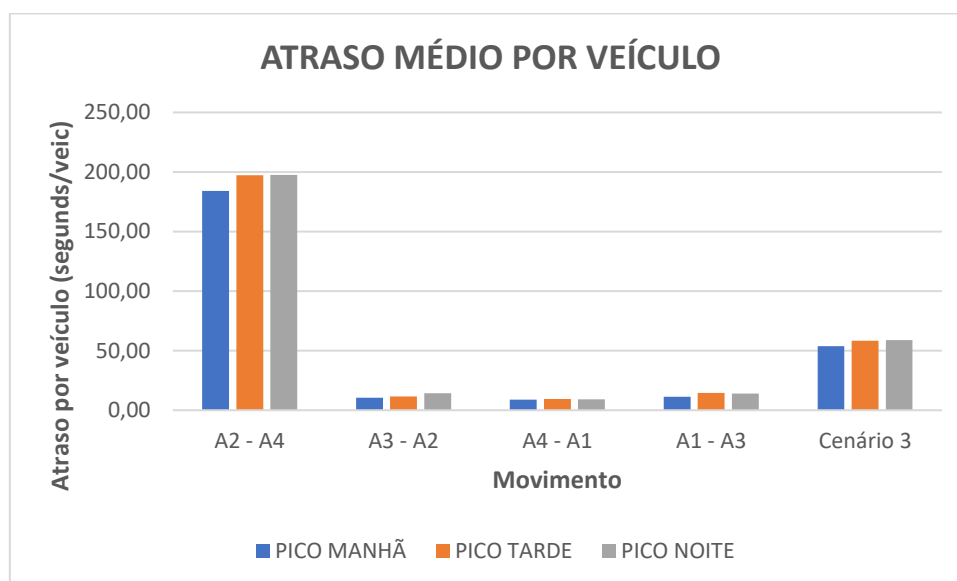
MOVIMENTO	PICO MANHÃ	PICO TARDE	PICO NOITE
A2 - A4	LOS_F	LOS_F	LOS_F
A3 - A2	LOS_B	LOS_B	LOS_B
A4 - A1	LOS_A	LOS_A	LOS_A
A1 - A3	LOS_B	LOS_B	LOS_B
Cenário 3	LOS_D	LOS_D	LOS_D

Fonte: Elaborado pelos Autores.

As demais aproximações, contudo, alcançam classificações muito superiores (NS A-B para A4-A1, A3-A2 e A1-A3), revelando que o semáforo atuado consegue manter essas abordagens secundárias em condições de operação aceitável com atrasos inferiores a 15 segundos/veículo. No total da rotatória, o Cenário 3 atinge NS D (entre 43,79 e 51,26 s/veículo), representando melhoria de 15-20% em atraso médio comparado ao Cenário 1 (que apresentava atrasos predominantemente em faixa F). Essa melhoria é substancial para a eficiência geral da interseção, embora não resolva completamente o gargalo localizado em A2-A4.

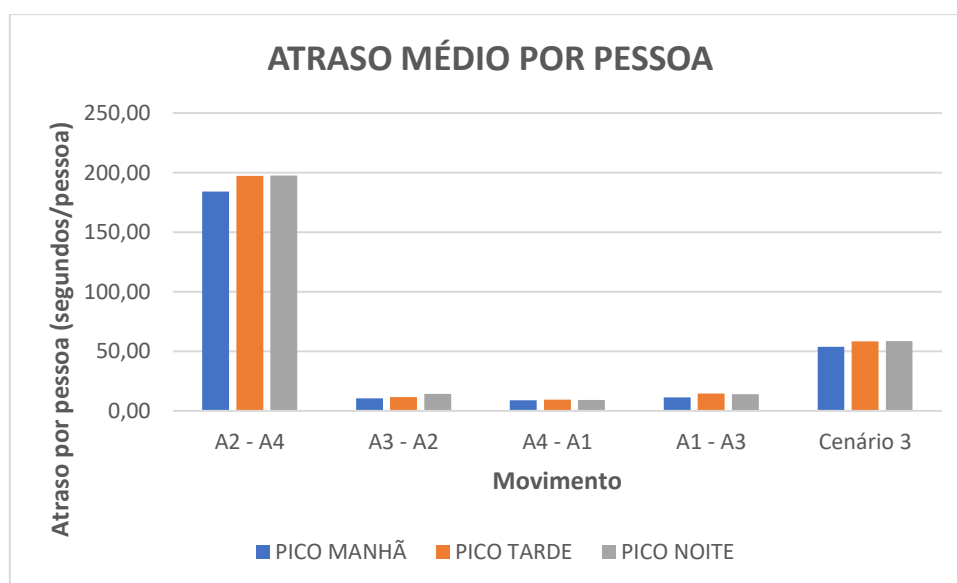
O atraso médio por veículo também apresentou melhora clara. No Cenário 1, o atraso global ficou em torno de 270–280 s/veículo, praticamente constante ao longo do dia, caracterizando um estado de colapso. No Cenário 3, o atraso médio caiu para aproximadamente 54–59 s/veículo nos três picos, valores próximos ao observado no Cenário 3, mas agora com controle atuado. Isso representou uma redução de mais de quatro vezes no atraso em relação à rotatória original, fazendo com que a experiência do usuário se aproximasse do que se espera para uma interseção de alto volume, ainda que em condição de NS D. Como a ocupação dos veículos não se alterou de forma significativa, o atraso médio por pessoa seguiu praticamente o mesmo comportamento do atraso por veículo.

Figura 61: Tempo de parada por veículo – Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 62: Tempo de parada por pessoa – Cenário 3



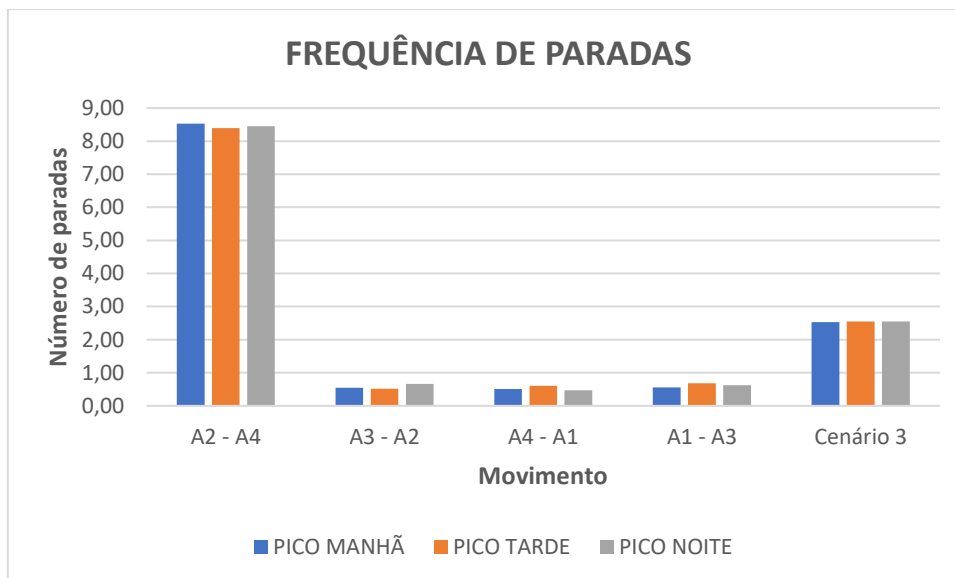
Fonte: Elaborado pelos Autores.

Essa dinâmica sugere que o semáforo atuado está funcionando corretamente: priorizando fluxos maiores e mantendo fluxos menores fluindo, mas revelando limitação estrutural que requer solução complementar (alternativa geométrica, priorização de transporte coletivo, ou restrição de demanda).

O tempo de parada médio reforçou essa melhoria operacional. Enquanto no Cenário 1 os veículos acumulavam cerca de 11–12 s/veículo parados ou quase parados, no Cenário 3 esse valor caiu para algo em torno de 2,5 s/veículo. Ou seja, os usuários passaram a realizar paradas mais concentradas e menos frequentes, muito associadas às

fases vermelhas, com menos episódios sucessivos de “anda-e-para” nas aproximações. Isso contribuiu tanto para o conforto quanto para a redução de desgaste veicular e de consumo.

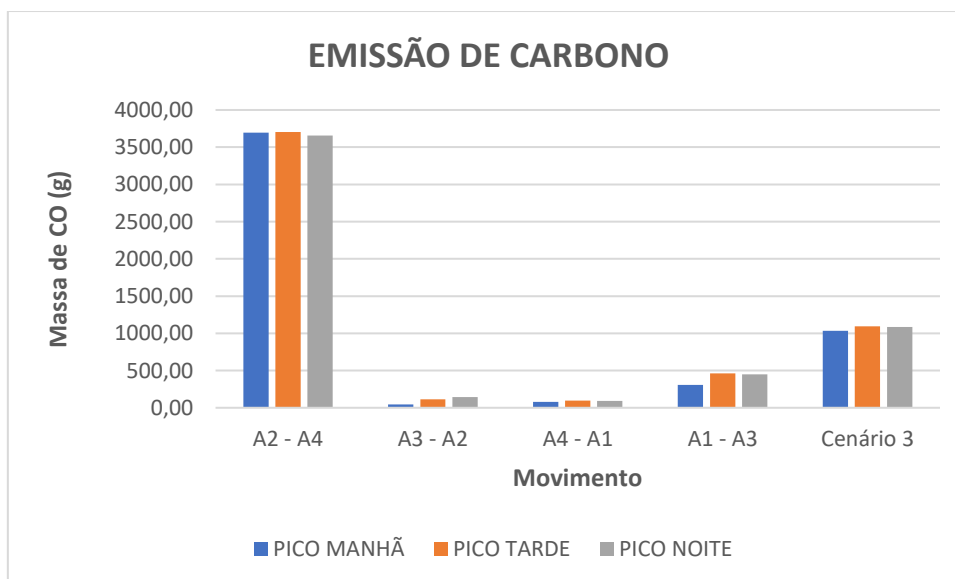
Figura 63: Frequência de paradas - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Do ponto de vista ambiental, as emissões de monóxido de carbono (CO) foram bem menores no Cenário 3 em relação ao Cenário 1. A interseção em regime de rotatória saturada apresentou valores em torno de 2.400–2.500 unidades de CO por pico, enquanto o sistema semafórico atuado trabalhou com aproximadamente 1.030–1.090 unidades. Essa queda esteve diretamente associada à redução de atraso, de tempo parado e de ciclos de aceleração em regime pesado.

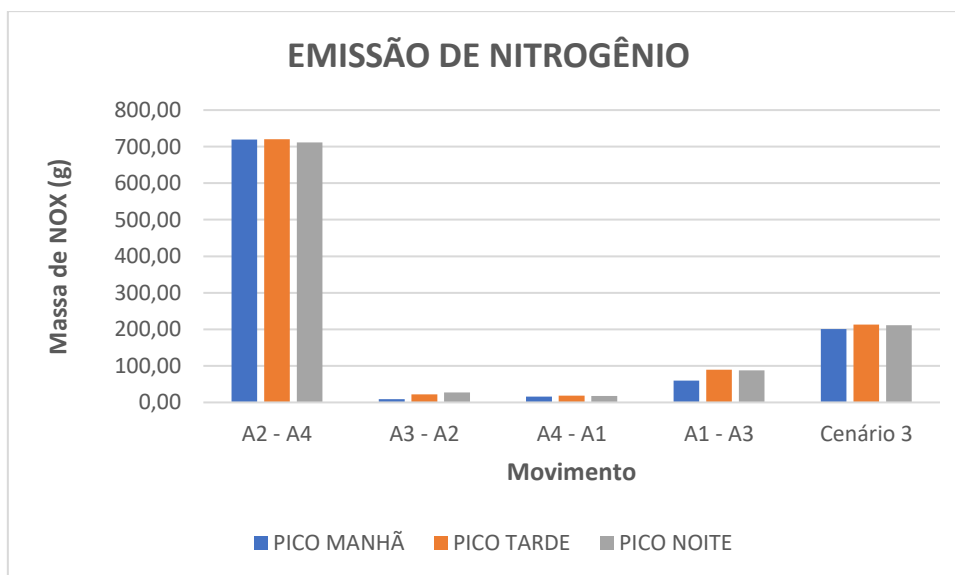
Figura 64: Emissão de CO - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

As emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) seguiram a mesma tendência: de cerca de 470–480 unidades no Cenário 1 para algo em torno de 200–213 unidades no Cenário 3, indicando uma operação menos agressiva em termos de esforço de motor.

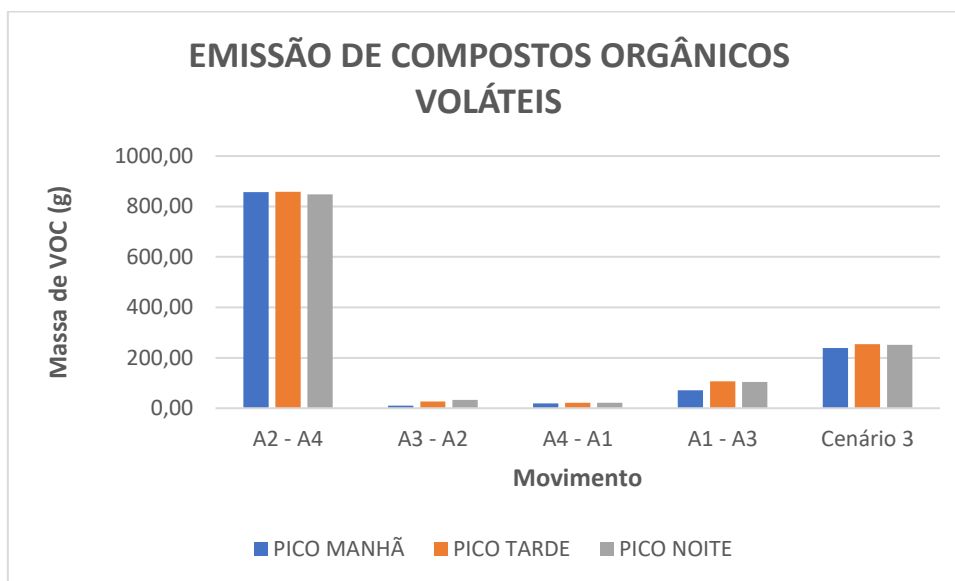
Figura 65: Emissão NOX - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

As emissões de compostos orgânicos voláteis (COV/VOC) também foram significativamente menores. O Cenário 1 apresentou valores médios da ordem de 560–580 unidades, ao passo que o Cenário 3 registrou aproximadamente 239–254 unidades. Essa redução indicou que o controle atuado favoreceu trajetórias mais estáveis e com menos retomadas em baixa marcha, diminuindo as condições típicas de combustão incompleta.

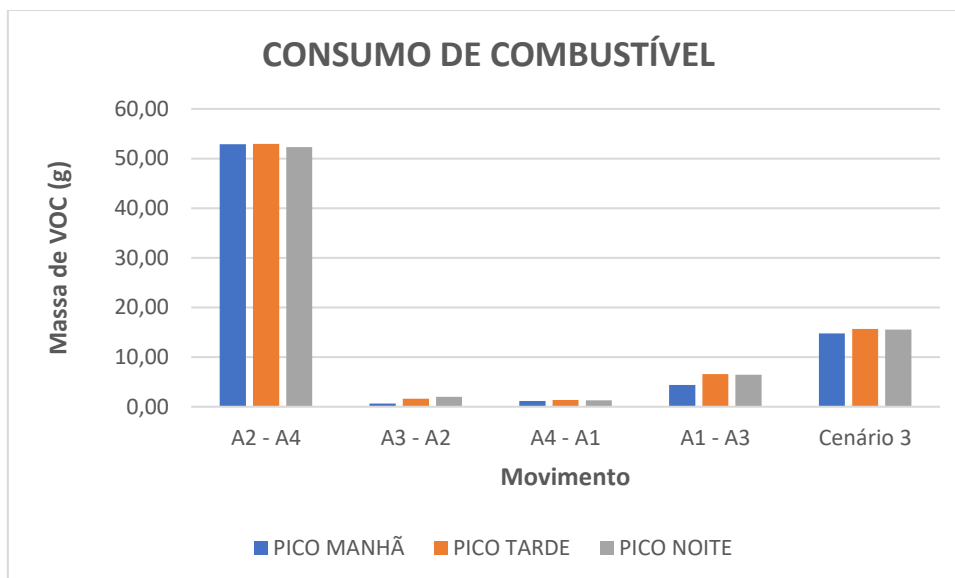
Figura 66: Emissão de VOC - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em paralelo, o consumo de combustível caiu de cerca de 35 unidades no Cenário 1 para aproximadamente 15–16 unidades no Cenário 3, mostrando que, além de mais eficiente do ponto de vista operacional, o sistema atuado foi energeticamente mais econômico.

Figura 67: Consumo de combustível - Cenário 3



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Em síntese, a comparação entre o Cenário 3 e o Cenário 1 mostrou que a transição da rotatória convencional saturada para um controle semaforico atuado transformou uma situação de NS global F, com atrasos muito elevados, filas longas e emissões intensas,

em uma condição de NS global D, com atrasos e tempos de parada bem menores e ganhos ambientais e energéticos expressivos, mantendo a mesma demanda.

A modelagem e simulação dos quatro cenários operacionais realizadas neste trabalho revelaram aspectos e soluções diferenciadas para otimização de soluções para otimização da rotatória estudada, cada uma com vantagens, desvantagens e contextos de aplicabilidade específicos. Para facilitar compreensão integral dos resultados obtidos, apresenta-se optou-se por uma análise comparativa estruturada por métrica de desempenho. A Tabela 21 apresenta um comparativo entre os níveis de serviço gerais obtidos em cada cenário.

Tabela 21 - Comparação entre o Nível de Serviço geral de cada cenário

Cenário	Pico Manhã	Pico Tarde	Pico Noite	Desempenho Geral
Cenário 1: Rotatória Convencional	NS F	NS F	NS F	Uniformemente F em todos os períodos
Cenário 2: Semáforo Fixo-Tempo	NS E	NS D	NS D	Melhoria clara; D em 2 períodos
Cenário 3: Semáforo Atuado	NS D	NS D	NS D	Melhor desempenho sustentado de D

Fonte: Elaborado pelos Autores.

O Cenário 1 (rotatória convencional) operou em falha (NS F) durante todos os períodos, refletindo saturação generalizada da interseção. Os Cenários 2 e 3 (com semáforos) alcançaram significativo avanço, atingindo NS D-E, com o Cenário 3 apresentando melhor consistência de desempenho entre períodos.

Em relação ao Tempo de Atraso Médio por Veículo (*VEHDELAY*), o Cenário 3 (semáforo atuado) foi a solução mais efetiva em redução de atrasos, alcançando diminuição de 57,1% comparado ao Cenário 1, resultando em ganho médio de 62,4 segundos por veículo. O Cenário 2 (semáforo fixo) alcançou redução de 49,9%, essa progressão indica que controle semaforico dinâmico é mais efetivo que redesenho geométrico puro para situações de saturação. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 22 - Comparação entre o Tempo de Atraso Médio por Veículo em cada cenário

Cenário	Pico Manhã	Pico Tarde	Pico Noite	Média Ponderada
Cenário 1	109,3 s	109,6 s	109,1 s	109,3 s
Cenário 2	58,8 s	52,6 s	52,6 s	54,7 s
Cenário 3	51,3 s	45,7 s	43,8 s	46,9 s

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Já em relação a Formação de Filas (*QLEN*) o Cenário 3 demonstrou maior efetividade em redução de filas (76,4%), seguido pelo Cenário 2 (71,3%), ambos resultados esperados pela capacidade de semáforos em regular entrada de veículos.

Tabela 23 - Comparação entre Formação de Filas em cada cenário

Cenário	Pico Manhã	Pico Tarde	Pico Noite	Média Ponderada	Redução vs. C1
Cenário 1	310,2 m	322,5 m	322,8 m	318,5 m	-
Cenário 2	85,5 m	95,2 m	93,6 m	91,4 m	-71.3%
Cenário 3	72,6 m	76,1 m	76,9 m	75,2 m	-76.4%

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Resultados de paradas refletem na efetividade da fluidez operacional. No Cenários 2 e 3 houve uma redução de ciclos stop-and-go que impactaram no consumo de combustível. A Tabela 24 apresenta a comparação entre os resultados obtidos e a redução comparado ao cenário existente.

Tabela 24 - Comparação entre os resultados de Números de Paradas (STOPS)

Cenário	Pico Manhã	Pico Tarde	Pico Noite	Média	Redução vs. C1
Cenário 1	8,37	8,15	8,11	8,21	-
Cenário 2	3,03	4,15	6,15	4,44	-45.9%
Cenário 3	1,84	1,56	1,56	1,65	-79.9%

Cenário 4	2,39	1,96	1,91	2,09	-74.5%
------------------	------	------	------	-------------	--------

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Comparando o Cenário 1 em uma avaliação de controle de tráfego nota-se o impacto da otimização geométrica ao eliminar variável de controle ativo. Os Cenários 2 e 3 se diferem fundamentalmente na estratégia de operação: Cenário 2 utiliza tempos fixos pré-programados, enquanto o Cenário 3 implementa controle atuado responsivo. A Tabela 25 compara as métricas e resultados entre os dois cenários.

Tabela 25 – Comparação entre os resultados dos Cenários 2 e 3

Métrica	Cenário 2 (Fixo)	Cenário 3 (Atuado)	Vantagem
Atraso Médio (s)	54,7	46,9	C4: -14.2%
Extensão de Fila (m)	91,4	75,2	C4: -17.7%
Paradas/veículo	1,65	2,09	C3: -26.7%
LOS	E/D alternado	D consistente	C4: mais previsível
Combustível	91,1 litros	107,8 litros	C3: -15.6%
CO Emitido	6.485 g	6.967 g	C3: -7.2%

Fonte: Elaborado pelos Autores.

O Cenário 3 superou Cenário 2 em atraso e filas, demonstrando que adaptação em tempo real supera pré-programação fixa. Contudo, o Cenário 2 ofereceu menor consumo de combustível e emissões, sugerindo que tempos fixo-ótimos podem ser tão eficientes quanto atuado em termos energéticos. A variação maior de paradas no Cenário 3 (2,09 vs 1,65) indica que sua estratégia de priorização de aproximações críticas gera mais paradas em movimentos secundários, trade-off aceitável pela melhoria geral de fluidez.

Concluindo que o Cenário 3 (atuado) é mais interessante para redução de atrasos e filas, mas Cenário 2 (tempo fixo) oferece operação mais estável e economicamente favorável se os tempos forem otimizados e demanda futura for previsível.

Do ponto de vista ambiental os Cenários 3 e 4 mantêm emissões semelhantes, sugerindo que benefício ambiental de semáforos não é garantido; requer otimização complementar como priorização de transporte coletivo ou restrição de demanda.

Tabela 26 - Comparação do ponto de vista ambiental

Aspecto	Cenário 1	Cenário 3	Cenário 4
CO (g/período)	4.500	6.485	6.967
NOx (g/período)	873	1.262	1.355
VOC (g/período)	1.041	1.503	1.614
Combustível (L)	63,7	91,1	107,8
Benefício Ambiental	Baseline	-7.2% vs C4	Referência

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Diante disso, conclui-se que o Cenário 3 - Semáforo Inteligente - é o cenário mais favorável para implantação como resultado de uma análise multivariada dos resultados. Entre as vantagens decisivas para essa conclusão destaca-se:

- Atraso reduzido de 57,1%: economia de tempo para usuários, ganho econômico estimado em salários e produtividade
- Filas reduzidas em 76,4%: melhoria de segurança (menos veículos em fila = menos congestionamentos em cadeia)
- NS D consistente: operação previsível em todos os períodos, fundamental para planejamento urbano
- Flexibilidade operacional: capacidade de ajuste em tempo real conforme mudanças de demanda ou eventos

Mesmo reconhecendo o Cenário 3 como cenário mais favorável vale ressaltar algumas limitações reconhecidas ao longo do trabalho e ajustes necessários para trabalhos futuros. Tais como:

1) Gargalo persistente em A2-A4: A aproximação A2-A4 permaneceu em LOS F com 184-197 s/veículo mesmo no Cenário 3. Isso indica que o semáforo atuado, embora alocue maior tempo verde a essa aproximação, não consegue processar demanda dentro da estrutura geométrica atual. Ajustes recomendados:

- Investigar priorização de transporte coletivo nessa aproximação (reduzir volume de veículos particulares)

- Considerar reconfiguração geométrica localizada (alargamento, separação de fluxos A2-A4)

2) Consumo de Combustível Elevado: Cenário 3 consumiu 107,8 litros (pico tarde), comparado aos 91,1 litros do Cenário 2. Explicação: a maior capacidade de processamento (3.987 veículos no Cenário 3 vs. 3.114 no Cenário 2) resulta em volume maior no sistema.

Logo recomenda-se: Complementar implementação com políticas de gerenciamento de demanda (congestionamento de preços em horários críticos, incentivos de trabalho flexível) para manter demanda dentro de níveis ótimos de operação.

3) Implementação Técnica Complexa: Semáforos atuados requerem sensores de detecção veicular, unidade de controle inteligente e manutenção especializada. Contudo, essa medida enfrenta certos desafios como:

- Custo inicial significativo comparado ao Cenário 2
- Necessidade de equipe técnica treinada para operação e manutenção
- Compatibilidade com infraestrutura existente da rotatória (verificar viabilidade de instalação de sensores).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de microsimulação de tráfego, diferentes alternativas de controle viário para a interseção entre a Avenida Transbrasiliana e a Avenida Feira de Santana, no município de Goiânia/GO, comparando seus efeitos sobre o desempenho operacional e ambiental do sistema.

A metodologia adotada baseou-se em uma abordagem quantitativa, estruturada a partir da modelagem computacional da interseção em ambiente de microsimulação. Inicialmente, foram coletados dados de volume veicular, composição do tráfego, distribuição direcional e características geométricas da interseção, utilizados para a construção do modelo base no software de microsimulação. Em seguida, o modelo foi submetido a etapas de verificação, calibração e validação, assegurando a representatividade das condições reais de operação nos períodos de pico. A partir do modelo validado, foram simulados quatro diferentes cenários de controle de tráfego, incluindo a manutenção da rotatória existente, a implantação de uma rotatória turbo, a implantação de semáforo de tempo fixo, a adoção de semáforo inteligente com atuação dinâmica e intervenções geométricas associadas. O desempenho de cada cenário foi

avaliado por meio de indicadores operacionais e ambientais, possibilitando a comparação objetiva entre as alternativas analisadas.

- Cenário 1 – Rotatória Existente (Baseline)

A rotatória existente apresentou desempenho inadequado em todos os períodos de pico, operando consistentemente em nível de serviço F com atrasos médios elevados (entre 107–110 s/veículo). Os gargalos concentram-se principalmente nas aproximações A1 e A3, onde atrasos ultrapassam 280 s/veículo e as filas médias excedem 400 metros. Embora a geometria permita fluxo contínuo em períodos de baixa demanda, a falta de canalização e as múltiplas oportunidades de entrelaçamento no anel resultam em operação altamente ineficiente e em elevadas frequências de paradas (até 27 paradas/veículo em alguns movimentos). As emissões totais de poluentes mantêm-se elevadas, refletindo os longos tempos de permanência na interseção.

- Cenário 2 – Semáforo de Tempo Fixo

No Cenário 2, a implantação do controle semaforizado fixo alterou de forma mais clara o nível de serviço da interseção em comparação com a rotatória original. O NS global passou de F, no Cenário 1, para um valor próximo de NS D, com alguns movimentos ainda críticos, mas com boa parte dos fluxos operando em NS B ou C. Isso significou que a estratégia semaforizada conseguiu organizar a demanda ao longo do tempo, reduzindo a sensação de colapso generalizado observada na rotatória saturada.

- Cenário 3 – Semáforo Inteligente (Atuado)

Já no Cenário 3, com o controle semaforizado atuado, o NS global também ficou em torno de D, porém com alguns movimentos atingindo NS A e uma distribuição de desempenho ainda mais equilibrada. Em relação ao Cenário 1, tanto o Cenário 2 quanto o 4 transformaram uma interseção em NS F, com falha de capacidade, em um sistema que, embora ainda crítico em alguns ramos, passou a operar em um patamar aceitável de nível de serviço médio, com o Cenário 3 apresentando a melhor combinação entre NS global e NS dos movimentos individuais.

Em relação as hipóteses do trabalho, conclui-se que:

- Hipótese 1: Semáforo de Tempo Fixo vs. Rotatória

A primeira hipótese - de que a substituição da rotatória por um semáforo de tempo fixo reduziria o tempo médio de espera nos horários de pico - foi confirmada. Os resultados evidenciam que o Cenário 3 (semáforo fixo) alcançou atrasos médios de 52–59 s/veículo contra 107–110 s/veículo da rotatória existente, representando redução de

aproximadamente 50%. Além disso, o nível de serviço geral saiu de F para D/E, indicando melhoria operacional. Porém, essa melhoria teve limitações: em períodos de demanda muito elevada (pico noturno), o semáforo fixo mostrou insuficiência, e em períodos de baixa demanda (tarde), deixou capacidade ociosa, revelando a inflexibilidade inerente a controles de tempo pré-definido.

- Hipótese 2: Semáforo Inteligente vs. Rotatória

A segunda hipótese - de que a substituição da rotatória por um semáforo inteligente (atuado) resultaria em desempenho superior - foi confirmada. O Cenário 4 apresentou atrasos médios de 43–51 s/veículo, redução de 57% em relação ao Cenário 1, e nível de serviço D consistente nos três períodos de pico. Diferentemente do semáforo fixo, o controle atuado ajustou-se dinamicamente à demanda instantânea, mantendo operação eficiente tanto em períodos de pico como em horários menos críticos. As emissões de NO_x, COV e consumo de combustível foram reduzidos em 35–45% em relação à rotatória, confirmando também o ganho ambiental. A única limitação persistiu em A2–A4, indicando que o problema não é puramente de controle, mas de capacidade geométrica.

Os resultados demonstram que a microsimulação de tráfego constitui uma ferramenta eficaz para a avaliação comparativa de alternativas de controle de interseções urbanas, permitindo analisar simultaneamente aspectos operacionais e ambientais. A adoção de sistemas semaforicos inteligentes mostrou-se a solução mais eficiente para o contexto analisado, embora os resultados também indiquem que, em determinadas aproximações, persistem restrições estruturais que podem demandar intervenções complementares, como ajustes geométricos ou estratégias de priorização do transporte coletivo.

Este estudo contribui para o aprimoramento do processo de tomada de decisão em projetos de engenharia de tráfego, ao fornecer subsídios técnicos baseados em simulação para a escolha de alternativas de controle mais adequadas. Recomenda-se que pesquisas futuras ampliem a análise para redes viárias mais extensas, incorporem cenários de crescimento da demanda e considerem a integração com políticas de mobilidade sustentável, de modo a potencializar os benefícios operacionais e ambientais das intervenções propostas.

LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa realizada, embora abrangente em um escopo de cenários comparativos, apresentou limitações importantes que devem ser reconhecidas e endereçadas em pesquisas futuras.

1) Calibração Limitada

A modelagem não incorporou calibração específica de comportamentos microscópicos coletados em campo, como gap-acceptance behavior em entrada de rotatória, distâncias críticas de seguimento ou aceleração/desaceleração específica de condutores locais. Essa simplificação, embora justificada por restrições de recursos, pode ter resultado em subestimação ou superestimação de atrasos em cenários de alta saturação.

2) Validação Qualitativa em Vez de Numérica

A validação do modelo dependeu de inspeção visual e conservação de fluxo, em vez de métricas quantitativas como GEH statistic ou MAPE. Isso reduz confiabilidade das previsões absolutas, embora a comparação relativa entre cenários permaneça válida.

3) Ausência de Análise de Sensibilidade

Não foram conduzidas análises de variação paramétrica (elasticidade de atraso em relação a velocidade desejada, volume, ou configuração de semáforo) que permitiriam identificar quais variáveis mais impactam resultados.

4) Período de Análise Limitado

O estudo analisou apenas 3 períodos de pico (manhã, tarde, noite) em um único dia de operação representativo. Variação semanal (finais de semana vs. dias úteis) e sazonal (períodos de férias, eventos urbanos) não foram capturadas.

5) Comportamento de Pedestres Não-Modelado

Os cenários não incluíram modelagem detalhada de conflitos pedestre-veículo ou comportamentos de travessia, limitando aplicabilidade dos resultados para análise de segurança de pedestres ou priorização de mobilidade não-motorizada.

6) Impacto de Transporte Coletivo Não-Integrado

Embora dados de volume de tráfego tenham incluído ônibus, a análise não discriminou impactos específicos de priorização de transporte coletivo ou implementação de faixas exclusivas, aspectos críticos para sustentabilidade urbana.

Adicionalmente, vale destacar alguns desafios operacionais identificados ao longo do processo da modelagem.

A aproximação A2-A4 permaneceu saturada em todos os cenários, sugerindo que o problema é estrutural (geometria/capacidade) mais que operacional (controle). Solução requer intervenção geométrica, não apenas controle semaforico.

No Cenário 4 foi necessária a decisão ligada ao Trade off entre fluidez e equidade, visto que neste cenário, enquanto reduz atraso médio, concentra penalidades operacionais em movimentos específicos (8,53 paradas em A2-A4 vs. 0,50 em A4-A1).

Além disso, o semáforo atuado, apesar de se tratar de uma solução bastante interessante, tecnológica e confiável requerem manutenção contínua de sensores e lógica de controle. Falhas em detecção ou algoritmo podem degradar operação a pior nível que Cenário 1. Requer manutenção técnica contínua e protocolos de degradação segura.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros conduzam coleta estruturada de dados comportamentais de campo para calibração específica do modelo conforme realidades locais. Essa coleta deve visar a capturar a variação semanal, com objetivo de medir perfis detalhados de velocidade ponto-a-ponto em diferentes períodos e condições de demanda. Além disso, a contagem volumétrica de vias secundárias e retornos no entorno aumentariam a precisão e replicação do comportamento real dos usuários.

Recomenda-se também a exploração de novos cenários tais como: a modelagem de um cenário visando a Priorização de Transporte Coletivo com modelagem explícita de redução de demanda de veículos particulares (15-20% de redução simulada através de incentivos ou políticas de mobilidade) forneceria perspectiva sobre impacto de estratégias de transporte mais amplas. Também, um cenário alternativo combinando Turbo Rotatória com Semáforo Atuado permitiria investigar se o redesenho geométrico complementado por controle ótimo poderia superar limitações de cada abordagem isoladamente.

Ainda no aspecto da contagem volumétrica a expansão da contagem volumétrica - tanto em horas do dia quanto em dias avaliados - garantirão ainda mais precisão e melhorias na modelagem. A operação noturna merece atenção especial, pois comportamento de condutor em períodos de baixa demanda pode divergir significativamente de picos diurnos, e implementação de semáforos atuados noturno pode apresentar desafios técnicos diferentes. Essa coleta temporal estendida forneceria confiança muito maior na representatividade dos resultados para situações de operação real ao longo de tempo.

Por fim, indica-se a inclusão da mobilidade ativa em trabalhos futuros. Integrar comportamento de pedestres e ciclistas, e uma análise de conflitos pedestre x veículo e ciclista x veículos, forneceria uma perspectiva alternativa de segurança frequentemente negligenciada em análises focadas em fluidez veicular.

Uma análise de equidade de mobilidade entre modos (veículo particular, pedestres, bicicleta, transporte coletivo) forneceria perspectiva de sustentabilidade urbana mais integral, revelando se melhorias para veículos particulares são alcançadas ao custo de degradação de mobilidade para usuários de transporte público ou ativos.

Contribuindo para uma avaliação de impactos em sustentabilidade urbana mais ampla (emissões totais de CO₂ da área, qualidade do ar e saúde pública, poluição sonora, uso de solo e desenvolvimento urbano induzido) forneceria perspectiva de valor social integral. Essas análises amplas são necessárias para que decisões operacionais de engenharia de tráfego contribuam efetivamente para objetivos maiores de cidade sustentável, segura e equitativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. *Highway safety manual*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
- AHAC, S.; AHAC, M.; DOMITROVIĆ, J.; DRAGČEVIĆ, V. Modeling the influence of roundabout deflection on its efficiency as a noise abatement measure. *Sustainability*, [S. l.], v. 13, n. 10, p. 5407, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5407>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. Óxidos de Azoto (NOx): impactos na saúde e ambiente. Lisboa: APA, 2021. Disponível em: <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/oxidos-de-azoto-nox>. Acesso em: 24 jan. 2026.
- AHMED, H.; EASA, S. Optimization of singlelane roundabout geometric design: environmental sustainability. In: *Building Tomorrow's Society / Bâtir la Société de Demain*, Fredericton, Canada, 13-16 June 2018. TR28. Ryerson University, 2018. Disponível em: https://legacy.csce.ca/elf/apps/CONFERENCEVIEWER/conferences/2018/pdfs/Paper_TR28_0610050054.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.
- AL-HAJI, G. The impact of traffic calming measures on cyclists' and e-cyclists' safety. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, [S. l.], v. 8, n. 2, p. [não informado], dez. 2020. Disponível em: <https://www.jtle.net/uploadfile/2020/1221/20201221050822697.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- AL-MISTAREHI, B.; IMAM, R.; AL-SHAWABKAH, M. M.; SHTAYAT, A.; AL-OMARI, A. Assessing the effect of geometric design and land use on roundabouts using video camera. *Civil Engineering Journal*, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 3626-3639, 2024. Disponível em: <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/5307>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- ALVES, B. B.; MJAHEDE, L. B.; MOODY, J. *Decarbonizing Urban Transport for Development*. Washington, D.C.: World Bank, 2023.
- AHN, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2013). *Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels*. *Journal of Transportation Engineering*.
- ANJOS, M. W. O. Aplicação da modelagem microscópica para análise e melhoria do desempenho da interseção semaforizada da avenida Humberto Monte com avenida Jovita Feitosa. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.
- ANTAS, P. M. *Estradas I - Projeto Geométrico*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1991.
- ANTONIOU, C.; IORGA, S.; NIKOLOPOULOS, I. A methodology for calibration of traffic micro-simulator using flow and speed data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 1, n. 3, p. 201-210, 2014.
- ANTP. *O uso adequado de rotatórias como agente redutor da acidentalidade no trânsito*. São Paulo: Associação Nacional de Transportes Públicos, 2013.

- AQUINO, E. A. A. Validação do modelo mesoscópico de tráfego do SCOOT para o desenvolvimento de redes viárias urbanas microsimuladas. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- ARAÚJO, A. M.; CASTRO-NETO, M. M. Calibração do modelo de aceitação de brechas em interseções urbanas com o microsimulador de tráfego Vissim. *Revista Transportes*, v. 26, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1603>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- ARAÚJO, C. H. S. F. de; MELO, G. F. de. Uso da microsimulação de tráfego para análise de uma via arterial urbana. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46281>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- ARAÚJO, R. S. Experimentação com simulação mesoscópica utilizando SUMO na Grande Florianópolis. *Revista de Engenharia de Transportes*, v. 29, n. 1, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/232800>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- AUSTROADS. *Guide to Traffic Management Part 3: Traffic Studies and Analysis Methods*. Sydney: Austroads, 2020. Disponível em: <https://austroads.com.au/publications/traffic-management/agtm03>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- AZEREDO, L. E. Seis fatores essenciais para o sincronismo entre semáforos. [S. l.], [202-?]. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/seis_fatores.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.
- BAGGIO, P. F. Comparação entre SUMO e Vissim na medição de fluxo e emissões veiculares. *Revista de Modelagem de Transporte*, v. 6, n. 3, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248414>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- BAGHERI, M.; BARTIN, B.; OZBAY, K. Simulation of vehicles' gap acceptance decision at unsignalized intersections using SUMO. *Procedia Computer Science*, v. 201, p. 321-329, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.043>.
- BALVEDI, Guilherme Arpini. Microsimulação de tráfego aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em rotatórias: um estudo de caso na rótula da UFSC/Trindade. 2018. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2018.
- BANDI, M. M.; GEORGE, V. Calibration of vehicle and driver characteristics in Vissim and ANN-based sensitivity analysis. *International Journal of Microsimulation*, v. 13, n. 2, p. 79-101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34196/ijm.00219>. Disponível em: <https://doi.org/10.34196/ijm.00219>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BARCELÓ, J. *Fundamentals of Traffic Simulation*. Nova Iorque: Springer, 2010.
- BAZA-SOLARES, N.; VELASQUEZ-MARTÍNEZ, R.; TORRES-BOHÓRQUEZ, C.; MARTÍNEZ-ESTUPIÑÁN, Y.; POLIZIANI, C. Traffic simulation with open-source and commercial traffic microsimulators: a case study. *Computing and*

- Informatics*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26552/com.c.2022.2.e49-e62>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- BELLIA, V.; BIDONE, E. D. *Rodovias, Recursos Naturais e Meio Ambiente*. Niterói: Editora Universitária da UFF, 1992.
- BERTONCINI, B. V. Impacto nas medidas de desempenho operacional devido à substituição de interseção semaforizada por rotatória. 2007. Artigo Técnico - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- BETHÔNICO, F. E. C. P. Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- BILEE, N.; PITAKSRINGKARN, L. A study of efficiency and economic value of grade separated U-turn in Bangkok. *International Journal of Engineering Research and Technology*, v. 13, n. 4, p. 1095-1100, 2024. DOI: <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.4.2024.1095-1100>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- BOCA SANTA. Interseção em T registrada em bairro de Campo Mourão. 2014. Disponível em: <https://www.bocasanta.com.br/index.php?p=YWxyb3RsaXMvbWlyb3RhaUB6aHo6666YWQ9NjY4MjE4Jmx1bW90ZV9vZGFjaWU9OTE1NQ>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- BRAGA NETO, J. T. Avaliação da proposta de readequação da rotatória da Av. Aguanambi x BR-116 utilizando a microssimulação. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.
- BRASIL. *Código de Trânsito Brasileiro*. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro: DNIT, Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2006.
- BRASIL. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. SECRETARIA NACIONAL DE TRÂNSITO (SENATRAN). Frota de veículos por município - junho de 2025. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2025>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- BORIBOONSOMSIN, K., & Barth, M. (2009). Impacts of signal timing on vehicle emissions. *Transportation Research Part D*.
- CAMPOS ARAÚJO, D. R. Comparação das simulações de tráfego dos modelos SATURN e DRACULA. 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4162>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- CAPECE, F. G.; MANHIÇA, A. S. Semáforos inteligentes de tempo real usando transdutores indutivos. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/25013190/SEMAF%C3%93ROS_INTELIGENTES_D_E_TEMPO_REAL_USANDO_TRANSDUTORES_INDUTIVOS_Capece_Manhi%C3%A7a. Acesso em: 9 mar. 2025.
- CAVALHEIRO, E. R. M.; QUARESMA, C. C.; CONTI, D. M. O uso da luz de tráfego inteligente na mobilidade urbana sustentável: uma revisão sistemática da literatura.

- Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, [S. l.], v. 17, n. 2, 2021. DOI: 10.54399/rbgdr.v17i2.6344. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/6344>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- CECIERJ. Simulação. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2010. Disponível em: <https://canal.cecierj.edu.br/102020/84fea58100a3802757a40aee651b5b6d.pdf>.
- CERVELLERA, C.; MACCIÒ, D.; REBORA, F. Copula-based scenario generation for urban traffic models. *Expert Systems with Applications*, v. 210, 118389, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118389>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- CIPRIANI, E.; CRISTALLINI, E.; MAZZEI, V. Modelling passengers, buses and stops in traffic microsimulation: review and extensions. *Journal of Advanced Transportation*, v. 44, n. 2, p. 72-88, 2010.
- CHMIELEWSKI, J.; KEMPA, W. Case study: benefits from constructing a grade-separated junction in the urban road system. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, v. 103, p. 29-38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2019.103.3>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- COELHO, A. V. R. Comparação das estimativas de atraso veicular médio por diferentes metodologias em interseções urbanas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- COELHO, M. C., FARIAS, T. L., ROUPHAIL, N. M. Effect of roundabout operations on pollutant emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 11, Issue 5, 2006, Pages 333-343, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.06.005>.
- COMISSÃO DE COORDENAÇÃO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL DO NORTE. Manual de planejamento das acessibilidades e gestão viária. 2008. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/CCDRn_1.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Relatório de emissões veiculares. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/03/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2020.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Manual de sinalização urbana. São Paulo: CET, 2020. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/1233872/msuvoll4rotatoriaminirrotatriarotatoriaverderev01.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Noções básicas de engenharia de tráfego. São Paulo: CET, 1977. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/67911/bt05-%20nocoas%20basicas%20de%20engenharia%20de%20trafego.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Norma Técnica 210: técnica de análise de conflitos - Engº Sun Hsien Ming. São Paulo: CET, 2001. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/20791/nt%20210%20revisado.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). NT 156/92: uma discussão sobre interseções semaforizadas de grande extensão, sem caixas intermediárias. São Paulo: CET, 1992.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Semaforica. São Paulo: CET, 2017. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/1294880/V06PIISemafRev02.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Uma comparação entre o controle semaforico em tempos fixos e o em tempo real. São Paulo: CET, 2016. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/479737/nt243.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: sinalização vertical de regulamentação*. Volume I. 3. ed. Brasília: CONTRAN, 2022.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Volume V: Sinalização Semaforica*. Brasília: CONTRAN, 2022.
- COSTA, A. N. Calibração e validação de parâmetros comportamentais do modelo de seguimento de veículos em ambiente de microssimulação. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.
- COSTA, M. S. Otimização de semáforos adaptativos via Vissim. 2024. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.
- CROW. Turbo-roundabouts. Ede, Netherlands: *Information and Technology Platform for Transport, Infrastructure and Public Space* (CROW), 2008. (Publication 257).
- CUCCI, E. Semáforo: ser ou não ser inteligente - uma comparação entre o controle semaforico. [S. l.: s. n.], [20-].
- CUNTO, F. J.; LOUREIRO, C. F. G. O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. *Revista Transportes*, v. 19, n. 3, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58742>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- DAER-RS. Normas de projetos rodoviários: volume 2 - projeto geométrico de interseções. Porto Alegre: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul, 2016.
- DAVIDOVIĆ, S.; BOGDANOVIĆ, V.; GARUNOVIĆ, N.; PAPIĆ, Z.; PAMUČAR, D. Research on speeds at roundabouts for the needs of sustainable traffic management. *Sustainability*, [S. l.], v. 13, p. 399, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/949328>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO DE GOIÁS (DETRAN). Em seis anos, frota no Estado cresce 20%. Goiânia: Governo de Goiás, 2022. Disponível em: <https://goias.gov.br/detran/2338/#:~:text=Dados%20do%20Departamento%20Estadual%20de,%C3%A9%20de%2020%2C6%25>. Acesso em: 27 maio 2025.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Identificação das interseções críticas entre rodovias federais de Santa Catarina. Florianópolis: DNIT, 2012. Disponível em:

<https://www.labtrans.ufsc.br/wp-content/uploads/2020/12/Identifica%C3%A7%C3%A3o-das-interse%C3%A7%C3%B5es-cr%C3%ADticas-entre-rodovias-federais-de-Santa-Catarina.-DNIT-2012..pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de estudos de tráfego. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de projeto de interseções. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/718_manual_de_projeto_de_intersecoes.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

DESCHLE, N.; VAN ARK, E. J.; VAN GIJLSWIJK, R.; JANSSEN, R. Impact of signalized intersections on CO₂ and NO_x emissions of heavy duty vehicles. *Energies*, v. 15, n. 3, p. 1242, 2022.

DESCHLE, N.; VAN ARK, E. J.; VAN GIJLSWIJK, R.; JANSSEN, R. Impact of signalized intersections on CO₂ and NO_x emissions of heavy duty vehicles. *Energies*, v. 15, n. 3, p. 1242, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2109.07198>. Acesso em: 12 ago. 2025.

DETRAN-GO. Estatísticas da frota de veículos - 2015 e 2024. Goiânia: Departamento Estadual de Trânsito de Goiás, 2024. Disponível em: <https://www.detran.go.gov.br>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DNIT. *Manual de Estudos de Tráfego*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.

DNIT. Nova travessia urbana na BR-116/CE aumentará segurança e integração na Região Metropolitana de Fortaleza. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2021/12/nova-travessia-urbana-na-br-116-ce-aumentara-seguranca-e-integracao-na-regiao-metropolitana-de-fortaleza>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DONIN, J. P.; RUBIO, M. C. S. Simulação de tráfego como ferramenta de avaliação da capacidade viária. *Revista Transportes*, v. 28, n. 3, 2020.

DOWLING, R. et al. Guidelines for Calibration of Microsimulation Models. *Transportation Research Record*, v. 1876, p. 1-9, 2004.

DŽAMBAS, Tamara; AHAC, Saša; DRAGČEVIĆ, Vesna. Geometric design of turbo roundabouts. *Technical Gazette*, v. 24, n. 1, p. 309-318, 2017.

FERNANDES, F. O.; BELTRÃO, T. G. O uso da microssimulação na alocação do tráfego em Polos Geradores de Viagens: um estudo de caso do IFG - Câmpus Goiânia. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Transportes) - Instituto Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/218>. Acesso em: 9 mar. 2025.

- FERRAZ, A. C. P.; FORTES, F. Q.; SIMÕES, F. A. Engenharia de tráfego urbano: fundamentos práticos. São Carlos: EESC-USP, 1999. Edição preliminar.
- FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E. *Transporte público urbano*. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2004.
- FHWA. Federal Highway Administration. *Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Publication No. FHWA-HRT-04-040. Washington, DC, 2004. Disponível em: <https://highways.dot.gov/media/6916>. Acesso em: 11 jan. 2026.
- FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (EUA). Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD). 2009.
- FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (EUA). Roundabouts: an informational guide. 2nd ed. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2010. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00067/00067.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (EUA). *Traffic Analysis Toolbox*. Volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software: 2019 update to the 2004 version. Atualizado por: Karl Wunderlich; Meenakshy Vasudevan; Peiwei Wang. Autores da versão original de 2004: Richard Dowling; Alexander Skabardonis; Vassili Alexiadis. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2019. (Report No. FHWA-HOP-18-036). Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop18036/fhwahop18036.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Traffic Analysis Toolbox Volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software. Publication No. FHWA-HRT-04-040. Washington, D.C., 2014.
- FHWA. *Traffic Bottlenecks: Identification and Solutions*. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2016. Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39938/dot_39938_DS1.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.
- FHWA. *Traffic Signal Timing Manual - Cap. 3*. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2021. Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter3.htm>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- FIEMS, D.; PRABHU, B. Macroscopic modelling and analysis of flows during rush-hour congestion. *Performance Evaluation*, v. 149-150, p. 102218, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.peva.2021.102218>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- FORTUIJN, Lambertus G. H. Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2096, p. 16-24, 2009.
- FOSU, G. O.; ODURO, F. Two dimensional anisotropic macroscopic second-order traffic flow model. *Transportation Modes eJournal*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17512/jamcm.2020.2.05>. Acesso em: 5 ago. 2025.

- FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Microsimulation: department assessment and guidance. Tallahassee, 2022.
- GALDINO, J. E. Comparação entre Vissim e SUMO na modelagem de interseções urbanas. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262136>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- GALLELLI, Vincenzo et al. Analysis of the Traffic Efficiency and Safety of Conventional Roundabout and Turbo Roundabout Schemes for Five-Way Intersections. *Sustainability*, 2023.
- GARTNER, N. et al. (2017). *Traffic Control Systems Handbook*.
- GOIÂNIA (Município). Secretaria Municipal de Saúde. Programa Vida no Trânsito - painel de indicadores. Goiânia: Prefeitura Municipal, 2025. Disponível em: <https://lookerstudio.google.com/reporting/0e740939-5d04-4e7f-b4b0-8515b617eddb/page/B5g9D>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- HAFRAM, S. M.; VALERY, S.; HASIM, A. H. Calibrating and validation microscopic traffic simulation models Vissim for enhanced highway capacity planning. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, v. 36, n. 8, p. 1509-1519, ago. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372064515_Calibrating_and_Validation_Microscopic_Traffic_Simulation_Models_Vissim_for_Enhanced_Highway_Capacity_Planning. Acesso em: 11 ago. 2025.
- HAN, F.; WANG, X.; WANG, G. Modeling the car-following behavior with consideration of driver, vehicle, and environment factors: a historical review. *Sustainability*, v. 14, n. 13, p. 8179, 2022.
- HOSSAIN, M. (2020). Calibration and validation of microscopic simulation models in urban intersections using PTV Vissim. *Transportation Research Record*.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Goiânia - GO. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go/goiania.html>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?edicao=41053>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- IEEE. Standard computer dictionary. New York: IEEE Press, 1991.
- IMTRAFF. Avaliação de interseções semaforizadas utilizando software de microssimulação. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 21., 2007, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2007.
- INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS - ITE. Roundabouts. Technical Report 14. *Transportation Research Board*, 2010.
- INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO (ITDP). Recomendações para reduzir as emissões do setor de transporte no Brasil. Brasília, 2023. Disponível em: <https://itdpbrasil.org/recomendacoes-para-reduzir-as-emissoes-do-setor-de-transporte-no-brasil/>. Acesso em: 9 mar. 2025.

- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado no Brasil. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2017.
- IŠTOKA OTKOVIĆ, I.; TOLLAZZI, T.; ŠRAML, M.; VAREVAC, D. Calibration of the Microsimulation Traffic Model Using Different Neural Network Applications. *Future Transportation*, v. 3, n. 1, p. 150-168, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp3010010>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7590/3/1/10>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- IZADI, A. et al. Safety and Operational Performance of Turbo Roundabouts. Nevada Department of Transportation, 2016.
- JACOBSEN, N. Microsimulação da travessia de pedestres em interseções semaforizadas. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- JAMSHIDNEJAD, A.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIOU, M.; SCHUTTER, B. A mesoscopic integrated urban traffic flow-emission model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 75, p. 45-83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.024>. Acesso em: 05 ago. 2025.
- JORNAL DAQUI. Ruas de Goiânia ganham 69 veículos a mais a cada dia. *Jornal Daqui*, 2024. Disponível em: <https://daqui.opopular.com.br/geral/ruas-de-goiania-ganham-69-veiculos-a-mais-a-cada-dia-1.2789736>. Acesso em: 20 maio 2025.
- KAPUSTA, J.; TRÚCHLY, P. Web-Based Visualization and Control of Traffic Simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING ELEARNING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (ICETA), 21., 2023, Stary Smokovec. Anais [...]. Stary Smokovec: IEEE, 2023. p. 277-282. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICETA61311.2023.10344055>. Acesso em: 05 ago. 2025.
- KHADHIR, A.; VANAJAKSHI, L.; BHASKAR, A. A microsimulation-based stochastic optimization approach for optimal traffic signal design. *Transportation in Developing Economies*, v. 6, 2020. DOI: 10.1007/s40890-020-00108-x. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344637390_A_Microsimulation-Based_Stochastic_Optimization_Approach_for_Optimal_Traffic_Signal_Design. Acesso em: 9 mar. 2025.
- KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. **Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility.** *International Journal of Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3-4, p. 128-138, 2012.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- LE, H. C. Effect of geometric design on traffic safety: a case study of State Route 20 at Timbuctoo, Yuba County. 2020. Dissertação (Mestrado) - California State University, Sacramento. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10211.3/217930>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- LELEISA, S.; QUEZON, E. T.; WEDAJO, T. Performance evaluation of grade separation within the selected major intersection in Addis Ababa City. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 3, n. 3, p. 41-49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20180303.11>.

- LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, v. 229, p. 317-345, 1955.
- LIMA, A. B. de. Calibração de modelos de microssimulação para rotatórias urbanas. 2024. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- LU, J. Urban intersection with multiple lanes and pedestrian crossings. *Pexels*, 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/83054-em-semana-mundial-onu-chama-pessoas-denunciar-riscos-no-tr%C3%A2nsito>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- LUK, J.; STEWART, D.; WALSH, D. Microsimulation traffic models: usage, limitations and applications. 2006. Disponível em: <https://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MjE1ZTI4YzctZjc1YS00MzQ4LTkyY2UtMDJmNTgxYjg2ZDA5&rID=NTMx&pID=MTQ3Ng==&attchmnt=True&uSesDM=False&rIdx=ODI2MA==&rCFU=>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- MALEANU, M.; RACANEL, C. Critical parameters for calibration and validation of traffic studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1185, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1185/1/012038>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- MARCUSSO, L. G.; SOLEK, M. J. Proposta de remodelação de uma interseção rodoviária na cidade de Curitiba/PR com foco na segurança dos usuários e na capacidade de tráfego. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.
- MEDRANO, R. M. A. Matriz origem-destino de Goiânia: integração com o Plano Diretor de Mobilidade Urbana. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2023.
- MELO NETO, O. M.; SANTOS, B. L. F.; CARVALHO, F. S. S.; NASCIMENTO, A. M. V.; SILVA, G. C. B. Planejamento urbano: viabilização de semáforos próximos à rotatória através de um software para melhoria de fluxo de veículos e pedestres. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, e13973808, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3808>.
- MENEZES, S. Obra rodoviária na BR-304 em trecho da Região Metropolitana de Natal. *Blog do Barreto*, Rio Grande do Norte, 2024. Disponível em: <https://blogdobarreto.com.br/dnit-reafirma-cronograma-de-editais-dos-primeiros-trechos-da-br-304-para-este-ano/>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- MESQUITA, K. G. de A.; NOBRE, G. A. R. Método de integração entre modelos macro e microscópico em fenômenos da rede viária urbana. In: *CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*, 34., 2020, 100% Digital. Anais [...]. [S. l.]: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2020. p. 1980-1991. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/56154>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- MOITA, M.; ALMEIDA, E. S. Aplicação de simulação para obtenção de soluções ao tráfego em rotatória da cidade de Manaus. *Journal of Transport Literature*, v. 6, n. 1, p. 93-109, 2012. Universidade Federal do Amazonas (UFAM).
- MUKHERJEE, D.; MITRA, S. A review of pedestrian safety research in signalized intersections. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,

- v. 19, n. 14, p. 8655, 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9336202/>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- MÜLLER, S. B. et al. Análise da interseção “5 esquinas” mediante a Engenharia de Tráfego. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/266/2019/09/An%C3%A1lise-da-interse%C3%A7%C3%A3o-5-esquinas-mediante-a-engenharia-de-tr%C3%A1fego.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- NASCIMENTO, V. F.; MIRANDA, D. M. M. Aplicação de simulação de eventos discretos para melhorar o tráfego veicular numa região semaforizada do município de Uberaba - MG. *Exacta*, v. 22, n. 1, p. 88-118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5585/exactaep.2022.20897>. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/20897>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- NCDOT. *Capacity Analysis Best Practices*. North Carolina Department of Transportation, 2024. Disponível em: <https://connect.ncdot.gov/resources/safety/Congestion%20Mngmt%20and%20Signing/Best%20Practices%20-%20Capacity%20Analysis%20Guidelines.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- NERIS, D. F. Análise de desempenho do tráfego em rotatórias. 2019. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo (USP).
- NOVA LIMA. Via Asa dos Ventos está concluída. Nova Lima: Prefeitura Municipal, 2024. Disponível em: https://www.novalima.mg.gov.br/inicio/noticias/via_asa_dos_ventos_esta_concluida. Acesso em: 6 ago. 2025.
- OMS - Organização Mundial da Saúde. Environmental noise guidelines for the European region. 2022.
- ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. Modelling transport. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- PACHER, J. K. Análise da fluidez do tráfego utilizando modelagem de microsimulação. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262145>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- PAPPIS, C. P.; MAMDANI, E. H. A fuzzy logic controller for a traffic junction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 7, n. 10, p. 707-717, out. 1977.
- PARK, B.; WON, J.; ROUFAIL, N. Evaluation of traffic signal timing optimization methods using a stochastic and microscopic simulation program. In: *TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING*, 80., 2001, Washington, D.C. Anais... Washington, D.C., 2001. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/19572>.
- PEREIRA, P.; TAVARES, J. Modelagem de sistemas urbanos. Lisboa: IST Press, 2015.
- PIETRANTONIO, H. Princípios básicos de engenharia de tráfego: notas de aula - Teoria de Fluxo de Tráfego. Capítulo 5. São Paulo: LEMT/PTR-EPUSP, 2018. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/ptr2377/Cap%C3%ADulo5b.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

- PINHEIRO, D. R. R. Microsimulação de tráfego aplicada a um caso de estudo da cidade do Porto. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/116488>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- PLAMUS. Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis: estudo e proposição de métodos em planejamento de transportes aplicados à Região Metropolitana de Florianópolis: simulações microscópicas de tráfego. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. v. 5. Disponível em: <https://observatoriodamobilidadeurbana.ufsc.br/wp-content/uploads/2019/03/VolumeV.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- PORTAL DO TRÂNSITO. Semáforo ou rotatória? Veja qual a melhor alternativa para reduzir acidentes! 2022. Disponível em: <https://www.portaldotransito.com.br/noticias/mobilidade-e-tecnologia/seguranca/semaforo-ou-rotatoria-veja-qual-a-melhor-alternativa-para-reduzir-acidentes/>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- PTV GROUP. (2023). Vissim User Manual. *User Manual*. Karlsruhe: PTV AG, 2023. v. 2023.
- PTV GROUP. PTV Vissim – Step-by-Step Tutorial for Simulating Signalized Intersections. Karlsruhe, Germany, 2025. Disponível em: <https://www.ptvgroup.com/sites/default/files/2025-08/PTV%20Vissim%20-%20Step-by-Step%20Tutorial%20for%20Simulating%20Signalized%20Urban%20Intersection%201.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2026.
- RAIA JUNIOR, A. A.; MARTINEZ, H. M. M. O uso de software demo no ensino de engenharia de tráfego: uma experiência na UFSCar. In: *CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*, 19., 2005. Anais [...]. v. 1, p. 1-8.
- RAHMAN, M., Abdel-Aty, M., & Lee, J. (2018). Microsimulation-based analysis of operational and safety impacts in signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*.
- RIBEIRO, R. L. et al. O uso da microsimulação de tráfego na segurança viária: uma revisão sistemática da literatura. *Anais do Congresso Brasileiro de Tráfego*, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322039991_O_USO_DA_MICROSSIMULACAO_DE_TRAFEGO_NA_SEGURANCA_VIARIA_UMA_REVISAO_SISTEMATICA_DA_LITERATURA. Acesso em: 9 mar. 2025.
- ROBERTSON, D. I. Transyt: A Traffic Network Study Tool. Crowthorne, Berkshire: Road Research Laboratory, 1969. (RRL Report LR 253).
- ROCHA, R. R. Análise de interseções urbanas por meio da simulação do tráfego. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- SECO, A. J. M.; ANTUNES, A. J. P.; COSTA, A. H. P.; SILVA, A. M. B. Princípios básicos de organização de redes viárias: manual de planejamento das acessibilidades e da gestão viária. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2008. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/179034873/Principios-Basicos-de-Organizacao-de-Redes-Viarias>. Acesso em: 5 ago. 2025.

- SENA, J. B. Modelação e simulação de sistemas de tráfego. 2004. Trabalho Final (Graduação em Engenharia Informática) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- SENATRAN. Manual Brasileiro de Sinalização Semafórica. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/copy_of_05_MBST_Vol_V_Sinalizacao_Semaforica.pdf. Acesso em: 5 ago. 2025.
- SEYMOUR, M. Interseção em Y com canalização de tráfego. *Boosted.dk*, 2023. Disponível em: <https://www.boosted.dk/vejkyds-kostede-430-millioner-kr-nu-er-man-loebet-toer-for-penge-og-asfalt/>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- SETYAWAN A., et al. Operational Improvement of Urban Roundabouts Using Geometric Adjustments. 2019.
- SHAFIEI, S.; GU, Z.; SABERI, M. Calibration and validation of a simulation-based dynamic traffic assignment model for a large-scale congested network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 86, p. 169-186, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.006>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- SILVA, V. Uso de microssimulação na análise de intervenções geométricas na interseção da rodovia Darly Santos com a Leste Oeste. Vitória: IFES, 2021.
- SILVEIRA, R. C. A poluição atmosférica e sonora decorrente do tráfego urbano. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4862/1/2008_dis_rcsilveira.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.
- SONG, L.; CHENG, H.; WANG, J.; YU, S.; DU, Y. Geometric and operational optimization at reversible unconventional arterial intersection reducing traffic emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 141, 104656, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104656>. Acesso em: 11 ago. 2025.
- SOUZA, F. A.; VERBAS, I. Ö.; AULD, J. A. Mesoscopic traffic flow model for agent-based simulation. *Procedia Computer Science*, v. 151, p. 858-863, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.118>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- SOUZA, J. V.; RAIJA JUNIOR, A. A. Segurança de pedestres em rotatórias urbanas. *Journal of Transport Literature*, v. 10, n. 4, p. 10-14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n4a2>.
- STAUDT, F. H.; MATTEI, D. O uso de microssimulação para alteração do tráfego urbano: estudo de caso na cidade de Joinville. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349536766_O_USO_DE_MICROSSIMULACAO_PARA_ALTERACAO_DO_TRAFEGO_URBANO_ESTUDO_DE_CASO_NA_CIDADE_DE_JOINVILLE. Acesso em: 5 ago. 2025.
- STEVANOVIC, A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice. TRB. 2010.
- TAPANI, A. A review of traffic simulation models. Linköping: Linköping University, 2008.
- TIAN, H.; FENG, Y.; ZHOU, W.; ANUPRIYA; QUDDUS, M.; DEMIRIS, Y.; ANGELOUDIS, P. The impact of building-induced visibility restrictions on

- intersection accidents. 2025. Preprint. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2503.05706>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- TORQUATO, R. M. N. Avaliação de alternativas para as interseções da Avenida Osório de Paiva com a Rua Raimundo Nery e com a Avenida Luiz Vieira utilizando microssimulação. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.
- TORQUATO, R. M. N. Estimação do efeito das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway capacity manual. 5th ed. Washington, D.C., 2010.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). Highway Capacity Manual: A guide for multimodal mobility analysis. 7th ed. Washington, D.C.: TRB, 2022.
- TRIBUNA DO NORTE. DNIT libera passagem inferior da Maria Lacerda sábado. Natal, 2018. Disponível em: <https://tribunadonorte.com.br/natal/dnit-libera-passagem-inferior-da-maria-lacerda-sabado/>. Acesso em: 6 ago. 2025.
- TXDOT. *Roundabout Analysis*. Texas Department of Transportation, 2020. Disponível em: <https://www.txdot.gov/manuals/des/tsp/chapter-12-roundabout-analysis/12-2-motorized-vehicle-capacity-methodology.html>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- ULLAH, R.; KHATTAK, K.; KHAN, Z. H. P. Eng.; KHAN, M. A.; MINALLAH, N.; KHAN, A. Vehicular traffic simulation software: a systematic comparative analysis. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350466666_Vehicular_Traffic_Simulation_Software_A_Systematic_Comparative_Analysis. Acesso em: 12 ago. 2025.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC). Comparação das estimativas de atraso veicular médio por diferentes metodologias. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Fortaleza: UFC, 2017.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Introdução à Teoria do Fluxo de Tráfego. São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes, 2019.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Semáforos inteligentes podem proporcionar um trânsito mais fluido e seguro. Jornal da USP, 2024. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/semaforos-inteligentes-podem-proporcionar-um-transito-mais-fluido-e-seguro/>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- VASCONCELLOS, E. A. O que é trânsito. São Paulo: Brasiliense, 2000.
- VASCONCELLOS, E. A. Transporte urbano nos países em desenvolvimento. São Paulo: Annablume, 2000.
- VASCONCELOS, Luís; SILVA, Ana Bastos; SECO, Álvaro. Capacity of normal and turbo-roundabouts: Comparative analysis. Case Studies on Transport Policy, v. 2, n. 2, p. 88-99, 2014.
- VICTORINO, M., 2013, "Microssimulação na otimização do tráfego com foco no desempenho ambiental". IV Simpósio de Pós-Graduação de Engenharia Urbana.
- WANG, X.; QIU, Z.; LIU, Z.; LIU, L. Real-world black carbon emissions of gasoline vehicles at urban intersections. Urban Climate, 55, 2024.

- WISDOT. WISCONSIN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Traffic Engineering, Operations & Safety Manual. Chapter 16: Traffic Analysis and Modeling, Section 20: Microscopic Simulation Traffic Analysis*. Madison, 2019. Disponível em: <https://wisconsindot.gov/dtsdManuals/traffic-ops/manuals-and-standards/teops/16-20.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- WISCONSIN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Traffic Engineering, Operations & Safety Manual. Chapter 16-20. Madison, WI, 2020. Disponível em: <https://wisconsindot.gov/dtsdManuals/traffic-ops/manuals-and-standards/teops/16-20.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2026.
- WU, N. Estimation of Queue Lengths and Their Percentiles at Signalized Intersections. *Tsinghua Science and Technology*, v. 13, n. S1, p. 178-185, 2008.
- WUNDERLICH, K. et al. Verification and Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models: A Primer. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2019.
- XIE, S.; CHEN, S.; ZHENG, N.; WANG, J. Modeling methodology of driver-vehicle-environment system dynamics in mixed driving situation. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2020. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304850>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348368509_Modeling_Methodology_of_Driver-Vehicle-Environment_System_Dynamics_in_Mixed_Driving_Situation. Acesso em: 11 ago. 2025.
- XU, C.; GAO, J.; ZUO, F.; OZBAY, K. Estimating urban traffic safety and analyzing spatial patterns through the integration of city-wide near-miss data: a New York City case study. *Applied Sciences*, v. 14, n. 14, p. 6378, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146378>.
- ZHANG, L.; QU, D.; ZHANG, X.; DAI, S.; WANG, Q. Vehicle driving behavior analysis and unified modeling in urban road scenarios. *Sustainability*, v. 16, n. 5, 1956, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16051956>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- ZHAO, J.; KNOOP, V. L.; WANG, M. Microscopic traffic modeling inside intersections: interactions between drivers. *Transportation Science*, v. 57, n. 1, p. 135-155, 2023. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/trsc.2022.1163>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- ZHAO, L.; FARHI, N.; CHRISTOFOROU, Z.; HADDADOU, N. Imitation of real lane-change decisions using reinforcement learning. *IFAC-PapersOnLine*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.023>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- ZHAO, M.; APPIAH, J. Methodology for Calibration and Validation of Mesoscopic Traffic Simulation Models. *VTRC Final Report FHWA/VTRC 22-R7*. Charlottesville: Virginia Transportation Research Council, 2021. Disponível em: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/22-r7.pdf. Acesso em: 12 ago. 2025.
- ZIEMSKA-OSUCH, W.; OSUCH, M. Evaluation of intersection performance using microsimulation and HCM delay-based LOS. *Sustainability*, v. 14, n. 9, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8945>. Acesso em: 12 ago. 2025.

ZRIGUI, I.; KHOULJI, S.; KERKEB, M. L. Adaptive traffic signal control using AI and distributed systems for smart urban mobility. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, [S.l.], v. 103, n. 8, p. 3532-3545, 30 abr. 2025. Disponível em: <https://www.jatit.org/volumes/Vol103No8/35Vol103No8.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.