



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



Vivian Fialho Alves

**Impactos operacionais e ambientais do sistema free flow
em praças de pedágio: estudo de caso por
microsimulação em trecho da BR-040**

Ouro Preto

2026

Vivian Fialho Alves

Impactos operacionais e ambientais do sistema free flow
em praças de pedágio: estudo de caso por
microsimulação em trecho da BR-040

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia Urbana da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheira Urbanista.

Orientadora: Dra. Bárbara Abreu Matos

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474i Alves, Vivian Fialho.

Impactos operacionais e ambientais do sistema free flow em praças de pedágio [manuscrito]: estudo de caso por microssimulação em trecho da BR-040. / Vivian Fialho Alves. - 2026.
203 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Bárbara Matos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Rodovias privatizadas. 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3. Engenharia de tráfego. 4. Impacto ambiental. 5. Simulação (Computadores). I. Matos, Bárbara. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vivian Fialho Alves

Impactos operacionais e ambientais do sistema free flow em praças de pedágio: estudo de caso por microsimulação em trecho da BR-040

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbanista

Aprovada em 25 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dra. Bárbara Abreu Matos - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Davi Antônio Avelar Bretas (ENGETRAF)
Me. Victor Hugo Gomes Albino (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bárbara Abreu Matos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Abreu Matos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/03/2026, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1070593** e o código CRC **CFAFDB90**.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não foi um processo simples, especialmente diante das dificuldades enfrentadas no uso e na compreensão do software empregado nas análises. Ainda assim, foi possível seguir adiante graças ao apoio e incentivo de pessoas fundamentais ao longo dessa trajetória.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, perseverança e tranquilidade nos momentos mais desafiadores desta etapa.

À minha orientadora, Bárbara Abreu, agradeço por acreditar na proposta deste estudo desde o início, pelo apoio à ideia do tema e pelas contribuições acadêmicas que permitiram o amadurecimento do trabalho.

À Bárbara Contarini, expresso minha gratidão pelo auxílio essencial na construção dos modelos, pela paciência, pela disponibilidade e pelo compartilhamento de conhecimentos técnicos, fundamentais ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, Argenil e Nitair, deixo meu mais profundo agradecimento. Sempre estiveram ao meu lado, nunca medindo esforços para fazer o que fosse necessário por mim, oferecendo apoio incondicional, incentivo constante e acreditando na importância da minha formação acadêmica. São, sem dúvida, meus maiores incentivadores e a base que tornou possível a conclusão deste trabalho.

Ao meu irmão, Adrian, agradeço pelo apoio, pela compreensão e pela presença ao longo desse percurso.

Por fim, agradeço aos amigos, em especial Agnes e Ludmila, que estiveram ao meu lado durante todo esse processo, oferecendo palavras de incentivo, motivação diária e apoio emocional, fundamentais para que eu chegasse à conclusão deste trabalho.

“All models are wrong, but some are useful.”

George E.P. Box

RESUMO

O crescimento das concessões rodoviárias no Brasil tem ampliado o debate sobre os modelos de cobrança de pedágio e a incorporação de tecnologias capazes de aprimorar o desempenho operacional e ambiental das rodovias concedidas. Nesse contexto, os sistemas de cobrança eletrônica em fluxo livre (*free flow*) surgem como alternativa aos modelos convencionais baseados em praças físicas, ao eliminarem paradas e interrupções do tráfego. Considerando a relevância estratégica da BR-040 como eixo de integração regional e logística, este trabalho avaliou os impactos operacionais, energéticos e ambientais associados à implantação de um sistema *free flow* em um trecho concedido da rodovia, por meio de simulação microscópica de tráfego. Foram analisados cenários representativos de volume médio e crítico, com comparação entre resultados obtidos em escala integrada do trecho e em análises pontuais no entorno das praças de pedágio em São Gonçalo do Abaeté, Felixlândia, Curvelo e Capim Branco. Os resultados indicam que os benefícios do sistema *free flow* manifestam-se de forma predominantemente localizada, com reduções expressivas de filas, paradas e tempo de atraso nas proximidades das praças, além de reduções relevantes de emissões veiculares de poluentes de impacto direto à saúde, enquanto em escala integrada os ganhos médios se mostram mais moderados. Como principal contribuição, o estudo evidencia a importância da adoção de análises em múltiplas escalas espaciais para a adequada avaliação dos impactos da cobrança eletrônica em fluxo livre, evitando a subestimação de benefícios relevantes quando apenas extensões longas são consideradas. Ressalta-se, por fim, que os resultados devem ser interpretados à luz das limitações inerentes aos modelos de consumo e emissões empregados, cujos parâmetros não foram calibrados especificamente para a frota brasileira, apontando a necessidade de avanços metodológicos em estudos futuros.

Palavras-chave: *Free flow*; Emissões Veiculares; Simulação de Tráfego; Praça de Pedágio; Congestionamento; Fluxo.

ABSTRACT

The growth of highway concessions in Brazil has intensified discussions regarding toll collection models and the incorporation of technologies capable of improving the operational and environmental performance of concessioned highways. In this context, free-flow electronic toll collection systems have emerged as an alternative to conventional toll plazas, as they eliminate vehicle stops and traffic interruptions. Considering the strategic relevance of BR-040 as a key corridor for regional integration and logistics, this study evaluated the operational, energy, and environmental impacts associated with the implementation of a free-flow system along a concessioned highway segment using microscopic traffic simulation. Scenarios representative of average and critical traffic volumes were analyzed, with a comparison between results obtained at an integrated corridor scale and localized analyses in the vicinity of toll plazas in São Gonçalo do Abaeté, Felixlândia, Curvelo and Capim Branco. The results indicate that the benefits of the free-flow system are predominantly localized, with substantial reductions in queues, stops, and delay times near toll plazas, as well as relevant reductions in vehicular emissions of pollutants with direct impacts on human health, while average gains at the corridor scale are more moderate. As a main contribution, the study highlights the importance of adopting multi-scale spatial analyses for the proper assessment of free-flow electronic toll collection impacts, avoiding the underestimation of relevant benefits when only long highway segments are considered. Finally, the results should be interpreted in light of limitations inherent to the fuel consumption and emission models applied, whose parameters were not specifically calibrated for the Brazilian vehicle fleet, indicating the need for methodological advances in future studies.

Keywords: Free flow; Vehicular emissions; Traffic simulation; Toll plaza; Congestion; Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Praça de pedágio convencional	18
Figura 2 - Modelo de pedágio sem cancela (<i>free flow</i>).....	20
Figura 3 - Exemplo de leitura de tag em pedágio sem cancela.....	22
Figura 4 - Exemplificação de sensores nos pórticos	23
Figura 5 - Pedágio com cobrança manual e automática	25
Figura 6 - Pedágio com cobrança manual e automática	25
Figura 7 - Localização das praças de pedágio no trecho de estudo	34
Figura 8 - Uso e Cobertura do Solo em 1995, na RMBH	37
Figura 9 - Uso e Cobertura do Solo em 2010, na RMBH	38
Figura 10 - Uso e Cobertura do Solo em 2024, na RMBH	39
Figura 11 - Etapas desenvolvidas até a execução da simulação	41
Figura 12 - Construção de vias no Aimsun através de Nós	43
Figura 13 - Processo de calibração de um simulador	45
Figura 14 - Praças de pedágio no trecho definido para simulação.....	47
Figura 15 - Exemplo de rede urbana construída no Aimsun	48
Figura 16 - Exemplos de centroides de origem e destino no Aimsun Next	49
Figura 17 - Leitor de arquivo simples do conjunto de dados reais no Aimsun Next ..	55
Figura 18 - Matriz OD criada para a classe caminhão com volume crítico.....	56
Figura 19 - Demanda de tráfego criada para o volume crítico.....	56
Figura 20 - Exemplo de parâmetros do Modelo Panis <i>et al.</i> no Aimsun	61
Figura 21 - Representação de veículos na fila de espera da praça de pedágio.....	63
Figura 22 - Representação de veículos passando por uma rodovia no Aimsun Next	63

Figura 23 - Representação de veículos passando pelas cabines de uma praça de pedágio	64
Figura 24 - Sumário de resultados após fim de replicação em um cenário no Aimsun Next.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Ambientais disponibilizados no manual do Aimsun	58
Tabela 2 - Resultados do cenário médio para as Praças 4 e 5 (parâmetros operacionais).....	66
Tabela 3 - Resultados do cenário crítico para as Praças 4 e 5 (parâmetros operacionais).....	67
Tabela 4 - Resultados do cenário médio para a praça 6 (parâmetros operacionais)	68
Tabela 5 - Resultados do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros operacionais)	69
Tabela 6 - Resultados do cenário médio para a praça 7 (parâmetros operacionais)	70
Tabela 7 - Resultados do cenário crítico para a praça 7 (parâmetros operacionais)	71
Tabela 8 - Resultados do cenário médio para as Praças 4 e 5 (parâmetros ambientais)	75
Tabela 9 – Resultados do cenário crítico para as Praças 4 e 5 (parâmetros ambientais)	76
Tabela 10 – Resultados do cenário médio para a praça 6 (parâmetros ambientais)	77
Tabela 11 – Resultados do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros ambientais).	78
Tabela 12 – Resultados do cenário médio para a praça 7 (parâmetros ambientais)	79
Tabela 13 – Resultados do cenário crítico para a praça 7 (parâmetros ambientais).	80
Tabela 14 – Resultados da análise pontual do cenário médio para a praça 6 (parâmetros operacionais).....	85
Tabela 15 - Resultados da análise pontual do cenário médio para a praça 6 (parâmetros ambientais)	86
Tabela 16 - Resultados da análise pontual do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros operacionais).....	87
Tabela 17 - Resultados da análise pontual do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros ambientais)	88

LISTA DE SIGLAS

ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre

AVI – Identificação Automática de Veículos (*Automatic Vehicle Identification*)

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EPEC – *European PPP Expertise Centre*

EPL – Empresa de Planejamento e Logística

ETC – *Electronic Toll Collection* (Cobrança Eletrônica de Pedágio)

FHWA - *Federal Highway Administration*

GOV – Governo Federal

HCM – *Highway Capacity Manual*

LEM – *London Emission Model*

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPVA – Imposto sobre Propriedades de Veículos Automotores

ISS – Imposto Sobre Serviços

ITS – *Intelligent Transport Systems* (Sistema de Transporte Inteligente)

LOS – *Level of Service* (Nível de Serviço)

MPF – Ministério Público Federal

OBD – *On-Board Diagnostics*

OBU – *On-Board Unit*

OD – Origem-Destino

ODS – Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*

OMS – Organização Mundial da Saúde (OMS)

ORT – *Open Road Tolling*

OSM – *Open Street Map*

PER – Programa de Exploração da Rodovia

PRF – Polícia Rodoviária Federal

PRN – Plano Rodoviário Nacional

PROCOFE – Programa de Concessões de Rodovias Federais

RFID – *Radio-Frequency Identification*

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

RPA – Rodovia de Pedágio Aberto

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TCU – Tribunal de Contas da União

TRB – *Transportation Research Board*

VMD – Volume Médio Diário

VMS – *Variable Message Signs*

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.1.1	Objetivos Específicos	3
1.2	Justificativa	4
2.	Revisão Bibliográfica.....	7
2.1	Rodovias no Cenário Brasileiro	7
2.2	Concessões Rodoviárias	9
2.2.1	A Interferência das Concessões no Entorno das Rodovias e sua Influência no Uso e Ocupação do Solo.....	15
2.3	Pedágio	17
2.3.1	Sistema <i>Free Flow</i> : Impactos e Experiências de Implementação	27
3.	Área de Estudo: BR-040	31
3.1	A importância da BR-040 no Contexto Metropolitano.....	34
4.	Metodologia	41
4.1	Simulação de tráfego utilizando o software Aimsun	41
4.1.1	Calibração do modelo.....	43
4.1.2	Medidas de desempenho e parâmetros significantes sobre o resultado da simulação.....	45
4.2	Construção e execução da simulação das praças de pedágio na BR-040	46
5.	Resultados	65

5.1 Análise pontual da Praça 6	84
6. Conclusão	94
7. Referências	98
APÊNDICE A – PRAÇAS 4 E 5	118
A.1 Cenário Médio	118
A.2 Cenário Crítico	130
APÊNDICE B – PRAÇA 6	143
B.1 Cenário Médio	143
B.2 Cenário Crítico	150
APÊNDICE C – PRAÇA 7	158
C.1 Cenário Médio – P7 Crescente	158
C.2 Cenário Crítico – P7 Crescente.....	165
C.3 Cenário Médio – P7 Decrescente	173
C.4 – Cenário Crítico – P7 Decrescente.....	180
APÊNDICE D – ANÁLISE PONTUAL PRAÇA 6.....	187
D.1 Cenário Médio.....	187
D.2 Cenário Crítico	195
APÊNDICE E – Comprovação de Recebimento de VMD pela empresa Imtraff Engenharia e Mobilidade.....	203

1. Introdução

A malha rodoviária brasileira desempenha papel central na logística nacional, concentrando cerca de 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros no país (CNT, 2023). Essa predominância, no entanto, convive com desafios históricos relacionados à manutenção, segurança e fluidez do tráfego, agravados pela concentração de investimentos em poucas vias e pela precariedade dos trechos não concedidos.

A Pesquisa CNT de Rodovias (2024), ao avaliar 111.853 quilômetros da malha viária brasileira, apontou que a maior parte dessa extensão, 75.039 quilômetros (67,0%), foi classificada como Regular, Ruim ou Péssima, enquanto apenas 36.814 quilômetros (33,0%) foram considerados em condição Boa ou Ótima. Destaca-se ainda que 45.263 quilômetros (40,4%) foram avaliados como regulares, sinalizando iminente deterioração. Sem ações de manutenção adequadas e em tempo hábil, esses segmentos tendem a evoluir para estados mais críticos (CNT, 2024).

A comparação por modelo de gestão evidencia diferenças relevantes entre rodovias públicas e concessionadas. No contexto brasileiro, a concessão rodoviária consiste na delegação da administração, operação, manutenção e exploração da infraestrutura viária à iniciativa privada, mediante contrato firmado com o poder público e regido pela Lei nº 8.987/1995. Entre as vias sob gestão privada, 63,1% da extensão avaliada (17.814 quilômetros) apresenta condições satisfatórias, enquanto apenas 22,7% das rodovias sob gestão pública, cerca de 19 mil quilômetros, foram classificadas como em boas condições (CNT, 2024). Esse contraste indica que as concessões têm desempenhado papel relevante na qualificação da infraestrutura rodoviária, em um contexto no qual o Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), instituído pela Lei nº 13.334/2016, inclui concessões rodoviárias como instrumento de viabilização de investimentos em infraestrutura (BRASIL, 2016).

Nesse contexto, a cobrança de tarifa nas concessões rodoviárias tornou-se elemento estruturante do modelo contratual, por representar o principal mecanismo de financiamento da manutenção, conservação e melhoria da malha viária. No modelo

convencional, essa arrecadação ocorre por meio de praças físicas de pedágio. No entanto, apesar dos efeitos positivos em termos operacionais e de investimento, tais dispositivos podem produzir externalidades negativas, como a fragmentação territorial de comunidades vizinhas (Rahmadana; Putra, 2025). A presença de barreiras físicas pode induzir à desintegração espacial, à reconfiguração dos fluxos urbanos e até à desvalorização de áreas isoladas pelas estruturas tarifárias.

Diante disso, modelos como o sistema de pedágio eletrônico sem barreiras físicas, o *free flow*, têm ganhado espaço em diversos países e começam a ser testados no Brasil. Ao eliminar cabines de cobrança e faixas restritas, esse modelo tem o potencial de melhorar a fluidez dos deslocamentos e reduzir impactos territoriais negativos, ao minimizar congestionamentos, diminuir emissões de poluentes e eliminar barreiras físicas (Lin *et al.*, 2020; *European Commission*, 2015), contribuindo para maior integração dos fluxos locais.

Além dos aspectos operacionais, é importante destacar que a infraestrutura rodoviária exerce influência direta sobre as atividades econômicas e o ordenamento territorial. No Brasil, o transporte de cargas e passageiros está intimamente ligado ao desempenho das rodovias, o que também se reflete em questões sociais e ambientais (Mattei, 2017). Rodovias mal projetadas ou em condições precárias elevam o consumo de combustível, os custos logísticos e os riscos de acidentes. Por outro lado, regiões atendidas por malhas bem conservadas tendem a ser favorecidas em termos de competitividade e atração de investimentos, pois viabilizam o escoamento eficiente da produção, o transporte de insumos e o deslocamento da força de trabalho (Mattei, 2017). Nesse sentido, o investimento em infraestrutura rodoviária revela-se estratégico para o desenvolvimento regional e a integração territorial.

Considerando essas transformações tecnológicas e seus reflexos no território, a aplicação de metodologias de simulação de tráfego tem se mostrado uma ferramenta relevante para avaliar previamente diferentes alternativas de pedagiamento. Softwares de simulação, como o Aimsun, permitem modelar cenários variados de operação, incluindo configurações com pedágio eletrônico, possibilitando uma análise detalhada de indicadores como tempo de viagem, formação de filas e volume de

tráfego (Poon; Dia, 2005). Esse tipo de abordagem contribui para decisões mais fundamentadas, tanto no âmbito das políticas públicas quanto da gestão privada.

Neste cenário, a BR-040, especialmente o trecho sob responsabilidade da concessionária Via Cristais, que liga Minas Gerais a Goiás, destaca-se como objeto relevante de estudo. Ainda operando com praças físicas convencionais, mas situada em uma região com forte dinamicidade urbana e rural, essa rodovia integra o contexto nacional de modernização das concessões. Por isso, oferece condições adequadas para se avaliar comparativamente os efeitos da transição entre modelos de tarifação. Adicionalmente, a apresentação de mapas históricos que evidenciam a evolução espacial da BR-040 ao longo das últimas décadas, elaborados com base em dados geoespaciais públicos, contribui para situar o papel da rodovia na organização do território, oferecendo um panorama da transformação do seu traçado e de sua relação com o entorno ao longo do tempo.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é analisar, por meio de simulação de tráfego, os efeitos operacionais, energéticos e ambientais da substituição do sistema de pedágio convencional pelo sistema *free flow* na BR-040, em um trecho da Rota dos Cristais.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Simular o desempenho de praças de pedágio convencionais e do sistema *free flow*, avaliando indicadores operacionais, energéticos e ambientais, como tempo de atraso, número de paradas, velocidade média, consumo de combustível e emissões veiculares.
- Analisar os impactos operacionais dos diferentes modelos de cobrança de pedágio sobre o desempenho do tráfego e os tempos de deslocamento no trecho estudado da BR-040.
- Avaliar a influência da escala espacial de análise, comparando a abordagem integrada do trecho estudado com a análise pontual na zona de influência da praça, sobre a magnitude dos impactos operacionais,

energéticos e ambientais associados aos modelos de cobrança de pedágio.

1.2 Justificativa

A modernização da infraestrutura rodoviária no Brasil tem avançado com a adoção gradual do sistema de pedágio eletrônico por livre passagem (*free flow*), que permite a tarifação automática com base na distância percorrida, por meio de sensores e câmeras, eliminando a necessidade de praças físicas com cancelas. A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) tem regulamentado a migração progressiva para esse modelo no âmbito das concessões federais, destacando que a substituição de praças físicas pode conferir maior segurança viária, redução de emissões, menos tempo de viagem, economia com TAG e maior fluidez dos deslocamentos (ANTT, 2025; ANTT, s.d.a).

No Brasil, o sistema vem sendo testado em trechos como o da BR-101/RJ-ES, operado pela concessionária Eco101, no âmbito do *sandbox* regulatório promovido pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2025). Mais recentemente, a cobrança eletrônica em livre passagem também passou a operar na BR-381/MG, ampliando a adoção do modelo em rodovias federais concedidas (ANTT, 2025d). Experiências estaduais incluem sua implementação nas rodovias ERS-122, ERS-446 e ERS-240, no Rio Grande do Sul, administradas pela Caminhos da Serra Gaúcha (CSG), a partir de 2024 (Edenred, 2024).

Apesar desses avanços, a maioria das concessões federais ainda opera com pedágios convencionais, como é o caso da BR-040 no trecho entre Belo Horizonte/MG e Cristalina/GO, sob responsabilidade da concessionária Via Cristais, que mantém 7 praças físicas em funcionamento (Via Cristais, 2025). Embora esse trecho ainda não conte com previsão de migração para o *free flow*, outro segmento da mesma rodovia — entre Belo Horizonte e Juiz de Fora, atualmente concedido à EPR Via Mineira — já avalia a viabilidade de adoção futura do sistema eletrônico (Agência Gov, 2024). Nesse cenário, o trecho concedido à Via Cristais se revela oportuno para a realização de uma análise comparativa entre os sistemas de pedágio, considerando a transição

potencial e seus efeitos sobre a fluidez viária, a acessibilidade e as dinâmicas territoriais.

Adicionalmente, este estudo se insere em uma lacuna ainda pouco explorada no cenário científico brasileiro ao investigar de forma integrada o desempenho operacional, energético e os impactos ambientais associados à transição de sistemas convencionais de cobrança de pedágio para modelos eletrônicos de livre passagem (*free flow*). Embora já se observe a adoção de sistemas de pedágio eletrônico e de cobrança automática em alguns trechos rodoviários no Brasil, a literatura acadêmica nacional ainda apresenta baixa recorrência no que se refere a estudos empíricos e quantitativos que avaliem, de maneira conjunta, os impactos operacionais, energéticos e ambientais desse modelo de cobrança.

No âmbito internacional, a literatura sobre sistemas de cobrança eletrônica e *free flow* indica que a eliminação de interrupções associadas às praças de pedágio tende a melhorar a fluidez do tráfego, reduzir ciclos de parada e retomada de velocidade e, consequentemente, diminuir o consumo de energia e de combustível em comparação com sistemas manuais (Pérez-Martínez *et al.*, 2011; Tseng *et al.*, 2014; Weng *et al.*, 2015). Além da literatura acadêmica, a adoção prática do sistema em projetos internacionais reforça a relevância dessa discussão. Iniciativas de implantação de sistemas *multi-lane free flow*, como o projeto DARS na Eslovênia, financiado pelo European Investment Bank, têm sido estruturadas com a finalidade de modernizar a cobrança tarifária e promover maior eficiência operacional, estando associadas à expectativa de redução de tempos de espera, consumo de combustível e emissões decorrentes da eliminação de barreiras físicas (EIB, 2017).

A consolidação dessas iniciativas no cenário internacional evidencia que a transição para modelos de livre passagem ultrapassa o campo teórico e se consolida como alternativa concreta de política e investimento em infraestrutura rodoviária, o que reforça a pertinência de avaliações quantitativas aplicadas ao contexto brasileiro. Em análise agregada ao longo de segmentos rodoviários extensos, esses efeitos operacionais podem resultar em reduções percentuais mais modestas, uma vez que os impactos localizados da praça de pedágio se diluem na média espacial de um

trecho maior. Tal perspectiva reforça a importância de avaliações que considerem diferentes escalas espaciais na análise dos sistemas de cobrança.

Nesse sentido, as evidências geradas por este trabalho agregam subsídios quantitativos à discussão no cenário acadêmico brasileiro e contribuem para o debate técnico-científico e de políticas públicas sobre a modernização da infraestrutura rodoviária. Ademais, a análise proposta alinha-se diretamente aos princípios da Agenda 2030, das Nações Unidas, dialogando com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao avaliar alternativas de operação e investimento voltadas à melhoria da qualidade, confiabilidade e eficiência da infraestrutura viária e com o ODS 13 (Combate às Alterações Climáticas) ao incorporar indicadores energéticos e ambientais na análise dos impactos associados ao transporte rodoviário, explorando o potencial de mitigação associadas à redução de congestionamentos e ao aumento da eficiência dos deslocamentos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Rodovias no Cenário Brasileiro

O desenvolvimento das rodovias no Brasil tem raízes em políticas de Estado voltadas à integração nacional desde meados do século XX. Em 1944, foi instituído o Plano Rodoviário Nacional (PRN), cuja missão era promover a interligação de regiões por meio de uma rede viária articulada de norte a sul do país (Ministério dos Transportes, 2020).

O marco inaugural da política rodoviária no Brasil ocorreu durante o governo de Washington Luís (1926–1930), cujo lema “Governar é abrir estradas” expressava uma diretriz clara de priorização desse modal. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), criado em 1937, foi o primeiro órgão federal dedicado à estruturação rodoviária (Ministério do Transporte, 2020). No entanto, foi sob o governo de Juscelino Kubitschek (1956–1961) que o país vivenciou uma intensificação das obras rodoviárias, com a construção de vias estratégicas como a BR-040 (Rio de Janeiro – Brasília), contribuindo para a integração de regiões e para o escoamento da produção industrial emergente.

A regulamentação do transporte rodoviário de cargas e passageiros passou a ocupar papel central nas políticas públicas de mobilidade, resultando na formulação de normas específicas voltadas ao setor. Paralelamente, a crescente preocupação com a segurança viária impulsionou o endurecimento da legislação de trânsito e a estruturação de órgãos responsáveis pela fiscalização e controle das atividades nas rodovias.

A consolidação do modelo rodoviário no Brasil está relacionada à sua função geopolítica de integração territorial. Conforme destacam Souza *et al.* (2023), a construção de rodovias a partir da década de 1930 foi uma estratégia deliberada de ocupação e de coesão territorial, sobretudo em áreas distantes como a Amazônia e o Centro-Oeste, posteriormente reforçada pelo deslocamento da capital federal para Brasília.

A partir das décadas de 1940 e 1950, a expansão das rodovias no Brasil acelerou-se significativamente, sustentada por três grandes iniciativas. Primeiramente, a criação do Fundo Rodoviário Nacional, em 1946, que instituiu um imposto sobre combustíveis para financiar a construção de estradas pela União e os estados. Em seguida, a fundação da Petrobrás, em 1954, que viabilizou a produção em larga escala de asfalto no país. Por fim, a instalação da indústria automobilística nacional, a partir de 1957, que elevou a demanda por infraestrutura rodoviária adequada (CEPA, s.d).

Esses fatores contribuíram para consolidar o predomínio do transporte rodoviário como eixo estruturante da logística nacional, em um processo que se intensificou com os sucessivos planos de desenvolvimento implementados nas décadas seguintes. O investimento contínuo em estradas, aliado à ausência de uma política de transportes integrada, resultou em uma matriz de transportes fortemente concentrada no modal rodoviário, em detrimento de alternativas como o transporte ferroviário e hidroviário, historicamente mais eficientes para longas distâncias e grandes volumes de carga (IPEA, 2010). Essa concentração impôs desafios logísticos importantes, como o aumento dos custos operacionais e a vulnerabilidade a problemas de conservação viária.

Ao longo dos anos, a malha rodoviária federal se expandiu, mas sem que o crescimento fosse acompanhado por uma política estruturada de manutenção e requalificação (Mucci, 2011). O resultado foi a deterioração gradual de grande parte das vias. A crise fiscal enfrentada pelo Estado a partir da década de 1980 agravou essa situação, levando à redução significativa dos investimentos públicos em infraestrutura e à estagnação de projetos estratégicos (IPEA, 2010; Pereira; Lessa, 2011). Segundo análise do IPEA (2010), a ausência de planejamento de longo prazo e a descontinuidade dos recursos destinados ao setor comprometeram a qualidade da malha viária, com impactos negativos sobre a segurança no trânsito, os custos logísticos e a mobilidade da população.

Nesse contexto, a partir da década de 1990, o Brasil passou a buscar alternativas de gestão e financiamento para as rodovias, orientando-se por uma lógica de descentralização e inserção do setor privado nas operações de infraestrutura (Ferreira et. al, 2021; Fernandes, 2018). A adoção do modelo de concessão surgiu como resposta à necessidade de modernizar trechos rodoviários, garantir a conservação contínua das vias e ampliar a capacidade de atendimento da malha federal, sem depender exclusivamente do orçamento público. Esse movimento representou uma mudança significativa no paradigma de gestão rodoviária e passou a ter papel central nas políticas públicas de transporte.

Assim, o avanço das concessões rodoviárias no Brasil, revela uma nova etapa na governança da infraestrutura viária. Trata-se de um modelo que envolve diversos atores, como o poder concedente, as agências reguladoras, as empresas concessionárias e os usuários, e que exige mecanismos de controle, transparência e equilíbrio entre o interesse público e a sustentabilidade econômico-financeira dos contratos firmados.

2.2 Concessões Rodoviárias

Segundo o IPEA (2010), a evolução do sistema rodoviário brasileiro pode ser compreendida a partir de três fases principais: a primeira, entre 1950 e 1970, a qual foi marcada pela expansão estatal, onde o país favoreceu o investimento público em malha viária, sobretudo por meio do Fundo Rodoviário Nacional. Nesse período, a priorização do transporte rodoviário visava consolidar um modelo de industrialização e integração nacional (Pereira; Lessa, 2011). A segunda fase, nas décadas de 1980 e 1990, foi caracterizada pela crise de financiamento decorrente do fim da vinculação de receitas e do agravamento da crise fiscal, o que resultou na redução de investimentos em manutenção e pavimentação (IPEA, 2010; Vargas; Scatolin, 2007). A partir de meados da década de 1990, inicia-se a terceira fase, centrada na reestruturação do setor por meio da abertura ao capital privado, com destaque para a promulgação da Lei nº 8.987/1995 (Lei das Concessões), que estabeleceu o marco legal das concessões públicas no Brasil.

Nesse contexto, foi criado o Programa de Concessões de Rodovias Federais (PROCOFE), desenvolvido pelo Ministério dos Transportes em conjunto com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), visando transferir à iniciativa privada a responsabilidade pela recuperação, ampliação, operação e manutenção de trechos rodoviários estratégicos. Em sua fase inicial, o programa licitou cinco lotes, totalizando 858,6 km, e após sua revisão fundamentada em estudos técnicos realizados nos anos de 1997 e 1998, foram identificados mais de 11.000 km aptos à concessão integral, além de cerca de 6.800 km que poderiam ser mantidos sob regime de manutenção, por não apresentarem viabilidade para cobrança de pedágio (ANTT, s.d.b). Dentre os trechos considerados relevantes, foram incluídos trechos importantes para o corredor logístico nacional, como a BR-381 entre Belo Horizonte e São Paulo, e o eixo BR-116/BR-376-BR-101 entre São Paulo, Curitiba e Florianópolis, já trechos como os de Goiás e Pará, considerados sem viabilidade econômica, foram posteriormente excluídos (ANTT, s.d.b).

A primeira grande estrutura rodoviária concedida no país foi a da Ponte Rio–Niterói, que se tornou referência para o aprimoramento dos modelos contratuais e regulatórios subsequentes (Ministério dos Transportes, 2020). A partir dessa experiência inicial, os contratos evoluíram por meio de diferentes fases, incorporando cláusulas de desempenho, revisão periódica e mecanismos de controle mais sofisticados.

Paralelamente, a Lei nº 9.277/1996 (Lei das Delegações) permitiu a delegação de trechos da malha federal para estados e municípios, impulsionando a descentralização da gestão rodoviária (Brasil, 1996). Essa estratégia foi regulamentada pela Portaria nº 368/1996, que viabilizou convênios com entes federativos como Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e Minas Gerais (Huertas, 2017). Em 2000, a Resolução nº 8 do Conselho Nacional de Desestatização (CND) recomendou a revisão da política de delegações e autorizou a unificação da política de concessões no âmbito do governo federal (ANTT, 2022).

Para alcançar resultados eficazes na melhoria da segurança viária, diversas estratégias têm sido pautadas na qualificação da infraestrutura rodoviária (Albalade;

Bel-Piñana, 2019). No entanto, segundo Albalade e Bel-Piñana (2019), diante de restrições fiscais e pressões orçamentárias, diversos governos passaram a buscar alternativas para expandir e melhorar a infraestrutura rodoviária sem ampliar significativamente o endividamento público. Dito isso, as parcerias público-privadas consolidaram-se como uma das estratégias adotadas para viabilizar investimentos em novas vias e na modernização das existentes, especialmente em países onde a limitação de recursos públicos demandava mecanismos complementares de financiamento (Hammami *et al.*, 2006).

No caso brasileiro, entretanto, tais arranjos coexistem com programas de investimento público direto em infraestrutura rodoviária. Em âmbito federal, têm-se o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), um amplo programa de investimentos que abrange transporte, mobilidade, saneamento e outras áreas estruturais, e que inclui execução de obras viárias com recursos orçamentários próprios (BRASIL, 2025). No contexto estadual, iniciativas como o Pró-Acesso (DER-MG, 2012) e o Programa Caminhos pra Avançar, em Minas Gerais, mobilizam recursos públicos para recuperação, pavimentação e melhoria de rodovias sob gestão estadual (Governo de Minas Gerais, 2025). Esse conjunto de experiências evidencia a presença simultânea de diferentes arranjos institucionais na provisão da infraestrutura rodoviária no país.

Segundo relatórios do Tribunal de Contas Europeu (2018), as Parcerias Público-Privadas (PPPs) podem oferecer vantagens importantes frente aos contratos públicos tradicionais, como padrões mais elevados de manutenção, maior rapidez na implementação de políticas públicas e maior potencial de geração de valor quando bem estruturadas. Essas características são possíveis, em parte, pela maior flexibilidade contratual, pela transferência de riscos ao setor privado e pela adoção de modelos com foco em desempenho. Ainda de acordo com os relatórios, embora desafios como atrasos e sobrecustos sejam observados em alguns casos, as PPPs representam uma alternativa viável para a entrega de infraestrutura pública com maior qualidade, especialmente em contextos de restrições orçamentárias (*European Court of Auditors*, 2018).

Complementarmente, o *European PPP Expertise Centre* (EPEC, 2016) reforça que as PPPs têm o potencial de incentivar a inovação e a eficiência, uma vez que o setor privado tende a adotar soluções tecnológicas mais avançadas e integrar melhor os diferentes estágios do projeto, desde o planejamento até a operação. Essa abordagem integrada contribui para reduzir falhas de coordenação, melhorar o desempenho dos serviços e potencializar economias de escala, fatores importantes em projetos de concessão rodoviária (EPEC, 2016). Tais ganhos se manifestam também na melhoria da segurança viária, na redução de acidentes e na diminuição dos custos operacionais, conforme observado por Burningham e Stankevich (2005).

Pesquisas de Fernald (1999), Tripathi e Gautam (2010) e Farhadi (2015) indicam que os investimentos em infraestrutura de transporte impactam positivamente a produtividade de regiões e empresas, tanto em escala macroeconômica quanto microeconômica. Um estudo realizado no Reino Unido, corrobora com estas pesquisas: Segundo Gibbons *et al.* (2019), as análises de regressão em nível distrital indicam evidências consistentes de que programas de melhoria viária elevam o número de estabelecimentos e postos de trabalho em áreas que passam a ter melhor acesso à rede, em comparação às demais. Além disso, um estudo chinês de 2024, apontou que infraestrutura de transporte amplifica a produtividade urbana por meio da aglomeração econômica e efeitos espaciais positivos (Wan, et. al., 2024).

No Brasil, De Ávila *et al.* (2021) reforçam essa perspectiva ao relacionar a redução de custos logísticos e econômicos e a dinamização das atividades econômicas, diretamente à eficiência do sistema rodoviário decorrente da melhoria nas rodovias. Nesse sentido, o modelo de concessões adotado no país passou a contemplar cláusulas contratuais específicas, como os Programas de Exploração da Rodovia (PER), que detalham metas físicas, padrões geométricos, serviços obrigatórios de socorro médico e mecânico, além de diretrizes de desempenho e de conservação contínua (Ministério dos Transportes, 2025).

Atualmente, cerca de 15.266,44 km da malha rodoviária federal estão sob concessão regulada pela ANTT, distribuídos em 31 contratos ativos (ANTT, 2025). Com base em diretrizes regulatórias, como a Resolução nº 5.926/2021, e em decisões

da ANTT, a cobrança por pedágio nas concessões viárias tornou-se o principal mecanismo para garantir a manutenção contínua, operação segura e investimentos estruturais, especialmente em trechos de tráfego intenso (ANTT, 2021). A transição para sistemas eletrônicos, inclusive em modelos *free flow* desde 2023–2024, reforça o foco em modernização da infraestrutura e melhoria da fluidez viária, com impactos diretos na capacidade de manter qualidade técnica em longo prazo (ANTT, 2025a).

A Confederação Nacional do Transporte (CNT), em sua análise de 2023, observou que 67,1% da malha concedida se encontrava em condições classificadas como "ótimas" ou "boas", enquanto esse percentual era de apenas 32,4% nas rodovias sob gestão pública. A CNT destaca ainda que a deterioração do pavimento eleva os custos operacionais do transporte rodoviário, de modo que melhores condições da infraestrutura viária tendem a contribuir para sua redução (CNT, 2022).

A melhoria da infraestrutura e da logística nas regiões próximas às rodovias concedidas gera economias de aglomeração, ao facilitar o deslocamento de pessoas e mercadorias, aumentando a atratividade territorial e impulsionando o desenvolvimento econômico regional, conforme evidenciado na pesquisa de Bird e Straub (2020). Além disso, os contratos de concessão mais recentes incorporam diretrizes voltadas à sustentabilidade, com exigências que promovem práticas ambientalmente responsáveis. Rodovias bem conservadas contribuem para a eficiência do transporte, resultando em menor consumo de combustíveis e na redução das emissões de gases de efeito estufa (CNT, 2023).

Apesar dos avanços evidentes, ainda há lacunas significativas na literatura quanto à mensuração dos impactos econômicos, sociais e territoriais das concessões rodoviárias no Brasil. Embora exista consenso de que os investimentos em infraestrutura promovem o crescimento econômico, como destacam Calderón e Servén (2004), Queiroz (2017) e Ferreira *et al.*, (2019), são escassas as análises que examinam com profundidade os resultados específicos das concessões. Farhadi (2015) argumenta que, embora o retorno da infraestrutura seja geralmente positivo, ele pode ser menos expressivo que os de outros investimentos, como os em educação e inovação. Pivatto (2017), por sua vez, identificou um descompasso entre os prazos

contratuais das concessões da chamada terceira fase brasileira e o tempo efetivamente necessário para o cumprimento das metas pactuadas, indicando a necessidade de reavaliação do modelo vigente por parte do setor público.

Segundo Arcanjo *et al.* (2023), a análise das demonstrações contábeis das concessionárias de rodovias constitui um instrumento essencial para o exercício das funções reguladora e fiscalizadora do Estado. Arcanjo *et al.* (2023) ressaltam ainda, que através desses demonstrativos, é possível verificar se os parâmetros econômicos e financeiros definidos no contrato de concessão estão sendo devidamente observados, assegurando a continuidade e a qualidade dos serviços prestados aos usuários, sem prejuízo aos interesses dos entes públicos ou privados envolvidos no processo concessório.

Assim como Arcanjo *et al.* (2023), Gomes (2015) destaca que a avaliação do desempenho econômico-financeiro das concessionárias é uma ferramenta relevante para verificar a eficiência dos contratos de concessão, especialmente no que diz respeito à promoção do bem-estar das partes envolvidas, governo, operadores privados e usuários.

Nesse sentido, contratos são considerados eficientes quando possibilitam às concessionárias obter retorno financeiro compatível com os riscos assumidos, sem descumprir as obrigações contratuais relativas à prestação de serviços adequados e à manutenção da infraestrutura rodoviária.

Diante disso, a literatura carece de estudos empíricos que analisem com maior rigor a efetividade dos contratos de concessão em relação aos seus objetivos declarados. Entre os principais desafios identificados estão a avaliação dos mecanismos contratuais que garantem o cumprimento das metas, o mapeamento dos impactos diferenciados sobre regiões atendidas pelas concessões e a análise da sustentabilidade dos modelos no longo prazo, inclusive no que se refere à gestão pós-contratual. Além disso, é fundamental compreender como os ganhos econômicos e logísticos se distribuem social e territorialmente, evitando a concentração de benefícios e promovendo a equidade no acesso à infraestrutura.

2.2.1 A Interferência das Concessões no Entorno das Rodovias e sua Influência no Uso e Ocupação do Solo

A geografia dos transportes enfatiza que sistemas de infraestrutura viária, ao modificar acessibilidade e conectividade entre localidades, influenciam a organização espacial das atividades econômicas e sociais, podendo afetar padrões de uso e ocupação do solo em regiões servidas por essas redes (Rodrigue, 2024). De acordo com Oliveira (2016), a transferência da gestão das rodovias à iniciativa privada altera significativamente a lógica territorial ao estabelecer infraestruturas que priorizam a fluidez e a circulação de mercadorias, muitas vezes em detrimento das necessidades sociais locais. Essa reorganização atende a uma lógica global de aceleração da rotatividade do capital, conforme argumentado por Harvey (2013), sendo o território instrumentalizado para favorecer os interesses do capital produtivo e financeiro. A influência das concessões pode variar, a depender do Estado.

Oliveira (2016) destaca também como os pedágios têm um impacto desigual sobre a população, pois afetam de forma similar pessoas com diferentes condições financeiras. Como a grande maioria dos produtos consumidos pelas classes mais baixas é transportada por rodovias, as tarifas das concessionárias acabam elevando o custo de vida dessas famílias. No Brasil, as principais regiões produtivas do Sudeste e Sul estão cercadas por praças de pedágio, fazendo com que praticamente todo deslocamento rodoviário de maior relevância econômica esteja submetido a esse custo adicional (Oliveira, 2016).

As maiores consequências do aumento nos custos de deslocamento recaem sobre passageiros e mercadorias de baixo valor agregado, particularmente alimentos básicos e materiais de construção (Oliveira, 2016). A contrapartida da melhor qualidade no pavimento e sinalização das rodovias concedidas é o aumento dos custos para circulação. Em síntese, constata-se uma diversidade tanto nos modelos contratuais quanto nas características das rodovias concedidas. Nos estados com maior dinamismo nos setores industrial e de serviços, especialmente aqueles que abrigam regiões metropolitanas populosas, observa-se uma configuração espacial

característica, onde as concessionárias estabelecem um sistema de cobrança que envolve os principais acessos a essas áreas urbanas.

Sposito (2015) salienta que estabelecer uma unidade produtiva em um município localizado às margens ou nas proximidades de uma rodovia concedida representa, para a empresa, a garantia de uma infraestrutura viária de qualidade por um longo período, geralmente entre 20 e 30 anos, conforme o prazo contratual. Essa condição contribui para a redução de custos com manutenção de veículos e maior eficiência no transporte. Em contraste, municípios atendidos por rodovias em condições precárias ou sem previsibilidade de conservação apresentam maior risco logístico e podem gerar custos operacionais mais elevados. Contudo, os efeitos negativos são igualmente expressivos (Sposito, 2015).

Mattei (2017) ressalta que a operação e gestão de rodovias possuem caráter de interesse coletivo, abrangendo não apenas ações de conservação, manutenção e ampliação da malha viária, mas também a regulação do tráfego e o suporte aos usuários. Por isso, as concessões rodoviárias devem atender ao interesse público de forma ampla, indo além da simples relação entre usuário e concessionária. A prestação dos serviços, viabilizada pela cobrança de pedágio, inclui não apenas a manutenção física da rodovia, mas também medidas de segurança viária, monitoramento, assistência operacional e outras obrigações estabelecidas contratualmente. Em algumas localidades próximas às praças de pedágio, podem surgir efeitos indiretos, como valorização imobiliária e elevação do custo de vida, exigindo atenção quanto aos impactos territoriais dessas estruturas (Mattei, 2017).

A expansão da malha viária, seja através da construção de novas rodovias, duplicações ou alargamentos, promove transformações significativas nos sistemas físico, biótico e antrópico, gerando externalidades ambientais negativas de considerável magnitude (Zurssa, 2022). Dentre esses impactos, destaca-se a alteração nos padrões de uso e ocupação do solo no entorno das vias, o que demanda estudos sistemáticos sobre a dinâmica espaço-temporal dessas transformações (Panazollo *et al.*, 2012).

A pavimentação de rodovias amplia significativamente os impactos ambientais durante sua construção, embora traga benefícios socioeconômicos relevantes. Entre os aspectos positivos, destacam-se a geração de empregos diretos e indiretos durante a obra, a melhoria na conectividade entre regiões, facilitando tanto o transporte de cargas quanto o deslocamento de pessoas, e a redução dos custos logísticos decorrentes da maior eficiência e segurança viária, destaca Salomão *et al.* (2019).

Salomão *et al.* (2019) afirmam também que o processo de implantação envolve desmatamento e perda irreversível de cobertura vegetal, além de causar fragmentação permanente de habitats naturais, interrompendo corredores ecológicos essenciais para a biodiversidade. Outras consequências incluem alterações hidrológicas, como compactação do solo e modificação no escoamento de águas pluviais, além da geração considerável de resíduos sólidos durante a construção.

A interligação entre cidades configura-se como elemento essencial para o atual modo de vida humano, marcado pela globalização e pela rapidez nos deslocamentos. Por meio de estudos técnicos, torna-se possível minimizar significativamente os impactos negativos decorrentes da construção e operação das rodovias (Salomão *et al.*, 2019). Além disso, após a implantação das vias, é viável promover ações de recuperação ambiental em áreas eventualmente degradadas (Salomão *et al.*, 2019).

2.3 Pedágio

Para viabilizar economicamente a concessão, utiliza-se a cobrança de pedágio como principal fonte de receita, cujo objetivo é custear os investimentos realizados e assegurar a prestação contínua e de qualidade dos serviços (Barbo *et al.*, 2010).

Conforme estabelece a Lei nº 8.987/1995, conhecida como Lei das Concessões, cabe às empresas concessionárias definir a política de cobrança tarifária, desde que respeitado o valor estipulado na proposta vencedora da licitação (Braga, 2017). O artigo 9º da referida lei determina que “a tarifa do serviço público concedido será fixada pelo preço da proposta vencedora da licitação e preservada pelas regras de revisão previstas nesta Lei, no edital e no contrato”. Já o artigo 13º prevê certa flexibilidade ao permitir a diferenciação tarifária em função de características técnicas e custos

específicos vinculados ao atendimento de distintos segmentos de usuários. As concessões rodoviárias federais adotam o sistema de pedágio aberto, com praças de cobrança em barreiras distribuídas, conforme a Figura 1, em média, a cada 80 km. A tarifação é bidirecional, calculada com base na extensão percorrida e diferenciada conforme a categoria do veículo, de acordo com o número de eixos (Barbosa, 2013).

Figura 1 - Praça de pedágio convencional



Fonte: Autoesporte (2021)

Dito isso, a modicidade tarifária é um princípio fundamental, pois visa garantir o acesso universal aos serviços concedidos, mantendo o equilíbrio econômico-financeiro da concessão (Maciel, 2020). Barbosa (2013) cita que os objetivos de uma política tarifária incluem: (1) garantir a sustentabilidade financeira do serviço, assegurando a cobertura de seus custos; (2) promover ganhos de eficiência, qualidade, modernização e inovação, estimulando a competitividade; e (3) assegurar o acesso equitativo e em boas condições ao serviço público. As decisões sobre quem deve pagar, qual o valor cobrado e de que forma a cobrança será realizada são aspectos centrais dessa política.

Ainda segundo Barbosa (2013), os principais riscos em projetos de concessão rodoviária incluem: (1) ambiental, relacionado a custos adicionais e ações judiciais decorrentes de exigências legais; (2) de demanda, quando o tráfego efetivo é inferior às projeções; (3) de custos, referentes à variação entre custos reais e os estimados;

e (4) político, vinculado a decisões governamentais que possam impactar negativamente o contrato. Nesse contexto, um elemento central da política tarifária é a definição do que está sendo pago: as tarifas devem cobrir os custos da concessão (investimentos, operação, manutenção, impostos) e garantir a remuneração da concessionária. Dessa forma, torna-se relevante considerar o uso de recursos tecnológicos como instrumento para fortalecer a regulação das concessões pelo poder público e possibilitar a adoção de estratégias diferenciadas de política tarifária por parte das concessionárias.

Diante do cenário apresentado, o sistema de pedágio eletrônico por fluxo livre, conhecido como *free flow*, configura-se como uma alternativa mais equitativa para os usuários, e que também pode ser mais viável ao poder concedente, pois permite a cobrança proporcional à extensão efetivamente percorrida (ANTT, s.d.d) Esse sistema utiliza pórticos instalados ao longo da via, como mostrado na Figura 2, que identificam os veículos por meio de tecnologias avançadas, dispensando a necessidade de paradas (Barbosa, 2013). Embora o pagamento em dinheiro nas praças de pedágio tenha sido o modelo predominante historicamente, a evolução tecnológica nos últimos anos evidenciou essa prática como lenta e pouco eficiente, impulsionando o desenvolvimento de alternativas mais ágeis e automatizadas.

Figura 2 - Modelo de pedágio sem cancela (*free flow*)



Fonte: Gustavo Mansur/Secom - Governo do Rio Grande do Sul (2024)

Os pedágios podem atuar como instrumento de gestão da demanda, contribuindo para a redução de fluxos de atravessamento em determinados trechos urbanos; contudo, também podem gerar efeitos redistributivos, como o aumento da circulação em vias centrais decorrente do desvio de usuários que buscam evitar a tarifa (Maciel, 2020). Segundo Zanchetta *et al.* (2019), esse fenômeno foi observado em Londres, onde o sistema de pedágio urbano gerou congestionamentos desnecessários na região central, prejudicando os objetivos de mobilidade sustentável. Embora o caso analisado por Zanchetta *et al.* (2019) se refira a um sistema de pedágio urbano de área, a experiência evidencia um fenômeno típico de políticas de precificação viária: a redistribuição espacial dos fluxos, que pode produzir efeitos indesejados e comprometer os objetivos de mobilidade inicialmente pretendidos.

O problema do fluxo intenso nas rodovias pode ser analisado a partir do conceito de externalidades, que se referem a custos ou benefícios gerados por uma atividade econômica que não são diretamente internalizados pelas partes envolvidas (Maciel, 2020). A adoção de tarifas em vias urbanas surgiu justamente como um mecanismo para mitigar externalidades negativas, como congestionamentos, poluição

atmosférica e sonora, acidentes de trânsito e a consequente degradação da qualidade de vida (Croci, 2016). Nessa lógica, a cobrança de pedágio visa internalizar os custos do uso da infraestrutura, atribuindo ao próprio usuário a responsabilidade pelos impactos de suas escolhas, conforme o princípio do “usuário-pagador” (Maciel, 2020).

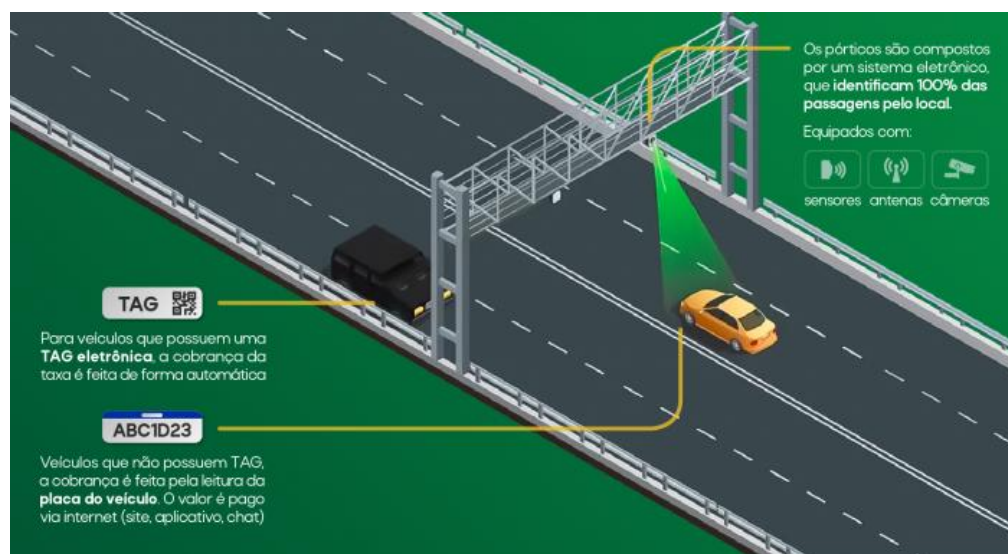
A cobrança por *free flow* mostra-se particularmente eficaz em perímetros urbanos, uma vez que elimina a necessidade de paradas e filas, típicas do modelo tradicional com cabines de cobrança. Com as tecnologias de identificação veicular, esse sistema assegura maior fluidez no tráfego e promove uma cobrança mais justa, ao considerar variáveis como tipo de veículo, distância percorrida e até o propósito da viagem (Barbosa, 2013). Segundo o *Highway Capacity Manual 2022*, mesmo em rodovias classificadas como de fluxo contínuo (*uninterrupted-flow*), a presença de praças de pedágio manuais pode comprometer significativamente o desempenho do tráfego: “As instalações de cobrança de pedágio podem criar condições de fluxo interrompido, como nas instalações onde os pedágios são pagos manualmente em praças de pedágio localizadas na via principal da rodovia.” (TRB, 2022, p. 239, tradução nossa¹). Outras fontes pontuais de atraso incluem estações de inspeção, passagens de nível e pontes móveis, o que reforça a necessidade de soluções que minimizem essas interferências.

Nas rodovias sem concessão, os recursos para manutenção e operação provêm majoritariamente de investimentos públicos. Em vias concedidas, a arrecadação pode ser complementada por tributos como o ISS (Imposto Sobre Serviços) (Câmara dos Deputados, 2006). Ainda que muitos acreditem que tributos como o IPVA ou taxas de licenciamento sejam destinados à manutenção rodoviária, esses valores não se vinculam diretamente à cobrança de pedágio (Barbosa, 2013). A estrutura das praças de pedágio pode variar conforme a localização, o tipo de operação e o design, incluindo ou não cabines físicas. A forma de cobrança também varia entre modelos manual, eletrônico e automático, o que influencia nos custos operacionais e no tempo de espera dos usuários (Araújo; Setti, 2006).

¹ Do inglês: *Toll-collection facilities can create interrupted-flow conditions, such as on facilities where tolls are paid manually at toll plazas located on the freeway mainline* (TRB, 2022, p. 239).

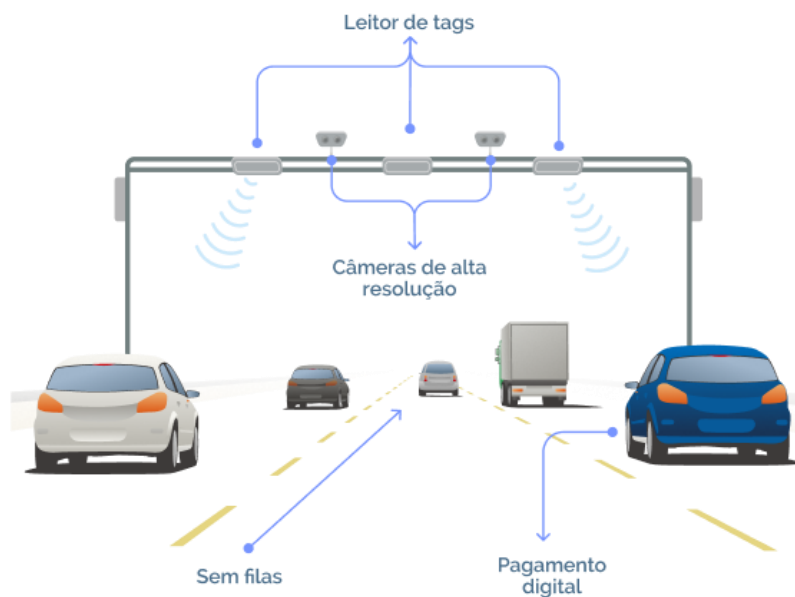
O sistema eletrônico de cobrança de pedágios emprega tecnologias como o Sistema de Identificação Automática de Veículos (AVI) e o *Electronic Toll Collection* (ETC). O AVI utiliza antenas para identificar veículos cadastrados na operadora responsável, através de uma etiqueta eletrônica (transponder ou OBU – *On-Board Unit*) fixada no para-brisa de um veículo, e o ETC aplica essa tecnologia, operando por meio de sensores que detectam dispositivos instalados nos veículos, como se observa na Figura 3 e na Figura 4, validando automaticamente os pagamentos (Chu *et al.*, 2013; Barbosa, 2013). Esses sistemas eliminam o contato com atendentes e o manuseio de dinheiro, proporcionando uma experiência mais ágil e eficiente. Nos dois sistemas, após a identificação veicular, um processamento automatizado realiza a cobrança, seja por débito direto em contas pré-cadastradas pelos usuários, seja pela emissão de fatura para quitação posterior do valor devido (Santos; Ribeiro, 2018).

Figura 3 - Exemplo de leitura de tag em pedágio sem cancela



Fonte: Rota Extra (2025)

Figura 4 - Exemplificação de sensores nos pórticos



Fonte: Blog Mônaco (2024)

Contudo, dada a ausência de barreiras físicas como cancelas, o que amplia o risco de evasão, os sistemas de cobrança eletrônica (ETC) exigem mecanismos de captura de imagens multidirecionais para registrar veículos em situação irregular (e.g., desprovidos de *tag*) durante a passagem pelos pórticos de cobrança, destaca também Santos e Ribeiro (2018).

A adesão ao sistema exige a contratação de serviços especializados, responsáveis pela instalação do equipamento e pela gestão do plano de pagamento. O uso dessas tecnologias tem o potencial de reduzir significativamente as filas, contribuindo para a redução do tempo de viagem e para uma operação mais moderna e eficaz. Barbosa (2013) considera importante destacar que a implantação de rodovias com pedágio aberto vai além da adoção de tecnologias de identificação automática de veículos (AVI). Em sistemas do tipo *free flow*, é fundamental que os responsáveis considerem aspectos técnicos, legais e operacionais para equilibrar a modicidade tarifária, a mobilidade, a satisfação dos usuários e a sustentabilidade financeira da infraestrutura. O sucesso desse modelo depende de mecanismos eficazes de fiscalização e de soluções para o atendimento de usuários que não utilizam o sistema AVI.

Conforme Alvarenga (2010), a velocidade operacional para veículos em faixas de cobrança eletrônica no Brasil é recomendada em até 40 km/h. Esta limitação não deriva de incapacidade tecnológica dos sistemas de identificação automática de veículos (AVI), que operam com precisão em velocidades acima de 200 km/h. A restrição é uma medida de segurança viária, motivada pela proximidade física entre as pistas de cobrança automática e as cabines manuais nas praças de pedágio, buscando mitigar riscos de colisão (Alvarenga, 2010). Em contraste à essa redução de velocidade, têm-se a dinâmica operacional da cobrança manual, onde há a redução gradual da velocidade do veículo até sua parada completa ou quase completa na cabine.

O sistema de rodovias de pedágio aberto (*Open Road Tolling – ORT*) ou *free flow* representa um avanço importante nesse sentido, ao eliminar completamente a necessidade de praças de pedágio físicas, além da fluidez proporcionada, visto que a identificação dos veículos é realizada na velocidade normal do tráfego, não necessitando da canalização do fluxo em cabines (Santos, 2017). Trata-se de um modelo mais equitativo, já que permite a tarifação com base no uso efetivo da via e em parâmetros mais ajustados à realidade dos usuários (Maciel, 2020).

Apesar das vantagens do *free flow*, outras formas de cobrança ainda são amplamente utilizadas. A cobrança manual, por exemplo, ainda é comum e realizada por colaboradores nas cabines das praças de pedágio. Esse modelo exige o pagamento em espécie, o que pode gerar atrasos, sobretudo em horários de maior movimento, gerando uma redução do Nível de Serviço da rodovia (Araújo, 2001). Estudos apontam que a adoção de valores arredondados, sem frações em centavos, contribui para a redução do tempo de atendimento e para a fluidez do tráfego (Araújo; Setti, 2006). Além desse modelo, têm-se também o mix de coleta manual e sistema AVI, onde as praças oferecem tanto a opção de pagamento manual quanto a utilização de sistemas de Identificação Automática de Veículos (AVI) (Santos, 2017), conforme Figura 5 e Figura 6 .

Figura 5 - Pedágio com cobrança manual e automática



Fonte: ConectCar (2025)

Figura 6 - Pedágio com cobrança manual e automática



Fonte: CCR/Via Sul (2020)

É importante considerar, ainda, os riscos a que estão expostos os colaboradores em praças com cobrança manual. Eles enfrentam condições climáticas adversas, ruídos, estímulos visuais e comportamentos imprevisíveis dos usuários, o que pode

comprometer sua saúde e segurança (Maciel, 2020). Já a cobrança automática é feita por meio de máquinas que aceitam moedas, cédulas e cartões, sem necessidade de interação com atendentes. Essas máquinas reconhecem o valor depositado e, nos modelos mais modernos, devolvem o troco automaticamente (Maciel, 2020). A principal vantagem em relação à cobrança manual é a eliminação do contato direto entre o operador e o usuário, o que contribui para maior segurança e eficiência no atendimento.

O último processo realizado na Praça de Pedágio, que seria o processo de “saída”, resultante da interação entre os processos de chegada e atendimento, representa o desempenho da Praça de Pedágio. Desempenho o qual pode ser avaliado pelo Nível de Serviço (conforme critérios estabelecidos pelo HCM), do tempo total gasto no sistema, compreendendo o período desde a chegada até a saída do veículo, do tempo de espera em fila e do comprimento da fila (Santos, 2017).

As medidas de desempenho das praças de pedágio, representam uma forma de analisar o cumprimento dos objetivos estabelecidos no Planejamento Estratégico, segundo Ângelo (2005). Essas medidas podem auxiliar o poder concedente a verificar o desempenho da concessionária, interferindo no valor pago à concessionária. Entre os principais indicadores operacionais utilizados na literatura para análise de praças de pedágio destacam-se o tempo de espera, o atraso médio e o comprimento de fila, variáveis frequentemente empregadas como medidas de efetividade (*measures of effectiveness*) na avaliação do desempenho dessas infraestruturas (Klodzinski; Al-Deek, 2002; Woo; Hoel, 1991).

Além desses aspectos diretamente relacionados ao fluxo veicular, também podem ser considerados elementos físicos e operacionais da infraestrutura, como o número de cabines disponíveis, a largura das faixas de rolamento, a qualidade do pavimento e as condições de atendimento ao usuário, considerando critérios como a agilidade no processamento do pagamento e sinalização informativa disponível, especialmente no que se refere à clareza sobre os valores das tarifas e às modalidades de pagamento aceitas (Obelheiro *et al.*, 2011).

De maneira complementar, o *Highway Capacity Manual* (HCM) apresenta o Nível de Serviço (NS) como instrumento de consolidação e classificação do desempenho operacional. Segundo o TRB (2022, p. 361, tradução nossa²): “O nível de serviço (*Level of Service – LOS*) é uma estratificação quantitativa de uma ou mais medidas de desempenho, representando a qualidade do serviço. As medidas utilizadas para determinar o LOS de elementos do sistema de transporte são chamadas de medidas de serviço (*service measures*). O HCM define seis níveis de serviço, de A a F, para cada medida ou combinação de medidas de serviço. O NS A representa as melhores condições operacionais sob a perspectiva do usuário, enquanto o NS F representa as piores.”

No contexto específico de praças de pedágio, metodologias próprias foram desenvolvidas para associar variáveis como atraso médio e comprimento de fila à classificação em níveis A–F, permitindo avaliar de forma padronizada o desempenho dessas instalações (Klodzinski; Al-Deek, 2002; Woo; Hoel, 1991). No Brasil, adaptações metodológicas também foram propostas para refletir as condições operacionais nacionais e a percepção do usuário, reforçando a aplicabilidade do NS como ferramenta de apoio à gestão (Obelheiro *et al.*, 2011). Dessa forma, a análise do desempenho operacional por meio do Nível de Serviço fornece subsídios técnicos relevantes para decisões de dimensionamento, reconfiguração operacional e adoção de novas tecnologias de cobrança, impactando diretamente a eficiência do serviço e a experiência do usuário.

2.3.1 Sistema *Free Flow*: Impactos e Experiências de Implementação

Após discorrer sobre as praças e os modelos de cobrança de pedágio, torna-se relevante abordar o sistema de pedágio eletrônico por fluxo livre (*free flow*) e seus impactos sobre a operação rodoviária e os usuários. Sistemas de pedágio aberto permitem maior equidade tarifária ao utilizarem pórticos distribuídos ao longo da

² Do inglês: *LOS is a quantitative stratification of a performance measure or measures representing quality of service. The measures used to determine LOS for transportation system elements are called service measures. The HCM defines six levels of service, ranging from A to F, for each service measure or combination of service measures. LOS A represents the best operating conditions from the traveler's perspective and LOS F the worst* (TRB, 2022, p. 361).

rodovia, possibilitando a cobrança proporcional à distância percorrida e ampliando a base de arrecadação (Barbosa, 2013). Esse modelo elimina a necessidade de paradas para pagamento, permitindo a manutenção da velocidade de viagem e reduzindo as desacelerações e acelerações associadas às praças convencionais (Barbosa, 2013). Como consequência, contribui para o aumento da capacidade de fluxo, eliminação de filas, melhoria da segurança viária e redução dos custos operacionais dos veículos.

Esses sistemas de cobrança eletrônica integram o conjunto de tecnologias associadas aos Sistemas de Transportes Inteligentes (*ITS*³), caracterizando-se pela automação da identificação dos veículos e pela redução das interferências no fluxo viário (ANTP, 2012). Além dos ganhos operacionais, a literatura aponta benefícios ambientais associados à maior continuidade do tráfego. A eliminação de paradas e retomadas de velocidade reduz o consumo de combustível e as emissões de poluentes, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais do transporte rodoviário. Segundo material institucional divulgado pelo Sindicamp (2024), a adoção do sistema *free flow* pode contribuir para reduções de emissões de CO₂ da ordem de até 30% em rodovias onde é implementado. Adicionalmente, a eliminação das praças físicas reduz a necessidade de obras civis e manutenção de estruturas de cobrança, diminuindo também o consumo de energia e a geração de resíduos associados à operação dessas instalações (Toledo, 2024).

Apesar dessas vantagens, a implementação do sistema também apresenta desafios operacionais e institucionais. Estudos apontam que a adoção do modelo depende da aceitação dos usuários, da adaptação do marco regulatório e da existência de infraestrutura tecnológica adequada (Gallagher; Worrall, 2005). Para os operadores, uma das principais limitações é o risco de inadimplência, uma vez que a ausência de barreiras físicas facilita a evasão tarifária. Assim, o funcionamento eficiente do sistema requer cobertura tecnológica completa da via, com sensores de identificação automática de veículos (*AVI*⁴) e câmeras capazes de reconhecer placas,

³ Do inglês: *Intelligent Transport Systems*

⁴ Do inglês: *Automatic Vehicle Identification*

garantindo a identificação mesmo de veículos sem dispositivos eletrônicos de pagamento (Barbosa, 2013).

A evolução desses sistemas ocorreu gradualmente em diversos países. O conceito de cobrança eletrônica foi inicialmente proposto por William Vickrey em 1959, como alternativa para reduzir congestionamentos por meio da tarifação proporcional à distância percorrida (Arnott, 1997). A implementação prática, entretanto, ocorreu posteriormente, destacando-se a experiência da Noruega, que introduziu sistemas eletrônicos de cobrança em 1987, inicialmente combinados com cabines manuais (Waersted, 2005). Nos Estados Unidos, a aplicação em larga escala de tecnologias de identificação por radiofrequência ocorreu a partir do final da década de 1980, com sistemas como o *TollTag* na *Dallas North Tollway*, que posteriormente evoluíram para modelos de *open-road tolling*, permitindo a cobrança em múltiplas faixas sem redução de velocidade (Barbosa, 2013). O Canadá também se destacou com a implementação da rodovia Ontario *Highway 407*, inaugurada em 1997 e considerada uma das primeiras rodovias totalmente operadas em regime *free flow*, utilizando identificação por radiofrequência e reconhecimento automático de placas (Barbosa, 2013).

Outras experiências relevantes incluem a adoção de sistemas eletrônicos de cobrança em países europeus e asiáticos, bem como em cidades latino-americanas. Em Santiago, no Chile, a tecnologia foi implementada em 2004 em rodovias urbanas concessionadas, com o objetivo de reduzir congestionamentos e melhorar a gestão da demanda viária (CNT, 2020). Em Singapura, sistemas eletrônicos de tarifação viária são utilizados desde 1998 como instrumento de gestão do tráfego urbano (Lucas Jr., 2008). Esses exemplos demonstram que a adoção do *free flow* tem sido associada não apenas à modernização da cobrança tarifária, mas também à melhoria da eficiência operacional e da gestão da mobilidade urbana.

No Brasil, a introdução de sistemas de cobrança automática de pedágio ocorreu inicialmente por meio da tecnologia de identificação por radiofrequência (*RFID*⁵), implantada oficialmente no estado de São Paulo no ano 2000 (Barbosa, 2013). Posteriormente, a tecnologia foi ampliada para outros estados e também passou a ser

⁵ Do inglês: *Radio Frequency Identification*

utilizada em estacionamentos e outros serviços integrados de mobilidade. Apesar dessa modernização, os sistemas existentes continuaram operando em praças físicas e exigindo redução de velocidade para a passagem dos veículos.

A transição para o modelo *free flow* no país é relativamente recente. O primeiro sistema federal desse tipo foi implantado em 2022 na BR-101/RJ (Rodovia Rio-Santos), sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), utilizando pórticos de leitura automática de dispositivos eletrônicos e reconhecimento óptico de placas para veículos não cadastrados (ANTT, 2022; ANTT, 2023). Experiências adicionais incluem o sistema Ponto a Ponto no estado de São Paulo, baseado na cobrança proporcional por trecho, e testes operacionais realizados em rodovias estaduais, como na MG-459, em Minas Gerais (CNT, 2020; EPR Sul de Minas, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a implementação do sistema no país ainda enfrenta desafios, especialmente relacionados à evasão tarifária e à necessidade de aperfeiçoamento regulatório. Nos primeiros meses de operação do sistema na BR-101/RJ, foram registrados níveis de inadimplência entre 7% e 10%, mesmo com a identificação dos veículos por meio de placas (Agência Infra, 2024). Ainda assim, observa-se uma tendência crescente de adoção de meios eletrônicos de pagamento nas rodovias brasileiras, indicando maior familiaridade dos usuários com essas tecnologias. Entre 2010 e 2017, por exemplo, o número de veículos que utilizavam sistemas automáticos de pagamento nas rodovias paulistas aumentou 42,7%, enquanto o uso das cabines manuais apresentou crescimento significativamente menor (CNT, 2020).

Nesse contexto, a expansão dos sistemas de cobrança eletrônica representa um processo gradual de modernização da infraestrutura rodoviária brasileira. A análise de seus impactos operacionais e ambientais torna-se, portanto, relevante para compreender os efeitos potenciais da adoção do modelo *free flow* em rodovias concessionadas, como no caso do trecho da BR-040 analisado neste trabalho.

3. Área de Estudo: BR-040

Para abordar a temática principal, antes necessita-se discorrer sobre o histórico de concessão da área de estudo. A BR-040 é uma rodovia federal que passou pelo processo de concessão no ano de 2013, nos trechos entre Juiz de Fora e Brasília sendo concessionada pela Via-040 (a qual ganhou o leilão com a melhor oferta, melhor deságio e menor pedágio) (ANTT, 2025). A empresa assumiu o controle de 936,8 quilômetros de rodovia em 22 de abril de 2014, com contrato previsto de 30 anos (Concessionária Via 040 S.A, 2019). Diante da realização de investimentos significativamente inferiores aos pactuados inicialmente no contrato de concessão, a Via 040 protocolou, em setembro de 2017, pedido de adesão ao processo de devolução amigável da rodovia, visando à sua posterior relicitação (CNT, 2017).

Conforme o veículo de comunicação digital, O Tempo (2023), à época, a empresa alegou que o agravamento da crise econômica nacional comprometeu o planejamento de arrecadação, tornando inviável o cumprimento das obrigações contratuais. Destaca ainda, que as tratativas entre a concessionária e a ANTT se estenderam por cerca de três anos, culminando na assinatura de um termo aditivo em novembro de 2020, posteriormente prorrogado por mais 18 meses em 2022.

A situação da rodovia BR-040, se complicou ao longo dos anos. Segundo dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF) (2023), no período de janeiro a julho de 2023, ocorreram 1.023 acidentes no trecho mineiro da rodovia, resultando em 1.277 pessoas feridas, mais de 300 em colisões graves e 91 óbitos, número superior às 79 mortes registradas na BR-381 no mesmo intervalo. A elevada letalidade da BR-040 motivou a atuação do Ministério Público Federal (MPF), que considerou inaceitável qualquer interrupção nos serviços essenciais prestados pela concessionária, sob pena de grave comprometimento à segurança dos usuários (O Tempo, 2023).

Apesar disso, a Via 040 reiterou seu pedido de rescisão amigável do contrato, com vistas à realização de novo leilão e à transferência da gestão para uma nova operadora. Em resposta, a Justiça Federal determinou em 17 de agosto de 2023, data que marcaria o encerramento oficial da concessão, que a Via 040 permanecesse

responsável pela manutenção, conservação, operação e monitoração do trecho compreendido entre Brasília (DF) e Juiz de Fora (MG), até a efetiva conclusão do processo de relicitação e o início das atividades da nova concessionária, previsto para abril de 2024 (O Tempo, 2023).

Arcanjo *et al.* (2023) mencionam que, para a concessionária Via 040, o cenário econômico adverso que se consolidou após 2014, marcado pelo enfraquecimento da atividade econômica no país, resultou na redução das projeções de arrecadação da concessão e ainda houve queda no fluxo de veículos e mercadorias, comprometendo a receita inicialmente estimada para o custeio das operações e investimentos previstos. Além disso, a concessionária alegou a existência de fatores externos que dificultaram o cumprimento das obrigações contratuais e limitaram sua capacidade de realizar novos aportes financeiros na infraestrutura da rodovia.

Em vista da necessidade de garantir a continuidade dos serviços operacionais e das intervenções essenciais, como manutenção, monitoração, ampliação de capacidade e melhorias, o trecho devolvido passou a ser objeto de análise por parte da Empresa de Planejamento e Logística (EPL), atualmente Infra S.A. (ANTT, 2025).

Com base nos estudos elaborados, o governo federal concluiu que a extensão total da concessão original, 936,8 km, deveria ser desmembrada em projetos distintos, de forma a torná-los mais atrativos ao setor privado.

O novo arranjo resultou na divisão da BR-040 em três trechos:

- BR-040/MG/RJ, entre Belo Horizonte/MG e Juiz de Fora/MG, com extensão de 451 km (já leiloados);
- BR-040/MG/GO, entre Belo Horizonte/MG e Cristalina/GO, com 594 km de extensão;
- BR-040/DF/GO, entre Cristalina/GO e o Distrito Federal/DF, que será concedido em conjunto com trechos da BR-153/060/GO/DF entre Goiânia/GO e o Distrito Federal.

Após adequações determinadas pelo Tribunal de Contas da União (TCU), o projeto referente ao trecho entre Belo Horizonte e Cristalina foi submetido a certame público em 26 de setembro de 2024, que contou com a participação de quatro proponentes (ANTT, 2025b). A empresa Vinci *Highways* sagrou-se vencedora do leilão, assumindo a responsabilidade pelo novo projeto de concessão.

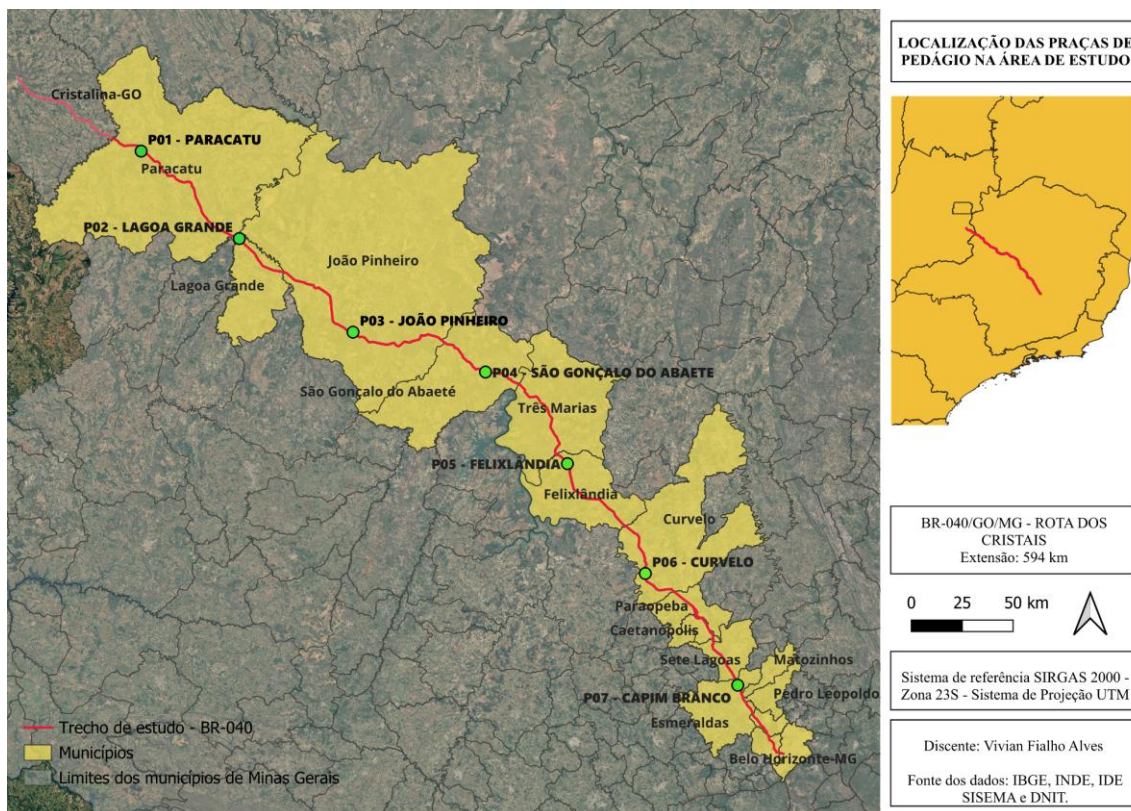
A homologação do resultado ocorreu por meio da Deliberação nº 422, de 31 de outubro de 2024, e a autorização para assinatura do contrato entre a ANTT e a nova concessionária, Via Cristais (Concessionária pertencente ao grupo VINCI *Highways*), foi formalizada pela Deliberação nº 27, de 30 de janeiro de 2025 (ANTT, 2025b).

A concessão atravessa 18 municípios nos estados de Minas Gerais e Goiás. O trecho sob concessão possui 48.200 transações diárias, sendo 39% de veículos pesados. A infraestrutura ainda conta com 7 praças de pedágio, conforme Figura 7. O prazo da concessão é de 30 anos, com possibilidade de prorrogação por mais 30 (Via Cristais, 2025). Nos sete primeiros anos de concessão, a concessionária Via Cristais prevê investimentos de aproximadamente R\$ 3,8 bilhões em obras de infraestrutura, segurança viária e sustentabilidade no trecho concedido da BR-040. As principais intervenções incluem:

- Expansão e melhoria da capacidade viária: construção de 168 km de terceiras faixas, 174 km de faixas adicionais em pista simples e 10 km de duplicação de pista.
- Segurança e fluidez do tráfego: instalação de 18 passagens de fauna, 35 novas interseções e melhoramento de outras 14, além da requalificação de Obras de Arte Especiais (OAE), como viadutos, túneis e passarelas.
- Sinalização viária: aplicação de 39.000 m² de sinalização horizontal, 2.437 m² de sinalização vertical, implantação de 129 km de barreiras de concreto e 56 km de defensas metálicas.

- Sustentabilidade e meio ambiente: ações voltadas à gestão de fauna atropelada, identificação de patrimônio cultural, avaliação de riscos e segurança, além de um plano de engajamento com as comunidades locais.

Figura 7 - Localização das praças de pedágio no trecho de estudo



Fonte: Autoral (2025)

3.1 A importância da BR-040 no Contexto Metropolitano

A BR-040 consolidou-se, desde sua implantação definitiva ao longo do século XX, como um dos principais eixos estruturadores do território brasileiro, desempenhando papel fundamental na articulação entre Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. Além de sua função estratégica na articulação física do território brasileiro, a rodovia também adquiriu relevância simbólica ao se consolidar como eixo de desenvolvimento, conectando polos industriais a regiões produtoras, ampliando a circulação de mercadorias e fortalecendo o escoamento agrícola. Seu traçado também favoreceu movimentos migratórios internos, sobretudo nas décadas de 1960

e 1970, quando o crescimento urbano atraiu populações em busca de novas oportunidades (Avep Brasil, 2023).

Conforme destaca a Avep Brasil (2023), a trajetória da BR-040 espelha, em grande medida, a dinâmica socioeconômica brasileira ao longo do século XX. Seus trechos registram alterações na paisagem, na organização social e na estrutura produtiva, configurando a rodovia como um marco histórico que acompanha e evidencia os processos de transformação do país. Nas últimas décadas, observou-se um adensamento seletivo de atividades no entorno da rodovia, fenômeno associado tanto à sua posição estratégica quanto às transformações recentes impulsionadas pelos processos de concessão.

Estudos específicos sobre infraestrutura de transporte demonstram que melhorias na qualidade das rodovias brasileiras tendem a reduzir custos logísticos, ampliar a conectividade e induzir transformações socioeconômicas em escalas municipais e regionais (Ferreira; Teixeira; Silva, 2019), fatores essenciais para entender a centralidade funcional da BR-040 no território.

A literatura sobre inserção de rodovias em áreas urbanizadas reforça que essas infraestruturas, embora essenciais para a fluidez do tráfego regional e para a circulação de pessoas e mercadorias, podem produzir efeitos estruturais relevantes sobre a mobilidade e a organização socioespacial. Matos (2022) aborda em seu trabalho como o processo de planejamento urbano brasileiro, com a implantação de estruturas viárias, incluindo ruas, avenidas, obras de arte especiais e rodovias, buscou priorizar o deslocamento motorizado, criando sistemas capazes de atender à crescente demanda por circulação. Dentre esses elementos, as rodovias que interceptam áreas densamente ocupadas configuram-se como um dos principais desafios para a gestão da acessibilidade urbana, pois, apesar de seu papel estratégico, acabam funcionando como barreiras ao deslocamento a pé.

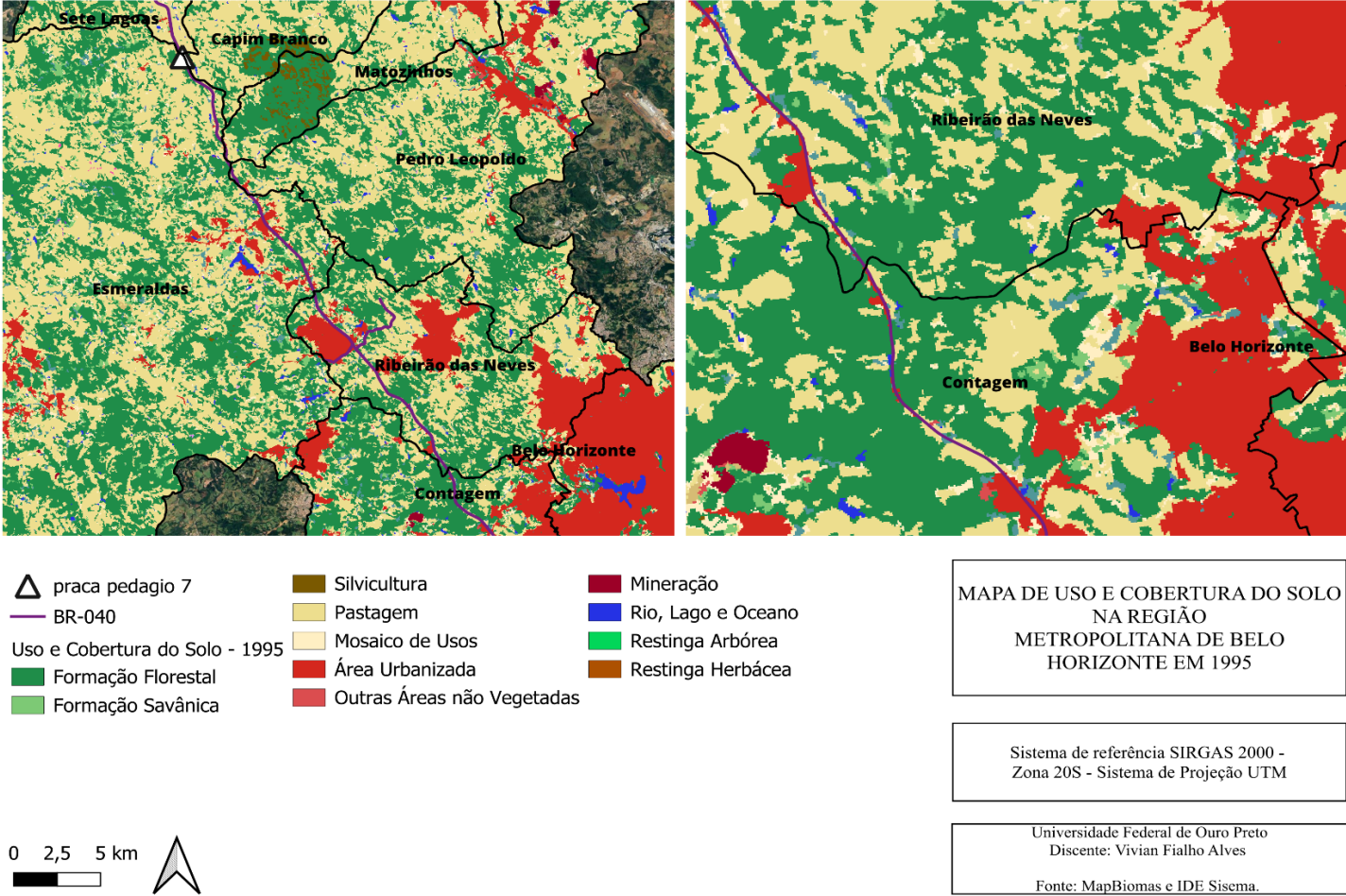
O Anel Rodoviário de Belo Horizonte exemplifica esse fenômeno. Projetado inicialmente para desviar o tráfego que atravessava a área central da capital, tornou-se, ao longo do tempo, um dos corredores mais movimentados da cidade, em função do intenso crescimento populacional de Belo Horizonte e dos municípios da Região

Metropolitana (Matos, 2022). Esse movimento ocorreu paralelamente ao surgimento de ocupações irregulares nas margens da rodovia, cujos moradores apresentam padrões de deslocamento fortemente dependentes da circulação a pé, sobretudo para acessar serviços e atividades cotidianas localizadas no entorno imediato.

Essas dinâmicas descritas por Matos (2022) encontram correspondência direta na BR-040. O estudo de Pádua *et al.* (2023) identifica, ao longo de trechos inseridos na Região Metropolitana de Belo Horizonte, pontos críticos de travessia, trechos com riscos elevados para pedestres e situações de conflito entre mobilidade local e tráfego rodoviário. Os autores mostram que, em setores urbanizados do entorno da BR-040, particularmente onde há adensamento residencial, comércio local e circulação diária a pé, a rodovia opera como elemento de ruptura, reproduzindo o mesmo padrão de segregação funcional observado no Anel. Assim, a articulação entre os achados de Matos (2022) e Pádua *et al.* (2023) reforça que rodovias de alta capacidade podem desempenhar simultaneamente funções regionais e efeitos adversos sobre a mobilidade cotidiana, sobretudo quando se aproximam ou atravessam áreas urbanas consolidadas.

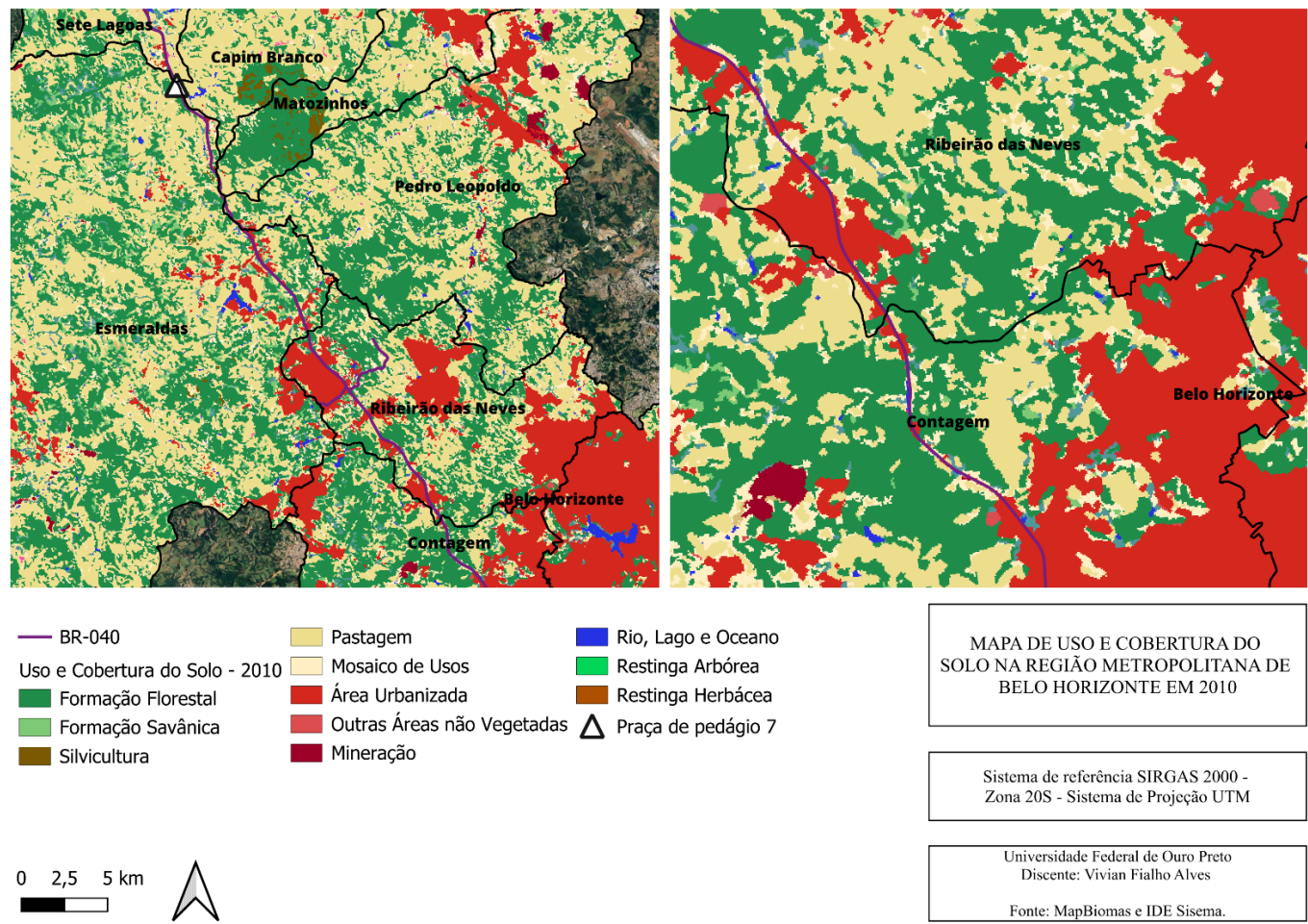
As análises espaciais apresentadas na Figura 8, Figura 9 e Figura 10, baseadas em séries históricas de mapas de uso e cobertura do solo com intervalos aproximados de 15 anos, evidenciam um processo contínuo de transformação territorial na área de influência da BR-040. Observa-se que a urbanização avança de forma predominantemente linear, acompanhando o eixo viário, e promove a substituição gradual de usos rurais e naturais por ocupações urbanas e de caráter misto. Esse padrão indica a atuação da rodovia como elemento estruturador do território, induzindo uma expansão urbana difusa ao longo do corredor de circulação. Tal comportamento é compatível com o identificado por Santos e Proença (2020), que destacam o papel de rodovias estruturantes como vetores de reorganização territorial e de expansão das manchas urbanas em escala regional.

Figura 8 - Uso e Cobertura do Solo em 1995, na RMBH



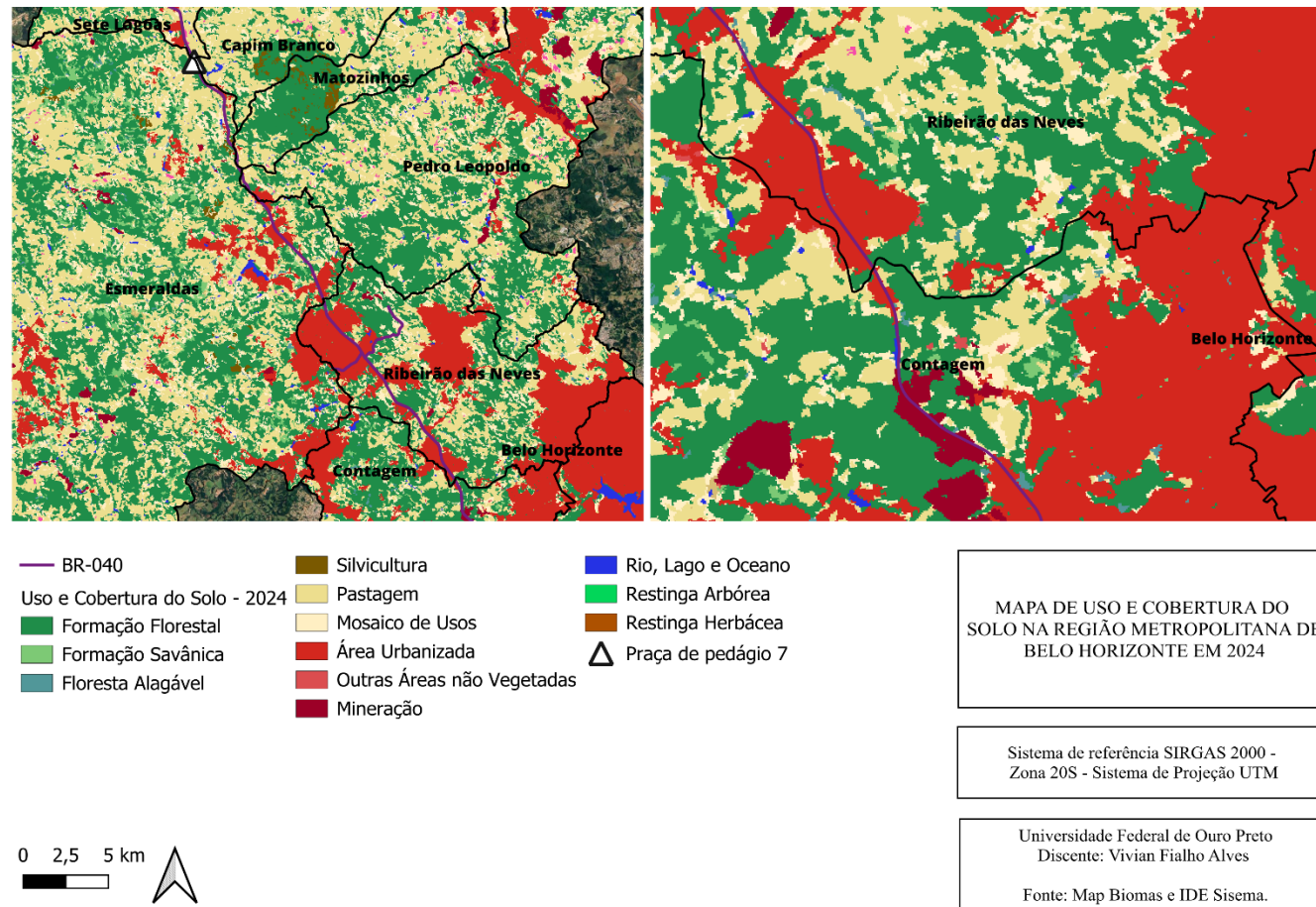
Fonte: Autoral (2026)

Figura 9 - Uso e Cobertura do Solo em 2010, na RMBH



Fonte: Autoral (2026)

Figura 10 - Uso e Cobertura do Solo em 2024, na RMBH



Fonte: Autoral (2026)

Além disso, a rodovia contribui para a reorganização funcional do território ao atrair atividades logísticas, comerciais e industriais. A presença de grandes equipamentos associados ao transporte, como centros de distribuição e polos atacadistas, revela a centralidade da BR-040 na definição de zonas especializadas, reforçando seu papel como eixo articulador da economia regional. Esse movimento corresponde à lógica destacada por Moraes (2020), segundo a qual rodovias estruturam novas centralidades e alteram hierarquias espaciais, especialmente em regiões metropolitanas.

O processo de concessão da BR-040 acrescenta um componente regulatório que influencia diretamente sua dinâmica territorial. A Rota dos Cristais, conforme documentos da ANTT (2023), estrutura intervenções de melhoria operacional, segurança e capacidade, ao mesmo tempo em que introduz uma lógica tarifária que afeta os padrões de deslocamento.

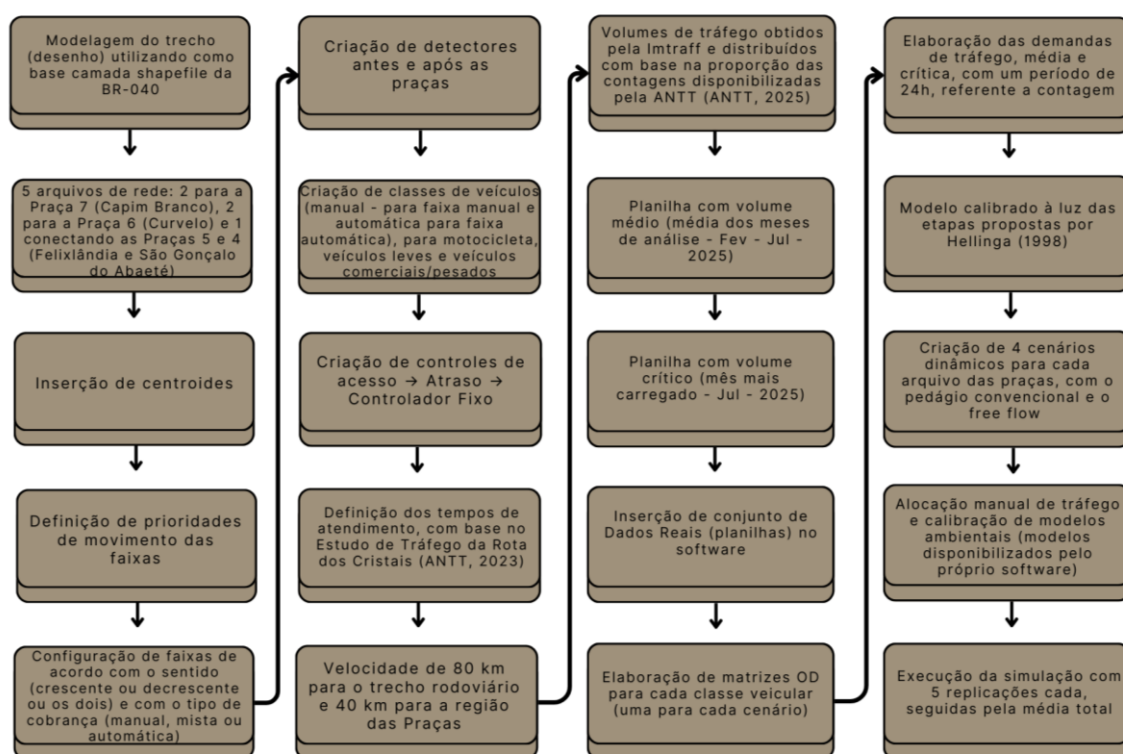
Paula (2019) demonstra que pedágios impactam de forma diferenciada usuários frequentes, especialmente trabalhadores pendulares, o que pode alterar fluxos locais e reorganizar trajetórias cotidianas. Complementarmente, Oliveira (2016) evidencia que concessões produzem reconfigurações na circulação e na distribuição de acessos, ao mesmo tempo em que induzem seletividades territoriais. Assim, a BR-040, sob concessão, atua simultaneamente como infraestrutura física e mecanismo regulatório, influenciando a distribuição de oportunidades e a organização do território.

Portanto, a BR-040 se afirma como agente ativo na produção territorial. Seus efeitos articulam dimensões urbanas, econômicas, sociais e regulatórias, moldando padrões de espraiamento, centralidades e mobilidade. Esses elementos estabelecem relação direta com o debate sobre interferências das concessões no uso e ocupação do solo.

4. Metodologia

Este trabalho classifica-se como uma pesquisa aplicada, de objetivos descritivo-explicativos, com abordagem predominantemente quantitativa, estruturado como estudo de caso do corredor rodoviário BR-040, abrangendo a Rota dos Cristais (Belo Horizonte–Cristalina). Os procedimentos técnicos concentram-se na microssimulação de tráfego no software Aimsun Next, utilizada para avaliar os efeitos operacionais e ambientais decorrentes da substituição do sistema de pedágio convencional pelo modelo *free flow*. A Figura 11 aborda de forma resumida as etapas realizadas ao longo da construção da simulação.

Figura 11 - Etapas desenvolvidas até a execução da simulação



Fonte: Autoral (2026)

4.1 Simulação de tráfego utilizando o software Aimsun

Segundo a Fratar Engenharia Consultiva (2022), o transporte rodoviário figura como uma das principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos. Apesar dos avanços em monitoramento e regulação ambiental, que têm contribuído para a

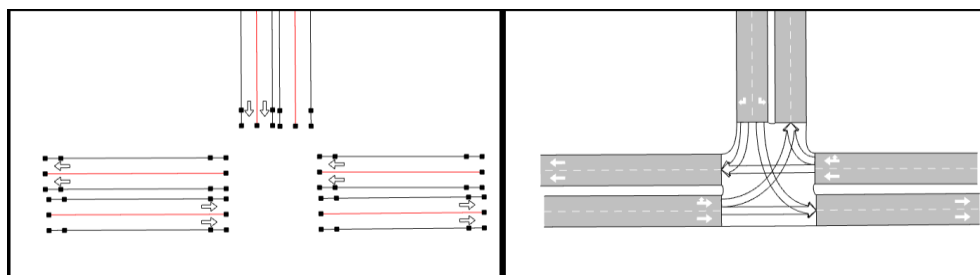
redução gradual das emissões totais, uma parcela expressiva da população ainda permanece exposta a concentrações de poluentes superiores aos limites recomendados pelos padrões de qualidade do ar da União Europeia (UE) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) (Fratat Engenharia Consultiva, 2022).

Nesse contexto, o Aimsun é uma ferramenta de simulação e análise de tráfego que, além de modelar dinâmicas viárias em escalas microscópica e mesoscópica, incorpora módulos para estimativas de emissões veiculares (Rodrigues; Bertoncini, 2024). Com base no tipo de veículo e no combustível empregado, o software permite estimar volumes de poluentes emitidos, como CO₂ e Óxido de Nitrogênio (NOx), expressos em gramas, fornecendo subsídios importantes para a avaliação ambiental de diferentes cenários operacionais (Rodrigues; Bertoncini, 2024).

O Aimsun opera com uma abordagem híbrida de tempo, combinando dinâmicas contínuas e discretas na simulação dos elementos viários. Isso significa que certos componentes, como os veículos, têm seus estados atualizados de forma contínua ao longo da simulação, enquanto outros, como os controladores semaforicos, seguem uma lógica de atualização em instantes específicos e definidos (Vilarinho, 2008). Segundo Vilarinho (2008), o modelo se destaca pelo elevado nível de detalhamento na representação da rede viária, permitindo a diferenciação entre múltiplos tipos de veículos, como automóveis leves, veículos pesados e ônibus, além de considerar perfis distintos de comportamento dos condutores.

No Aimsun, a estrutura física da rede viária é representada de forma simbólica por meio de arcos e nós: os arcos correspondem às faixas de rolamento, enquanto os nós representam as interseções, observa-se na Figura 12 (Oliveira, 2014). O modelo também permite a simulação de elementos de controle de tráfego, como semáforos, sinalizações do tipo “PARE” e faixas de travessia para pedestres, possibilitando a análise mais precisa das interações entre veículos e dispositivos de regulamentação viária (Oliveira, 2014).

Figura 12 - Construção de vias no Aimsun através de Nós



Fonte: *Aimsun Next User Manual* (2022)

A modelagem do tráfego pode ser realizada a partir de duas abordagens distintas. A primeira baseia-se na matriz Origem-Destino (O/D), que organiza o número de viagens entre zonas geradoras e atradoras de tráfego, discriminadas por tipo de veículo (Oliveira, 2014 ; Vilarinho, 2008). Essa matriz direciona os fluxos pelo caminho mais curto, entre cada centroide de origem e de destino. Na segunda abordagem, a modelagem se estrutura com base no volume de tráfego nos acessos da rede viária e nas probabilidades associadas aos movimentos em cada interseção (Vilarinho, 2008). Nesse caso, os veículos são inseridos nos arcos de entrada e seguem seus trajetos de forma probabilística, conforme as taxas de conversão ou viragem previamente definidas para cada ponto da malha simulada (Oliveira, 2014).

Oliveira (2014) destaca também que os veículos podem ser agrupados por tipo e classe, independentemente do modelo de programação adotado para a simulação da rede, e assim, essa distinção permite representar categorias com características distintas, como veículos leves, comerciais pesados, ambulâncias, motocicletas e bicicletas. Cada tipo pode ser definido por variáveis específicas, sujeitas à validação e calibração, como comprimento, largura, velocidade máxima, aceleração e desaceleração máximas, grau de aceitação da velocidade, distância mínima entre veículos, intervalo crítico, tempo de reação e a probabilidade de seguir orientações fornecidas por painéis, quando existentes.

4.1.1 Calibração do modelo

Segundo Ayala e Jacques (2013), a calibração corresponde ao ajuste dos parâmetros que compõem os modelos básicos utilizados na estrutura dos microsimuladores. Esta serve para garantir que a representação do modelo se

aproxime com precisão da realidade (Poon; Dia, 2005). Para alcançar o objetivo da calibração, os dados observados em campo sobre o desempenho do tráfego são comparados aos valores equivalentes gerados pelo simulador (Oliveira, 2014).

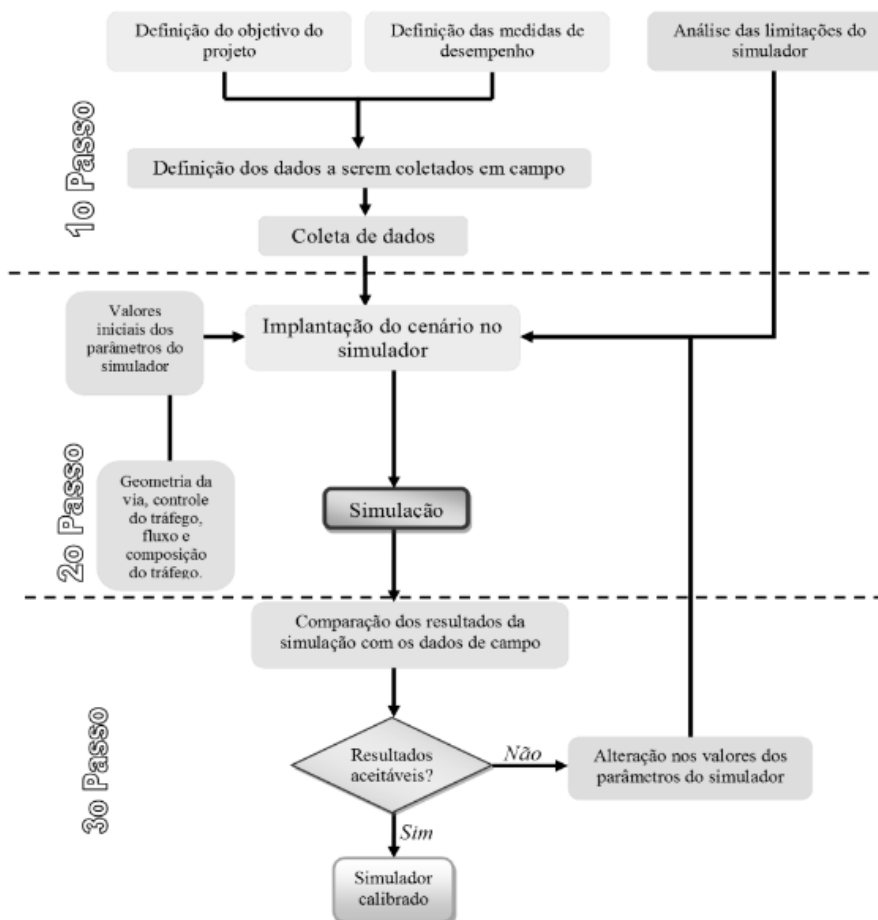
O processo de calibração de modelos de simulação, segundo Hellinga (1998), pode ser organizado em três fases principais: A primeira fase abrange todas as atividades preliminares, anteriores à etapa de modelagem propriamente dita. Nessa etapa, são definidos os objetivos do estudo, identificados os dados de campo necessários, escolhidas as medidas de desempenho compatíveis com os dados disponíveis e com as capacidades do software, além do estabelecimento dos critérios que servirão de base para avaliar a calibração.

Na segunda fase, realiza-se a calibração inicial dos parâmetros do modelo, com base nos dados observados. Essa etapa inclui a codificação da rede (com a definição de zonas, nós e links), a caracterização dos trechos segundo relações macroscópicas entre velocidade, fluxo e densidade, a configuração de parâmetros de comportamento dos motoristas (como estratégias de roteamento e aceitação de lacunas), além da definição da matriz de demanda origem-destino.

Por fim, a terceira fase envolve a comparação entre os resultados do modelo e as condições observadas em campo, sendo esses resultados testados com base nos critérios estabelecidos na primeira fase. Caso os critérios sejam atendidos, o modelo é considerado calibrado e apto para simulações de cenários alternativos. Caso contrário, torna-se necessário refinar os parâmetros até que os resultados simulados se alinhem de forma satisfatória aos dados reais.

Ayala e Jacques (2013), definem o processo de calibração conforme o modelo apresentado na Figura 13:

Figura 13 - Processo de calibração de um simulador



Fonte: Ayala e Jacques (2013)

A configuração da rede representa o ponto de partida para o processo de simulação, exigindo um conjunto de dados de entrada, como o mapa da área de estudo, características geométricas da via, número de faixas, rampas de inclinação, faixas de conversão e velocidade média do trecho (Oliveira, 2014).

4.1.2 Medidas de desempenho e parâmetros significantes sobre o resultado da simulação

Oliveira (2014) destaca que os microssimuladores, de modo geral, após a execução das simulações, fornecem como saída diversas medidas de desempenho. Essas medidas podem ser compreendidas como a atribuição de um valor a determinada grandeza, servindo como parâmetro para análise e comparação entre diferentes cenários (Oliveira, 2014). No caso do Aimsun Next, software adotado nesta

pesquisa, são disponibilizados diversos indicadores de desempenho, como fluxo, velocidade, densidade, tempo de viagem, atraso, tempo de espera, entre outros. Durante a modelagem, cabe ao usuário definir quais dessas métricas são relevantes para a análise, considerando as especificidades da rede simulada.

Dada sua ampla utilização em estudos voltados à avaliação de cenários alternativos de geometria viária e controle de tráfego em rede, Ayala e Jacques (2013) adotaram em seu estudo, como principais medidas de desempenho, o tempo médio de atraso e o comprimento médio das filas. Após a simulação dos cenários, pode-se concluir que parâmetros como variação do tempo de reação, aceleração máxima, distância máxima entre veículos, fator de sensibilidade, tempo de reação da rede, são parâmetros destacados como importantes no processo de calibração (Ayala; Jacques, 2013).

Neste estudo, as medidas de desempenho analisadas incluíram: tempo de viagem, tempo de atraso, tempo parado, velocidade média, comprimento de filas, número de paradas e consumo de combustível, sendo essas selecionadas conforme a relevância para a avaliação dos diferentes cenários.

4.2 Construção e execução da simulação das praças de pedágio na BR-040

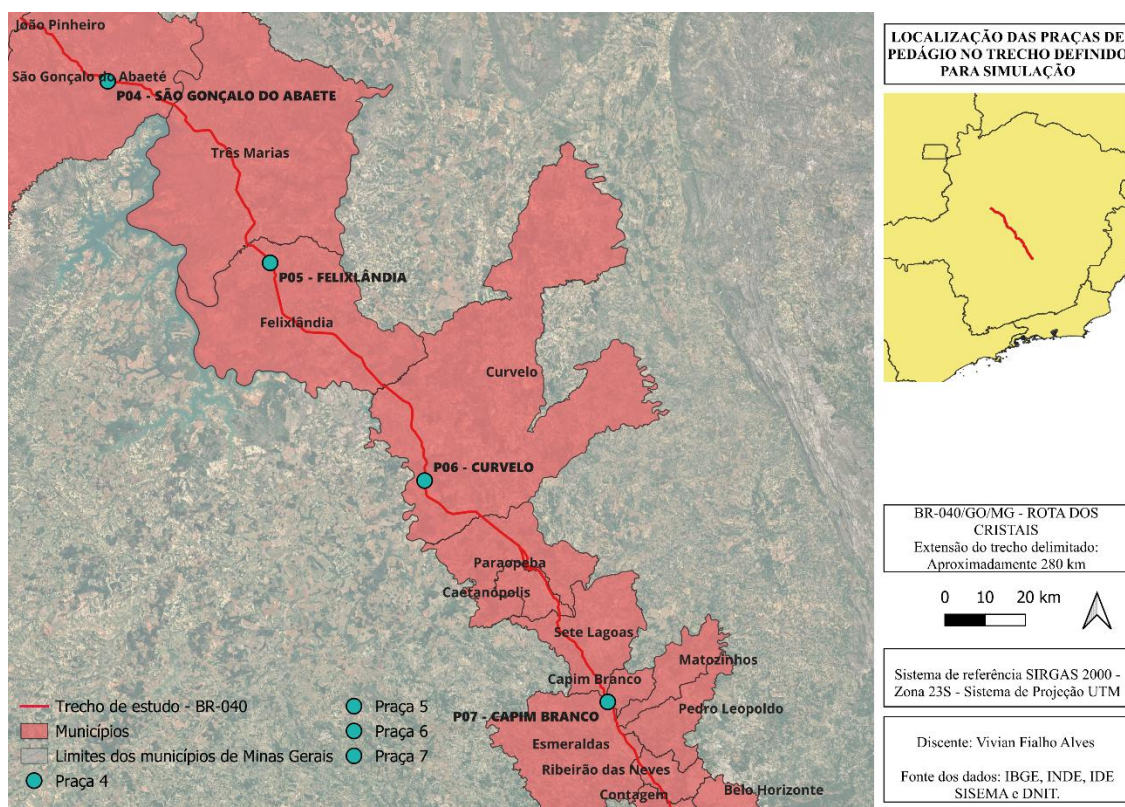
A metodologia deste estudo baseou-se na construção e execução de um modelo de microssimulação no software Aimsun Next, destinado a avaliar os efeitos operacionais e ambientais da substituição do pedágio convencional pelo sistema *free flow* no trecho concedido da BR-040, conforme citado anteriormente. A caracterização territorial da rodovia, apresentada no Capítulo 3, tem função contextual e não constitui etapa analítica do método.

A simulação foi realizada no software Aimsun Next, versão 24.0.2, reconhecido por sua capacidade de modelagem microssimulada e análise de desempenho em redes viárias complexas (Poon; Dia, 2005). Para a utilização do Aimsun, foi necessária a obtenção de uma licença estudantil, adquirida através da solicitação da docente orientadora pelo site do software. O trecho analisado corresponde ao segmento da

BR-040 sob concessão da Via Cristais, entre Belo Horizonte (MG) e Cristalina (GO), que conta atualmente com sete praças de pedágio em operação.

Devido a extensão do trecho e a limitação da versão estudantil em 200 km total de faixas e 100 nós, a área de estudo contemplou 4 praças de pedágio, destacadas na Figura 14:

Figura 14 - Praças de pedágio no trecho definido para simulação



Fonte: Autoral (2025)

Segundo o *Aimsun Next User Manual* da *Transport Simulation Systems* (2022), as redes viárias podem ser construídas manualmente, a partir da sobreposição de seções e interseções sobre uma imagem de fundo proveniente de um sistema de informações geográficas (SIG) ou de uma base cartográfica, conforme detalhado na seção de importação e exportação de dados.

Alternativamente, é possível importar diretamente os dados para o Aimsun Next a partir de fontes como o *OpenStreetMap* (OSM), o que permite, além da geometria da rede, a incorporação automática de atributos como classificação das vias, número de

faixas e limites de velocidade, conectando-se de forma automatizada nos pontos de interseção. Contudo, mesmo nesse processo automatizado, é necessário revisar e ajustar manualmente os elementos da rede importada para garantir a consistência e fidelidade do modelo. A Figura 15 representa um modelo urbano construído pelo processo mencionado, permitindo a visualização do número de faixas, movimentos possíveis entre seções e faixas de uso dedicado:

Figura 15 - Exemplo de rede urbana construída no Aimsun



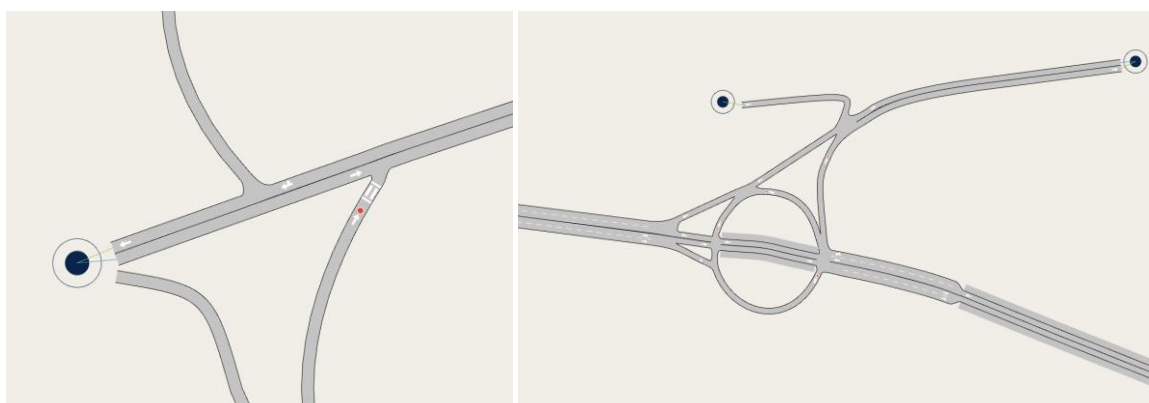
Fonte: *Aimsun Next User Manual* (2022)

No presente trabalho, a primeira etapa consistiu na modelagem do trecho estudado, ou seja, no desenho da rodovia e das praças de pedágio. Devido à grande extensão da BR-040, não foi possível utilizar a importação via OSM. Assim, optou-se pelo uso de uma camada em formato *shapefile* da BR-040 e outra contendo a localização das praças de pedágio, empregadas como base de referência para o desenho da rede no software Aimsun Next, de modo a garantir a aderência do traçado à geometria real da rodovia. A camada referente ao eixo da BR-040 foi obtida junto ao IDE-Sisema e ao DNIT, sendo posteriormente adaptada e delimitada no software QGIS para atender aos objetivos do estudo. A camada correspondente às praças de pedágio foi elaborada a partir da identificação de suas localizações por meio de imagens de satélite (Google Satellite).

A via foi desenhada respeitando os tipos de pista (simples ou dupla). As vias secundárias não foram totalmente incluídas na modelagem, tanto pela limitação de quilometragem da licença estudantil quanto pelo fato de o estudo de tráfego realizado pela ANTT (2023), indicar que não há rotas de fuga relevantes próximas às praças analisadas.

Foram produzidos cinco arquivos de rede. Dois deles referindo-se à Praça 7, em Capim Branco, separados entre os sentidos crescente e decrescente devido à extensão da pista e às limitações do software, com uma extensão total aproximada de 60 km. Dois arquivos foram dedicados à Praça 6 (Curvelo), o primeiro com extensão de cerca de 59 km e o segundo, referente a análise pontual com cerca de 9,4 km e um último arquivo reuniu as Praças 5 (Felixlândia) e 4 (São Gonçalo do Abaeté), incluindo o trecho que conecta essas duas praças, com cerca de 183,82 km. Após o desenho da rede, foram inseridos os centroides, que representam origens e destinos das viagens e são conectados às extremidades iniciais e finais de cada via, incluindo as secundárias. Na Figura 16 pode-se observar exemplos de centroides na rede do Aimsun Next.

Figura 16 - Exemplos de centroides de origem e destino no Aimsun Next



Fonte: Autoral (2026)

Após a construção das redes e da criação e nomeação dos centroides, a modelagem das interseções foi melhorada, para uma visualização mais favorável. Além disso, foram definidas as prioridades de movimento em cada faixa, para evitar o encontro de dois ou mais veículos no mesmo local. Em seguida, as faixas correspondentes as cabines de pedágio, foram configuradas de acordo com o sentido,

sendo via única ou bidirecional (crescente ou decrescente) e com o tipo de cobrança, sendo manual, mista ou automática.

Foram inseridos detectores antes e após cada praça de pedágio, configurados para registrar os volumes de tráfego simulados no Aimsun Next, permitindo identificar a quantidade de veículos e suas respectivas categorias que atravessaram cada praça.

A seguir tem-se a configuração das cabines das praças estudadas, segundo o Portal de Dados Abertos da ANTT (2025c):

- Praça de pedágio 7 – Capim Branco:
Nº de cabines: 18;
Tipos de cobrança: 6 manuais, 6 automáticas e 6 mistas;
Tipos de cabine: 12 com via única e 6 bidirecionais;
Sentido: 6 crescentes, 6 decrescentes e 6 crescentes/decrescentes.
- Praça de pedágio 6 – Curvelo:
Nº de cabines: 8;
Tipos de cobrança: 3 manuais, 2 mistas e 3 automáticas;
Tipos de cabine: 6 com via única e 2 bidirecionais;
Sentido: 3 crescentes, 3 decrescentes e 2 crescentes/decrescentes.
- Praça de pedágio 5 – Felixlândia:
Nº de cabines: 8;
Tipos de cobrança: 3 manuais, 2 mistas e 3 automáticas;
Tipos de cabine: 6 com via única e 2 bidirecionais;
Sentido: 3 crescentes, 3 decrescentes e 2 crescentes/decrescentes.
- Praça de pedágio 4 – São Gonçalo do Abaeté:
Nº de cabines: 8;
Tipos de cobrança: 3 manuais, 2 mistas e 3 automáticas;
Tipos de cabine: 6 com via única e 2 bidirecionais;
Sentido: 3 crescentes, 3 decrescentes e 2 crescentes/decrescentes.

Para realizar a configuração das faixas, antes foi necessário criar tipos de faixas nos dados de infraestrutura do projeto e reservá-las conforme o tipo de cobrança, manual ou automática. Para a definição de quais veículos adotariam determinado tipo

de cobrança, nos dados de demanda foram criadas duas classes (manual e automática), e 6 tipos de veículos (caminhão manual e automático, carro manual e automático e motocicleta manual e automática) baseados nas classes dos veículos do Volume Diário Médio fornecido pela empresa Imtraff Engenharia e Mobilidade. Essa base considera três grupos: motocicletas; veículos leves, correspondentes a automóveis (2, 3 e 4 eixos); e veículos comerciais/pesados, correspondentes a caminhões (2 ou mais eixos).

Com base nessas informações, tornou-se possível a criação da matriz origem-destino (OD) de alocação de tráfego para cada centroide. No caso das Praças 4 e 5, por estarem inseridas no mesmo arquivo de simulação, foi possível acompanhar, de forma integrada, os veículos que atravessaram ambas as estruturas. Ressalta-se que os volumes utilizados para cada praça foram inseridos separadamente na planilha de demanda, mantendo-se os valores específicos de cada ponto de cobrança, sem adoção do maior volume ou agregação indevida dos fluxos.

Com esses parâmetros definidos, foram criados controles de acesso para cada faixa correspondente a cada cabine, nos quais o tipo de controle de acesso foi definido como “Atraso”, visto que estava sendo analisado o tempo de atendimento e de espera na fila. O controlador foi configurado como “Fixo”, já que não houve alteração no modo de cobrança ao longo da simulação. Além disso, cada controle de acesso foi parametrizado para atuar sobre classes específicas de veículos previamente definidas nos dados de demanda (manual, automático ou ambos, no caso de cabine mista), incorporando o valor médio do tempo de atendimento/atraso (em segundos) e seu respectivo desvio padrão, conforme exigido pelo software.

Em relação aos tempos de atendimento dos veículos nas praças de pedágio, estes foram definidos com base no Estudo de Tráfego da Concessão da Rota dos Cristais (ANTT, 2023), no qual foram apresentados tempos por classe veicular fundamentados em parâmetros de dimensionamento das cabines de cobrança, os quais refletem condições operacionais consolidadas e consideram o tipo de cabine. Assim, para cabines manuais, consideraram-se tempos médios de 14 s para automóveis e 30 s para veículos comerciais/pesados, enquanto para cabines automáticas adotaram-se

tempos de 4 s para automóveis e 6 s para veículos comerciais, valores associados, respectivamente, às capacidades operacionais indicadas nos documentos técnicos da concessionária Via Cristais (ANTT, 2023).

Esses tempos encontram respaldo nas faixas de referência apresentadas no Manual de Referência para Concepção, Dimensionamento e Implementação de Praças de Pedágio, elaborado sob coordenação da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, para pistas manuais com parada obrigatória e para pistas automáticas (ENGIMIND Brasil, 2018). Optou-se pela utilização desses parâmetros por se tratarem de valores oficiais adotados no dimensionamento da própria concessão, conferindo maior aderência ao contexto estudado. Entretanto, os volumes simulados neste estudo poderiam superar aqueles considerados no estudo de tráfego original, especialmente na Praça 7, em Capim Branco. Nesses casos, a ocorrência de filas e condições de saturação não indica inadequação dos parâmetros de atendimento, mas sim que a demanda simulada excede a capacidade de projeto das praças convencionais.

O estudo de tráfego da concessão da Rota dos Cristais não apresentou tempo de atendimento específico para motocicletas. Dessa forma, adotou-se, para essa classe veicular, o mesmo tempo médio de atendimento dos veículos leves nas cabines manuais, por similaridade operacional e por se tratar de um sistema de cobrança sem pagamento em dinheiro.

No cenário de cobrança em sistema *free flow*, assumiu-se tempo de atendimento nulo para todas as classes veiculares, uma vez que não há parada nem interferência direta no fluxo de tráfego. A velocidade diretriz de 80 km/h foi adotada nos trechos rodoviários analisados por representar um valor compatível com práticas operacionais recentes aplicadas na própria BR-040, onde concessionárias têm estabelecido esse limite com base em critérios técnicos de segurança viária, características geométricas e tráfego misto, especialmente em segmentos ainda não totalmente adequados ao padrão de via expressa.

Para a área da praça de pedágio, adotou-se a velocidade de 40 km/h, conforme regulamentação operacional definida pela concessionária Via Cristais. Esse valor foi

confirmado por meio da sinalização vertical existente no local, verificada a partir de imagens de satélite disponíveis no Google Earth, garantindo a coerência entre o parâmetro utilizado na simulação e a operação real da infraestrutura.

Para a representação da variabilidade do processo de atendimento, exigida pelo Aimsun por meio da definição de desvios-padrão associados aos tempos médios, adotou-se um critério proporcional, considerando-se o desvio-padrão equivalente a aproximadamente um terço do tempo médio de atendimento de cada classe veicular. Essa escolha encontra respaldo na literatura clássica de simulação e teoria das filas, que recomenda o uso de coeficientes de variação moderados quando não se dispõe de dados empíricos detalhados, de modo a representar a dispersão natural dos tempos de serviço sem introduzir variabilidade excessiva no modelo (Banks *et al.*, 2010; Law, 2015).

Os dados de volumes diários de tráfego, segmentados por categoria veicular, foram obtidos a partir de contagens realizadas no período de março a julho de 2025. As informações foram disponibilizadas pela empresa Imtraff Engenharia e Mobilidade, por meio da plataforma Microsoft Teams, conforme Apêndice E, empresa que já desenvolveu estudos técnicos na região. Em razão de os volumes não apresentarem desagregação por sentido de circulação (crescente e decrescente), tampouco por forma de cobrança (manual ou automática), informações necessárias para a adequada representação operacional no software de simulação Aimsun Next, foram utilizados os dados abertos disponibilizados pela ANTT, referentes ao ano de 2025 (ANTT, 2025c), para o mesmo trecho rodoviário e praças de pedágio, os quais apresentam a distribuição do tráfego por sentido e por tipo de cobrança, ainda que em base mensal. Ressalta-se que tais dados não foram empregados para a definição de volumes absolutos, mas exclusivamente para a obtenção de proporções relativas, posteriormente aplicadas ao Volume Médio Diário (VMD) disponibilizado para o estudo.

Assumiu-se, portanto, que a composição percentual do tráfego observada no período mensal analisado é representativa da distribuição média diária. Para os veículos leves e pesados, o volume total foi inicialmente desagregado por forma de

cobrança (manual e automática), conforme as proporções observadas nos dados abertos da ANTT, já para as motocicletas, isso não foi necessário, visto que a forma de cobrança era apenas uma. Essa etapa antecede a distribuição direcional, uma vez que o método de cobrança está diretamente associado à configuração física e operacional da praça de pedágio.

Na sequência, os volumes correspondentes a cada forma de cobrança foram distribuídos entre os sentidos crescente e decrescente, aplicando-se as proporções específicas observadas para cada modalidade de cobrança. Dessa forma, garantiu-se a coerência entre a composição do tráfego e a operação da praça, resultando na definição dos fluxos de entrada utilizados na simulação.

Foram elaborados dois tipos de planilha de volumes, referentes a cada praça, para inserção e análise dos cenários no Aimsun. Primeiramente, considerando que o objetivo da simulação é a representação de condições médias de funcionamento da praça, e não a análise de eventos pontuais ou variações específicas de um determinado mês, optou-se pela utilização da média aritmética dos volumes mensais disponíveis como dado de entrada no modelo. E em segundo, foram selecionados os dados do mês com maior volume, para avaliar a criticidade, e assim gerados os arquivos em csv (compatíveis com a entrada do software).

Após a obtenção dos volumes de tráfego, os conjuntos de dados reais correspondentes ao volume crítico e ao volume médio foram inseridos no Aimsun Next e associados aos respectivos detectores da rede. Para essa etapa, adotou-se o tempo relativo em segundos, o separador de colunas no formato ponto e vírgula, e a tabela de posição e tipo foi configurada de forma consistente com a organização das planilhas de volume, respeitando a mesma ordem dos títulos das colunas e das linhas, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Leitor de arquivo simples do conjunto de dados reais no Aimsun Next

Arquivo: C:/Users/Vivian/Downloads/Volume medio praça 7 decrescente.csv

Configurações do ID
 ID: Nome Tipo de Objeto: Detector ☐ Usar o Nome do Arquivo como ID

Configurações da Data e Hora
 Início: 13/01/2026 Início: 00:00:00
 Formato: Tempo Relativo (Segundos)
☐ Agregar Dados a cada: 00:00:00

Lendo Configurações
 Linhas para Pular (do Início do Arquivo): 1

Colunas
 Separador de Colunas: Ponto e Vírgula
 Separador Decimal: Sistema

Posição	Tipo	Tipo de Veículo
1	ID	
2	Veículo	
3	Contagem	
4	Tempo	

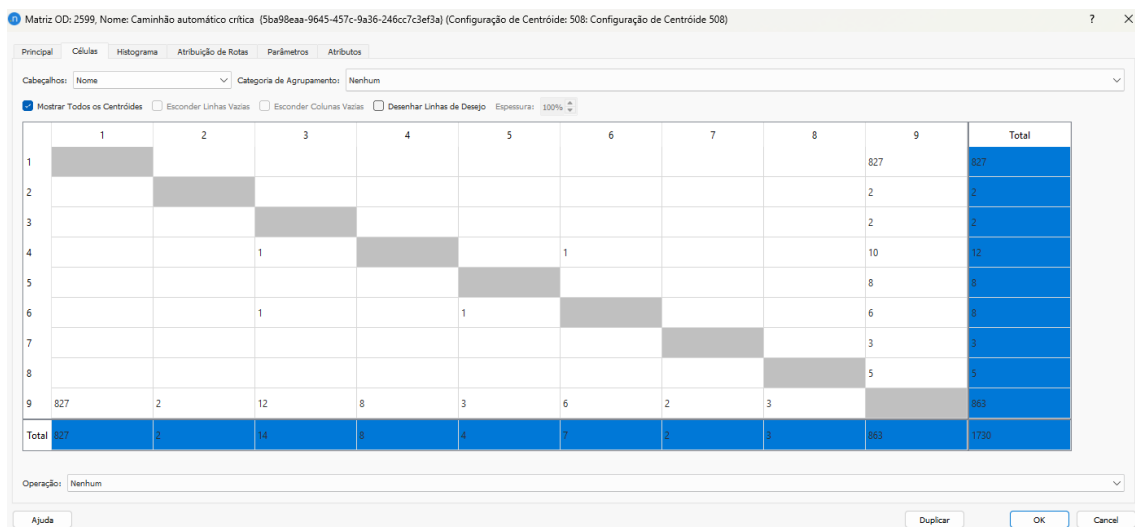
Adicionar Excluir Acima Abaixo

Ajuda OK Cancel

Fonte: Aimsun (2025)

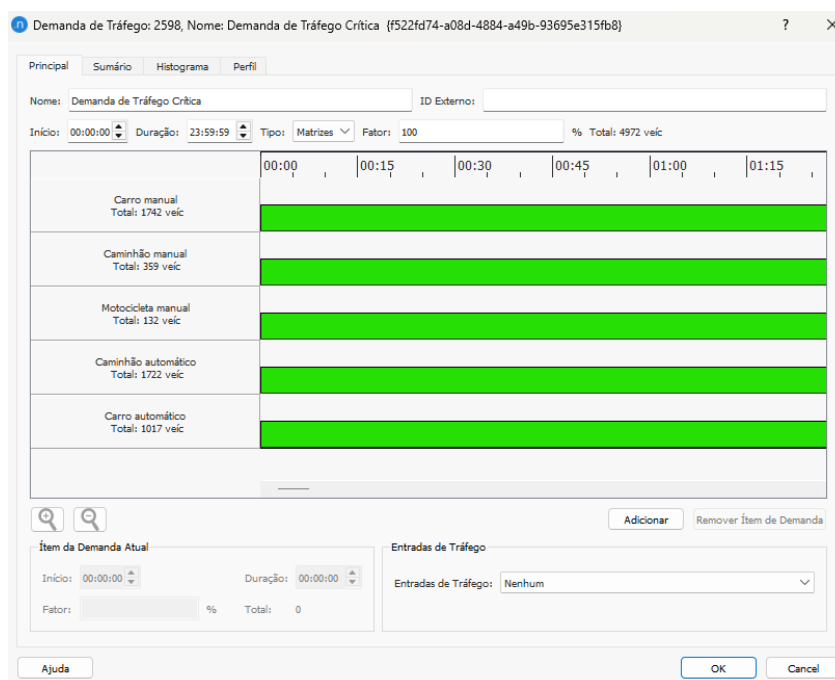
A partir dos volumes disponíveis, foram elaboradas matrizes origem-destino (OD) específicas para cada classe veicular e para cada cenário analisado, médio e crítico, totalizando dez matrizes OD. Adicionalmente, foram configuradas duas demandas de tráfego, correspondentes aos cenários médio e crítico, ambas definidas para um período de 24 horas e posteriormente aplicadas nos cenários de simulação. Cada demanda de tráfego foi composta pela somatória dos volumes de cada classe veicular, devidamente alocados em suas respectivas matrizes OD. A Figura 18 e a Figura 19 apresentam, respectivamente, um exemplo de matriz OD e um exemplo de demanda de tráfego.

Figura 18 - Matriz OD criada para a classe caminhão com volume crítico



Fonte: Adaptado de Aimsun (2025)

Figura 19 - Demanda de tráfego criada para o volume crítico



Fonte: Adaptado de Aimsun (2025)

A calibração do modelo foi conduzida à luz das etapas propostas por Hellinga (1998), contemplando a definição prévia dos objetivos e das medidas de desempenho, bem como a reprodução das condições operacionais observadas no trecho analisado,

tendo como referência os dados de tráfego coletados em campo. A demanda foi alocada manualmente nos acessos da rede, uma vez que a alocação automática baseada em matrizes OD gerou volumes inconsistentes com as contagens observadas. Os parâmetros comportamentais dos veículos e condutores foram mantidos, em sua maioria, nos valores padrão do simulador em razão da inexistência de dados locais que permitissem calibração comportamental detalhada.

Assim, o processo de calibração concentrou-se principalmente na configuração estrutural da rede e no controle da demanda, em consonância com a segunda fase descrita por Hellinga (1998). No que se refere à terceira fase do processo de calibração, não foi realizada uma validação estatística formal do modelo, uma vez que o objetivo do estudo não consistiu na previsão de demanda ou na generalização dos resultados, mas na comparação relativa do desempenho operacional e ambiental entre os cenários de pedágio convencional e sistema *free flow*, sob condições de tráfego equivalentes. Dessa forma, a manutenção das mesmas condições de entrada em ambos os cenários assegura a coerência das comparações efetuadas.

Adicionalmente, foi realizada uma verificação da consistência interna do modelo por meio da comparação entre os volumes de tráfego inseridos na demanda e os volumes registrados pelos detectores posicionados nas proximidades das praças de pedágio. As diferenças observadas mostraram-se reduzidas e compatíveis com o comportamento esperado em modelos de microsimulação de tráfego, nos quais pequenas variações podem ocorrer em função da média entre replicações e da permanência de veículos na rede ao final do período de simulação.

Antes de iniciar a criação dos cenários, as classes de veículos foram calibradas com os parâmetros ambientais, para a análise da emissão de poluentes. A estimativa dessas emissões foi realizada por meio dos modelos ambientais incorporados ao simulador Aimsun, os quais calcularam poluentes e consumo de combustível a partir dos perfis microscópicos de velocidade e aceleração dos veículos simulados. Foram utilizados os parâmetros ambientais disponibilizados pelo próprio simulador e descritos em seu manual técnico, uma vez que, após revisão da literatura e da documentação técnica disponível, não foram identificados conjuntos de parâmetros

de emissão especificamente calibrados para a frota brasileira e oficialmente integrados ao Aimsun.

Dessa forma, adotaram-se os parâmetros padrão do modelo como aproximação consistente para a análise comparativa proposta, considerando que o objetivo do estudo não foi a quantificação absoluta das emissões, mas a avaliação relativa das variações de desempenho ambiental entre cenários operacionais distintos, sob a mesma base de tráfego simulada.

Na Tabela 1, estão descritos os parâmetros utilizados em cada modelo, sendo: F_i , a taxa de consumo de combustível para veículos em marcha lenta (mL/s); C_1 e C_2 , constantes da equação da taxa de consumo para veículos em aceleração (mL/s e mL·s²/m²); F_1 , a taxa de consumo de combustível (L/100 km) para veículos em velocidade constante de 90 km/h; F_2 , a taxa de consumo de combustível (L/100 km) para veículos em velocidade constante de 120 km/h; F_d , a taxa de consumo de combustível para desaceleração (mL/s); e V_m , a velocidade na qual a taxa de consumo de combustível (mL/s) é mínima em regime de cruzeiro. No caso dos parâmetros ambientais, CO representa o monóxido de carbono, NO_x, os óxidos de nitrogênio, e HC, os hidrocarbonetos.

Tabela 1 - Parâmetros Ambientais disponibilizados no manual do Aimsun

MODELO	VEÍCULO	PARÂMETRO	VALOR A SER ADOTADO	UNIDADE
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	F_i	0,333	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	C_1	0,420	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	C_2	0,260	ml/s ² /m ²
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	F_d	0,537	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	F_1	5,4	(l/100km a 90km/h)
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	F_2	6,5	(l/100km a 120km/h)

MODELO	VEÍCULO	PARÂMETRO	VALOR A SER ADOTADO	UNIDADE
Modelo de Consumo de Combustível	Carro médio/grande (C/D)	Vm	60	km/h
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	Fi	0,333	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	C1	0,420	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	C2	0,260	ml/s ² /m ²
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	Fd	0,537	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	F1	15-25	(l/100km a 90km/h)
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	F2	16-24	(l/100km a 120km/h)
Modelo de Consumo de Combustível	Caminhão	Vm	50	km/h
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	Fi	0,333	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	C1	0,420	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	C2	0,260	ml/s ² /m ²
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	Fd	0,537	ml/s
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	F1	2,8-4,8	(l/100km a 90km/h)
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	F2	3,2-5,7	(l/100km a 120km/h)
Modelo de Consumo de Combustível	Moto	Vm	50	km/h
Modelo QUARTET	Carro	CO	0,060	g/s (marcha lenta)

MODELO	VEÍCULO	PARÂMETRO	VALOR A SER ADOTADO	UNIDADE
Modelo QUARTET	Carro	CO	0,377	g/s (aceleração)
Modelo QUARTET	Carro	CO	0,072	g/s (desaceleração)
Modelo QUARTET	Carro	CO	0,129	g/s (velocidade de cruzeiro – 40km/h)
Modelo QUARTET	Carro	CO	0,177	g/s (velocidade de cruzeiro – 70km/h)
Modelo QUARTET	Carro	NOx	0,0008	g/s (marcha lenta)
Modelo QUARTET	Carro	NOx	0,0100	g/s (aceleração)
Modelo QUARTET	Carro	NOx	0,0005	g/s (desaceleração)
Modelo QUARTET	Carro	NOx	0,0022	g/s (velocidade de cruzeiro – 40km/h)
Modelo QUARTET	Carro	NOx	0,0058	g/s (velocidade de cruzeiro – 70 km/h)
Modelo QUARTET	Carro	HC	0,0067	g/s (marcha lenta)
Modelo QUARTET	Carro	HC	0,0200	g/s (aceleração)
Modelo QUARTET	Carro	HC	0,0067	g/s (desaceleração)
Modelo QUARTET	Carro	HC	0,0128	g/s (velocidade de cruzeiro – 40km/h)
Modelo QUARTET	Carro	HC	0,0136	g/s (velocidade de cruzeiro – 70km/h)

Fonte: Manual do Aimsun Next 24 (2024)

O Modelo de Emissão Panis *et al.*, encontra-se incorporado ao Aimsun com parametrização padrão definida no próprio simulador, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Exemplo de parâmetros do Modelo Panis *et al.* no Aimsun

	Limite Inferior	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
>= -0.5 m/s2	0,00e+00	4,47e-03	7,32e-07	-2,87e-08	-3,41e-06	4,94e-06	1,66e-06
< -0.5 m/s2	0,00e+00	2,63e-03	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00

Fonte: Aimsun Next (2025)

Seguidamente a construção e calibração das redes com as quatro praças de pedágio, 4 cenários foram criados, para cada praça:

- **Cenário 1 – Operação atual média (volume médio):** simulação com as praças em funcionamento, reproduzindo o cenário real atual da concessão;
- **Cenário 2 – Operação atual crítica (volume mensal crítico):** simulação com as praças em funcionamento, reproduzindo o cenário real atual da concessão e avaliando o maior volume registrado pelas praças em determinado mês de coleta de dados;
- **Cenário 3 – Livre de pedágios (volume médio):** todas as cinco praças de pedágio serão retiradas de suas redes, simulando uma operação por sistema de livre passagem (*free flow*);
- **Cenário 4 – Livre de pedágios (volume mensal crítico):** todas as cinco praças de pedágio serão retiradas de suas redes, simulando uma operação por sistema de livre passagem (*free flow*), e avaliando o maior volume registrado pelas praças em determinado mês de coleta de dados.

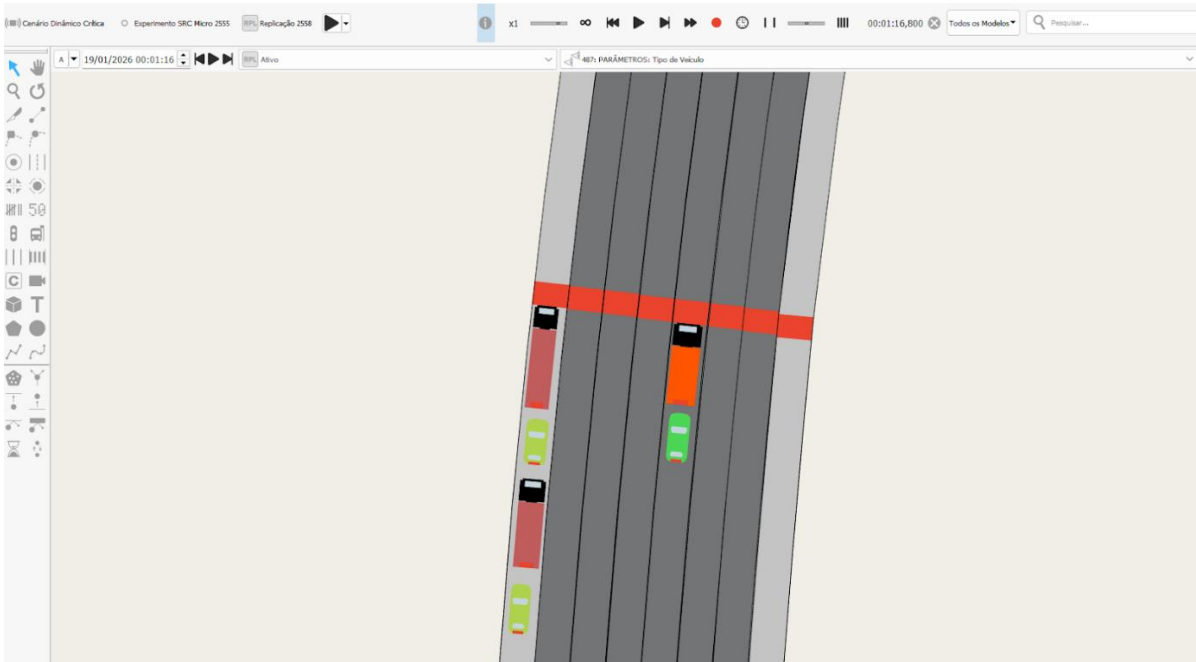
Os cenários de simulação foram definidos como cenários dinâmicos, permitindo representar a variação da demanda de tráfego ao longo do tempo e aplicar planos de

controle associados aos elementos operacionais modelados, como os controles de acesso que representam as cabines das praças de pedágio, com seus respectivos tempos de atendimento. Para cada cenário foram criados experimentos de simulação ajustados às características da rede analisada. As simulações foram realizadas com um período inicial de aquecimento (*warm-up*) de 1 hora, adotado para evitar que os resultados fossem influenciados pela condição inicial da rede vazia. Esse período permite que o tráfego se distribua na rede, que filas se formem de maneira realista e que as velocidades se estabilizem antes do início da coleta dos resultados.

A escolha de rotas foi modelada por meio do modelo estocástico C-Logit disponível no Aimsun. Apesar da rede apresentar essencialmente um único percurso predominante, a utilização de um modelo estocástico garante maior estabilidade ao processo de simulação ao longo do tempo, uma vez que pequenas variações operacionais não geram mudanças abruptas na distribuição do tráfego, fazendo com que, na prática, o modelo se comporte de forma equivalente a um Logit convencional, sem influência significativa sobre os resultados.

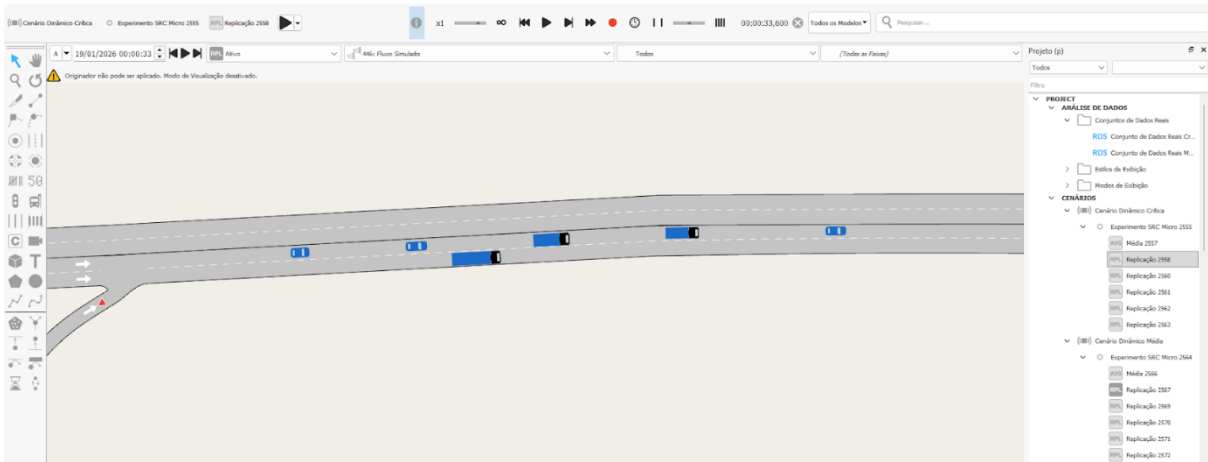
Para cada experimento foram realizadas cinco replicações, com o objetivo de considerar a variabilidade do modelo microscópico e obter resultados médios mais representativos. Posteriormente à realização desses ajustes, os experimentos foram ativados, sendo executadas cinco replicações em cada, a partir das quais foram calculados os valores médios dos resultados obtidos. A Figura 21, a Figura 22 e a Figura 23, ilustram a execução de um dos cenários simulados em uma das praças de pedágio. Os controles de acesso são representados na cor vermelha durante o tempo de atendimento dos veículos, indicando a condição de bloqueio. Quando o controle passa para a cor verde, sinaliza a liberação do acesso, permitindo que o veículo prossiga.

Figura 21 - Representação de veículos na fila de espera da praça de pedágio



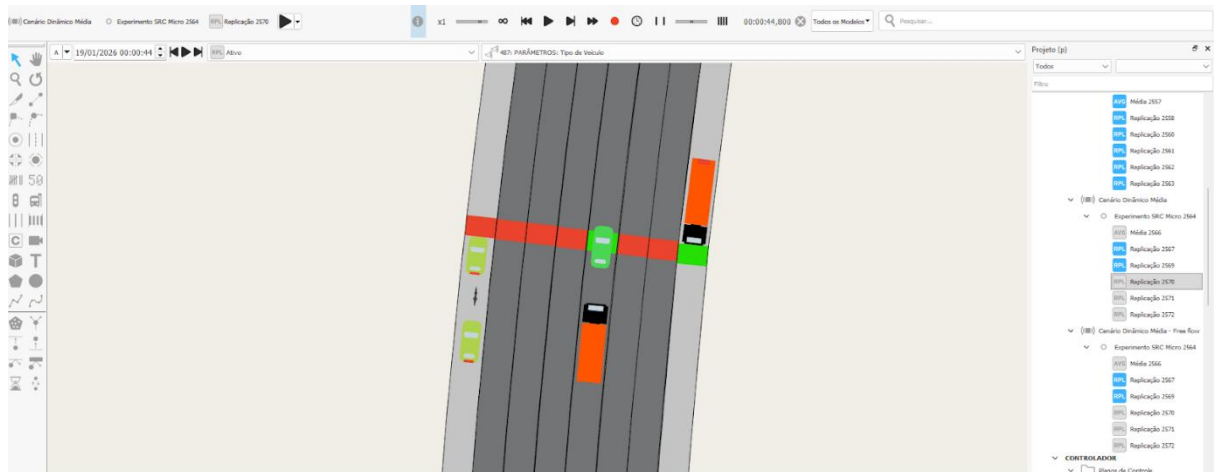
Fonte: Aimsun Next (2026)

Figura 22 - Representação de veículos passando por uma rodovia no Aimsun Next



Fonte: Aimsun Next (2026)

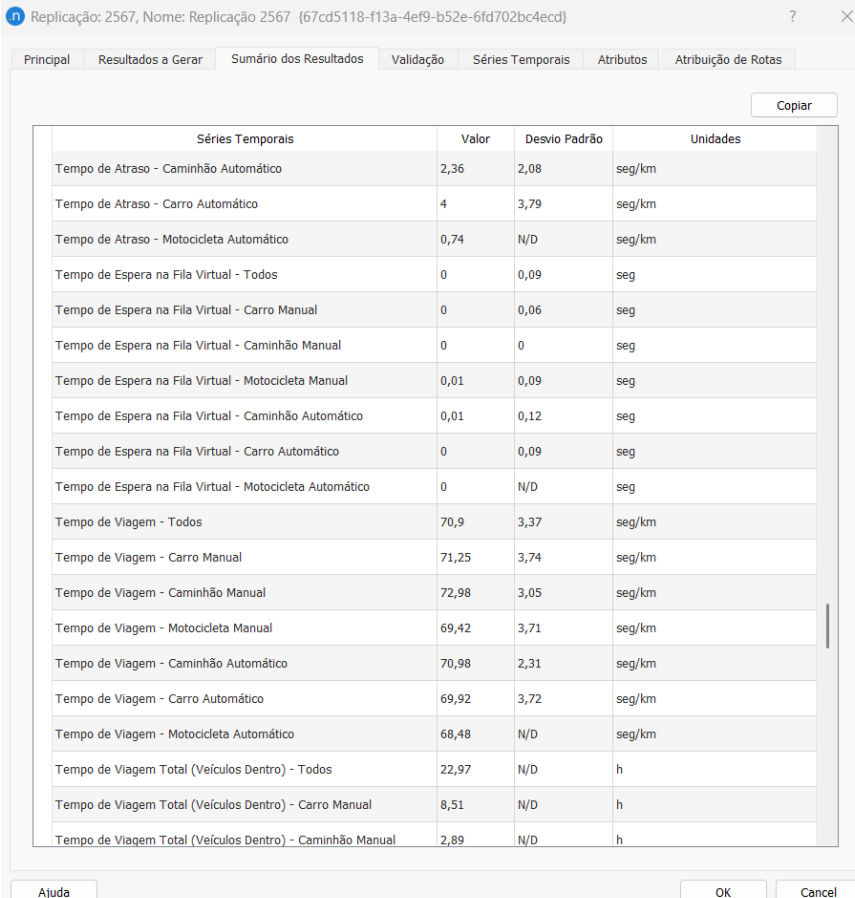
Figura 23 - Representação de veículos passando pelas cabines de uma praça de pedágio



Fonte: Aimsun Next (2026)

Após a execução da simulação, o software forneceu uma série de indicadores estatísticos de desempenho. Entre os principais dados de saída estavam: fluxo (veículos/hora), velocidade média (km/h), velocidade (km/h), tempo de viagem (seg/km) e tempo de atraso (seg/km), entre outros parâmetros. No caso dos modelos ambientais, existem estatísticas específicas como consumo de combustível, emissão LEM, consumo de bateria, etc. Os resultados foram armazenados automaticamente e em seguida exportados para análise externa em formatos de Excel. A Figura 24 mostra um exemplo de saída dos resultados de uma replicação.

Figura 24 - Sumário de resultados após fim de replicação em um cenário no Aimsun Next



Replicação: 2567, Nome: Replicação 2567 {67cd5118-f13a-4ef9-b52e-6fd702bc4ecd}

Principal Resultados a Gerar Sumário dos Resultados Validação Séries Temporais Atributos Atribuição de Rotas

Copiar

Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Tempo de Atraso - Caminhão Automático	2,36	2,08	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Automático	4	3,79	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta Automático	0,74	N/D	seg/km
Tempo de Espera na Fila Virtual - Todos	0	0,09	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Carro Manual	0	0,06	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Caminhão Manual	0	0	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Motocicleta Manual	0,01	0,09	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Caminhão Automático	0,01	0,12	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Carro Automático	0	0,09	seg
Tempo de Espera na Fila Virtual - Motocicleta Automático	0	N/D	seg
Tempo de Viagem - Todos	70,9	3,37	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Manual	71,25	3,74	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Manual	72,98	3,05	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	69,42	3,71	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Automático	70,98	2,31	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Automático	69,92	3,72	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta Automático	68,48	N/D	seg/km
Tempo de Viagem Total (Veículos Dentro) - Todos	22,97	N/D	h
Tempo de Viagem Total (Veículos Dentro) - Carro Manual	8,51	N/D	h
Tempo de Viagem Total (Veículos Dentro) - Caminhão Manual	2,89	N/D	h

Ajuda OK Cancel

Fonte: Aimsun Next (2026)

A avaliação ambiental foi baseada na estimativa de emissão dos seguintes poluentes: CO₂ (dióxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), PM (material particulado), CO (monóxido de carbono), HC (hidrocarbonetos) e VOCs (compostos orgânicos voláteis). Por fim, foi comparado o resultado entre os cenários, considerando os fatores operacionais e ambientais e avaliado o impacto da remoção a das praças sobre o desempenho e emissões.

5. Resultados

A análise dos resultados foi conduzida a partir da variação percentual dos parâmetros operacionais e ambientais decorrentes da substituição do sistema convencional de cobrança pelo sistema *free flow*, considerando os cenários de volume médio e volume crítico. As Praças 4 e 5 foram analisadas de forma conjunta por

estarem inseridas no mesmo trecho rodoviário, enquanto as Praças 6 e 7 foram avaliadas individualmente. Valores inferiores a 1% foram desconsiderados na discussão, por apresentarem baixa relevância frente às incertezas inerentes à modelagem microscópica. As tabelas com os valores integrais estão presentes nos Apêndices, ao final deste trabalho.

Observou-se que os resultados associados às emissões totais e às emissões interurbanas apresentaram magnitudes semelhantes. Embora o tráfego rodoviário analisado seja predominantemente classificado como interurbano, a presença de praças de pedágio convencionais impõe, de forma localizada, regimes operacionais típicos do tráfego urbano. Nesse contexto, os indicadores de emissão não interurbana mostram-se metodologicamente mais adequados para captar os impactos operacionais introduzidos pela presença — e posterior eliminação — da praça de pedágio, por serem mais sensíveis aos regimes de parada, desaceleração e aceleração característicos da cobrança convencional.

De forma geral, os resultados obtidos para todas as praças analisadas apresentaram comportamento semelhante, permitindo a realização de uma discussão integrada, com foco nos padrões observados e nas tendências comuns aos diferentes trechos e cenários. Os resultados correspondentes a classes veiculares equivalentes foram agregados, uma vez que diferenças de nomenclatura — como “carro manual” e “carro automático” — tiveram finalidade exclusivamente operacional, associada ao direcionamento dos veículos às cabines de pedágio, não representando distinções relevantes para a análise. No caso da Praça 7, os resultados obtidos a partir de dois arquivos de simulação também foram unificados, considerando que ambos representam a mesma praça de pedágio, a qual se encontrava modelada de forma segmentada. Ressalta-se que as variações precedidas pela seta para cima (↑) indicam aumento do parâmetro analisado, ao passo que os valores com a seta para baixo (↓) correspondem a reduções. As tabelas a seguir, apresentam os resultados.

Tabela 2 - Resultados do cenário médio para as Praças 4 e 5 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO MÉDIO - P4 E P5										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	VARIAÇÃO (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	VARIAÇÃO (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	VARIAÇÃO (%)	UNIDADE
Velocidade	80,82	81,71	↑1%	76,54	77,785	↑2%	82,22	83,61	↑2%	km/h
Tempo de viagem	89,42	88,44	↓1%	94,37	92,84	↓2%	43,96	43,22	↓2%	seg/km
Consumo de combustível	13112,84	12961,94	↓1%	8320,51	8307,87	↓0,2%	266,32	260,79	↓2%	l
Tempo de atraso	5,05	4,07	↓19%	3,52	1,99	↓43%	3,24	2,5	↓23%	seg/km
Número de paradas	5686,4	194,4	↓97%	1134,2	58	↓95%	150,4	3,2	↓98%	veíc/km
Tempo parado	0,91	0,02	↓98%	1,47	0,05	↓97%	0,6	0,01	↓98%	seg/km
Fila média	1,18	0	↓100%	0,38	0	↓100%	0,05	0	↓100%	veíc

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 3 - Resultados do cenário crítico para as Praças 4 e 5 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO CRÍTICO - P4 E P5										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	79,695	80,585	↑1%	76,255	77,465	↑2%	80,3	81,53	↑2%	km/h
Tempo de viagem	90,55	89,55	↓1%	94,61	93,12	↓2%	44,89	44,22	↓1%	seg/km
Consumo de combustível	11748,94	11604,48	↓1%	29339,8	29289,1	↓0,2%	449,43	437,89	↓3%	l
Tempo de atraso	6,62	5,62	↓15%	4,17	2,69	↓35%	4,12	3,45	↓16%	seg/km
Número de paradas	4966,6	171,4	↓97%	4042	106,8	↓97%	288,8	9,2	↓97%	veíc/km
Fila média	1,32	0	↓100%	1,03	0	↓100%	0,1	0	↓100%	veíc
Tempo parado	0,97	0	↓100%	1,46	0,01	↓99%	0,74	0	↓100%	seg/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 4 - Resultados do cenário médio para a praça 6 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO MÉDIO - P6

PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	77,54	79,12	↑2%	73,32	75,73	↑3%	78,82	81,07	↑3%	km/h
Tempo de viagem	93,19	91,33	↓2%	98,49	95,29	↓3%	45,83	44,54	↓3%	seg/km
Consumo de combustível	3766,41	3669,5	↓3%	6734,88	6712,07	↓0,3%	977,75	970,22	↓1%	l
Tempo de atraso	7,36	5,49	↓25%	6,23	3,02	↓52%	4,35	3,07	↓29%	seg/km
Número de paradas	3025	162,2	↓95%	1895,6	110,8	↓94%	76,6	4,2	↓95%	veíc/km
Tempo parado	2,13	0,03	↓99%	3,19	0,09	↓97%	1,49	0,01	↓99%	seg/km
Fila média	0,86	0	↓100%	0,43	0	↓100%	0,03	0	↓100%	veíc

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 5 - Resultados do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO CRÍTICO - P6										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	77,25	78,84	↑2%	73,66	75,95	↑3%	77,94	80,61	↑3%	km/h
Tempo de viagem	93,54	91,65	↓2%	97,99	95	↓3%	46,35	44,8	↓3%	seg/km
Consumo de combustível	4011,98	3904,76	↓3%	7634,79	7609,14	↓0,3%	125,84	120,11	↓5%	l
Tempo de atraso	7,76	5,85	↓25%	5,96	2,97	↓50%	4,97	3,42	↓31%	seg/km
Número de paradas	3198	146	↓95%	1967,6	63,2	↓97%	143,2	17	↓88%	veíc/km
Tempo parado	2,18	0,01	↓100%	2,98	0,04	↓99%	1,72	0,04	↓98%	seg/km
Fila média	0,95	0	↓100%	0,45	0	↓100%	0,05	0	↓100%	veíc

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 6 - Resultados do cenário médio para a praça 7 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO MÉDIO - P7										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	83,90	84,81	↑1%	76,88	78,32	↑2%	86,18	87,48	↑2%	km/h
Consumo de combustível	40336,38	40081,76	↓1%	63325,82	63243,2	↓0,1%	1265,46	1251,64	↓1%	l
Tempo de viagem	172,57	170,73	↓1%	187,7	184,26	↓2%	83,96	82,72	↓1%	seg/km
Tempo de atraso	6,07	4,76	↓22%	6,07	5,29	↓13%	3,16	2,22	↓30%	seg/km
Número de paradas	16848	1016	↓94%	16848	1016	↓94%	846,8	71	↓92%	veíc/km
Fila média	2,73	0,01	↓100%	2,73	0,01	↓100%	0,17	0	↓100%	veíc
Tempo parado	1,3	0	↓100%	2,59	0,08	↓97%	0,94	0	↓100%	seg/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 7 - Resultados do cenário crítico para a praça 7 (parâmetros operacionais)

CENÁRIO CRÍTICO - P7										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	83,69	84,67	↑1%	76,89	78,42	↑2%	86,27	87,6	↑2%	km/h
Consumo de combustível	45216,51	44955,67	↓1%	67145,04	66999,08	↓0,2%	1359,06	1341,58	↓1%	l
Tempo de viagem	172,98	171,01	↓1%	187,71	184,02	↓2%	83,85	82,57	↓2%	seg/km
Tempo de atraso	6,38	5,05	↓21%	8,27	5,33	↓36%	3,24	2,32	↓28%	seg/km
Número de paradas	19159,6	1235,8	↓94%	9772,8	741,8	↓92%	874,6	54	↓94%	veíc/km
Fila média	3,15	0,03	↓99%	1,89	0,04	↓98%	0,17	0	↓100%	veíc
Tempo parado	1,33	0	↓100%	2,67	0,05	↓98%	0,94	0	↓100%	seg/km

Fonte: Autoral (2026)

Considerando os resultados apresentados nas Tabelas 2 a 7, observa-se que, os indicadores operacionais apresentaram as variações mais expressivas entre os cenários analisados, tanto no volume médio quanto no volume crítico. Em todas as praças, observou-se eliminação praticamente total da fila média, com reduções próximas ou iguais a 100%, além de reduções superiores a 87% no número de paradas e 97% no tempo parado para todos os tipos veiculares, o que confirma a eliminação quase total dos períodos de imobilização associados ao modelo convencional de cobrança, caracterizados pela necessidade de parada ou desaceleração nas praças de pedágio.

Esses resultados indicam que a implantação do sistema *free flow* atua de maneira direta na eliminação de interrupções do fluxo, reduzindo os regimes de *stop-and-go* observados nas praças de pedágio convencionais. Segundo *Hong Kong Public Research Institute* (2018), sistemas de pedágio eletrônico em fluxo livre permitem que os veículos transitem em velocidade compatível com a via principal, eliminando a formação de filas e reduzindo os atrasos localizados associados aos pontos de cobrança. Além disso, estudos da *Federal Highway Administration – FHWA* (2008) destacam que a remoção de pontos de fricção no fluxo veicular é particularmente relevante em condições de elevada demanda, uma vez que pequenas interferências operacionais podem desencadear congestionamentos significativos.

A redução do tempo de atraso apresentou magnitudes intermediárias, variando, de modo geral, entre aproximadamente 13% segundo a Tabela 6, e 52%, segundo a Tabela 4. Não se observou diferença sistemática entre as magnitudes das reduções percentuais obtidas nos cenários de volume médio e volume crítico, o que pode ser explicado pela proximidade entre os volumes analisados e pela concentração dos impactos do sistema *free flow* na eliminação da parada, independentemente de pequenas variações na demanda. Alguns indicadores associados aos caminhões apresentaram, em diversos casos, reduções percentuais iguais ou próximas às observadas para os veículos leves. Esse comportamento é coerente com a literatura, que indica que veículos pesados são mais penalizados em regimes de parada e aceleração, em razão de suas maiores demandas energéticas e da menor relação

potência-peso, tornando-os particularmente sensíveis a padrões de condução do tipo *stop-and-go* (Barth; Boriboonsomsin, 2009). Assim, a eliminação dessas condições operacionais tende a gerar ganhos relativos relevantes para essa categoria veicular (Barth; Boriboonsomsin, 2009).

As reduções observadas no tempo total de viagem foram relativamente discretas, situando-se, em geral, entre 1% e 3%. Esse comportamento está diretamente associado à extensão dos trechos analisados, que variam aproximadamente entre 50 km e 184 km. Nessas condições, a área de influência direta das praças de pedágio corresponde a uma parcela limitada do percurso total, de modo que as melhorias operacionais promovidas pelo sistema *free flow*, embora significativas localmente, tendem a se diluir quando o tempo de deslocamento é avaliado de forma agregada ao longo de todo o trecho.

A velocidade média apresentou variações igualmente modestas, normalmente inferiores a 3%, possivelmente porque a implantação do *free flow* não altera a velocidade regulamentar nem a geometria da via, mantendo inalterado o regime de cruzeiro predominante ao longo dos segmentos rodoviários. Segundo análise de conversões de sistemas de pedágio tradicional para sistemas de cobrança eletrônica em fluxo livre, os veículos conseguem manter velocidades médias mais próximas às velocidades regulamentares após a conversão, especialmente durante períodos de menor congestionamento, porque as paradas ou desacelerações associadas às praças convencionais são eliminadas, não porque a velocidade máxima permitida da via foi alterada (Eilbert *et al.*, 2022).

No que se refere ao consumo de combustível, observaram-se reduções de pequena magnitude, entre 1% e 5% para carros e caminhões, com valores ligeiramente superiores para motocicletas em algumas praças. Esses resultados refletem o fato de que, em trechos longos, os períodos de parada, desaceleração e aceleração representam apenas uma fração do deslocamento total. Dessa forma, a supressão do regime *stop-and-go* promove ganhos energéticos pontuais que, quando analisados em escala extensa, tornam-se menos expressivos.

A literatura indica que os maiores benefícios energéticos são observados quando intervenções atuam sobre contextos originalmente caracterizados por tráfego interrompido, nos quais a elevada frequência de paradas, acelerações e desacelerações representa um fator relevante de penalização do consumo. Nesses casos, a eliminação desses eventos resulta em reduções mais expressivas do consumo energético quando comparadas a cenários já operando em regime de fluxo mais contínuo. Conforme demonstrado por Barth e Boriboonsomsin (2010), a redução da instabilidade do fluxo veicular — caracterizada pela diminuição de paradas e de ciclos frequentes de aceleração e desaceleração — apresenta maior potencial de redução do consumo energético e das emissões em contextos de tráfego fortemente congestionado. Em contrapartida, em condições de fluxo mais contínuo, como em rodovias de longo curso operando próximas ao regime de cruzeiro, os ganhos energéticos associados a essas alterações tendem a ser mais limitados.

Adicionalmente, deve-se considerar que os modelos de consumo de combustível e emissão de poluentes empregados nas simulações não foram calibrados especificamente para a frota brasileira. Diferenças relacionadas à idade média dos veículos, às tecnologias embarcadas e aos padrões reais de condução podem influenciar significativamente os resultados simulados, contribuindo para a subestimação ou superestimação das variações observadas. Essas limitações decorrem da falta de dados detalhados e atualizados sobre a frota brasileira e são reconhecidas em análises nacionais de inventários de emissões, que frequentemente utilizam fatores de emissão e metodologias generalizadas não representativas da frota atual (Carvalho, 2011).

As tabelas a seguir apresentam os resultados referentes aos parâmetros ambientais.

Tabela 8 - Resultados do cenário médio para as Praças 4 e 5 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO MÉDIO P4 E P5							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	666,6	661,59	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM VOC	47051,17	46619,03	↓1%	10229,76	10185,3	↓0,4%	g
Emissão de IEM CO ₂	28919187,43	28653504,63	↓1%	22130863,12	21808186,98	↓1%	g
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	155543,72	154114,72	↓1%	119032,28	117296,74	↓1%	g/km
Emissão de IEM VOC Interurbano	253,07	250,74	↓1%	55,02	54,78	↓0,4%	g/km
Emissão de IEM NOx	4207,96	4041,32	↓4%	303977,48	301745,96	↓1%	g
Emissão de IEM NOx Interurbano	22,64	21,73	↓4%	1634,96	1622,96	↓1%	g/km
Emissão de IEM PM Interurbano	0,46	0,37	↓20%	1,67	1,15	↓31%	g/km
Emissão de IEM PM	85,17	68,32	↓20%	311,12	215,2	↓31%	g

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 9 – Resultados do cenário crítico para as Praças 4 e 5 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO CRÍTICO P4 E P5							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Emissão de IEM VOC Interurbano	17007,21	16909,73	↓1%	197,44	196,91	↓0,3%	g/km
Poluente NOx	598,72	594,02	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO ₂	26349308,87	26109339,86	↓1%	80641615,94	79645394,76	↓1%	g
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	141721,46	140430,77	↓1%	433736,14	428377,9	↓1%	g/km
Emissão de IEM VOC	43072,78	42598,76	↓1%	36708,74	36609,52	↓0,3%	g
Emissão de IEM NOx Interurbano	22,62	21,78	↓4%	5831,12	5796,54	↓1%	g/km
Emissão de IEM NOx	4205,86	4048,24	↓4%	1084139,8	1077710,91	↓1%	g
Emissão de IEM PM	78,61	64,23	↓18%	1095,26	754,34	↓31%	g
Emissão de IEM PM Interurbano	0,42	0,34	↓19%	5,89	4,05	↓31%	g/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 10 – Resultados do cenário médio para a praça 6 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO MÉDIO P6							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	191,06	188,91	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	135317,13	133397,82	↓1%	342393,15	334990,9	↓2%	g/km
Emissão de IEM CO ₂	8183099,53	8067032,05	↓1,4%	20705709,81	20258069,79	↓2%	g
Emissão de IEM NOx	38467,32	37811,8	↓2%	259061,21	256265,85	↓1%	g
Emissão de IEM VOC Interurbano	217,06	212,8	↓2%	142,66	141,94	↓1%	g/km
Emissão de IEM VOC	13126,39	12868,77	↓2%	8627,36	8583,72	↓1%	g
Emissão de IEM NOx Interurbano	25,99	24,92	↓4%	4283,88	4237,65	↓1%	g/km
Emissão de IEM PM Interurbano	0,9	0,77	↓14%	9,55	7,06	↓26%	g/km
Emissão de IEM PM	54,63	46,54	↓15%	577,59	426,89	↓26%	g

Fonte: Autorial (2026)

Tabela 11 – Resultados do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO CRÍTICO P6							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	204,94	202,64	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	144842,36	142792,23	↓1%	386253,02	378340,32	↓2%	g/km
Emissão de IEM CO ₂	8759123,31	8635144,55	↓1%	23358068,72	22879560,14	↓2%	g
Emissão de IEM VOC Interurbano	232,91	228,34	↓2%	161,84	161,09	-	g/km
Emissão de IEM VOC	14085,26	13808,49	↓2%	9786,93	9741,62	-	g
Emissão de IEM NOx	1702,23	1632,81	↓4%	293173,6	290184,12	↓1%	g
Emissão de IEM NOx Interurbano	28,15	27	↓4%	4847,96	4798,53	↓1%	g/km
Emissão de IEM PM Interurbano	0,94	0,8	↓15%	10	7,32	↓27%	g/km
Emissão de IEM PM	57,4	48,49	↓16%	604,75	442,88	↓27%	g

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 12 – Resultados do cenário médio para a praça 7 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO MÉDIO - P7							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	1337,05	1327,88	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	1571688,98	1559129,49	↓1%	3241795,24	3168117,55	↓2%	g/km
Emissão de IEM CO ₂	86364604,98	85663684,4	↓1%	182050218,1	177754196,7	↓2%	g
Emissão de IEM VOC	135115,16	133713,85	↓1%	78719,9	78138,3	↓1%	g
Emissão de IEM VOC Interurbano	2459,56	2433,92	↓1%	1403,08	1393,01	↓1%	g/km
Poluente HC	434,9	428,64	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM NOx Interurbano	233,12	226,72	↓3%	42192,66	41803,68	↓1%	g/km
Emissão de IEM NOx	12807,92	12447,61	↓3%	2367929,42	2345409,68	↓1%	g
Emissão de IEM PM Interurbano	6,89	6,17	↓10%	57,36	38,89	↓32%	g/km
Emissão de IEM PM	380,1	338,26	↓11%	3241,01	2178,87	↓33%	g

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 13 – Resultados do cenário crítico para a praça 7 (parâmetros ambientais)

CENÁRIO CRÍTICO P7							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	1513,92	1502,65	↓1%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	1766464,08	1751818,96	↓1%	3433064,41	3352994,26	↓2%	g/km
Emissão de IEM CO ₂	96966531,98	96149206,5	↓1%	192879917,9	188216060	↓2%	g
Emissão de IEM VOC	151520,07	149836,02	↓1%	83461,39	82795,79	↓1%	g
Emissão de IEM VOC Interurbano	2761,11	2730,16	↓1%	1485,88	1474,34	↓1%	g/km
Poluente HC	488,64	480,34	↓2%	-	-	-	-
Emissão de IEM NOx Interurbano	267,18	259,46	↓3%	44679,8	44507,53	↓0,4%	g/km
Emissão de IEM NOx	14668,36	14231,5	↓3%	2510312,33	2484704	↓1%	g
Emissão de IEM PM Interurbano	8,04	7,17	↓11%	59	39,26	↓33%	g/km
Emissão de IEM PM	442,58	392,89	↓11%	3312,85	2099,11	↓37%	g

Fonte: Autoral (2026)

No que se refere ao desempenho ambiental, analisando os resultados das tabelas 8 a 13, a avaliação das praças indica que as reduções percentuais de CO₂, NO_x e VOC, foram, em geral, modestas, situando-se predominantemente entre 1% e 4%, tanto para veículos leves quanto para caminhões, nos cenários médio e crítico. Esses resultados estão novamente associados à escala espacial da análise, uma vez que as emissões evitadas durante os períodos de parada e aceleração representam apenas uma fração do total emitido ao longo de trechos extensos, resultando em efeito de diluição dos ganhos ambientais.

Em relação aos hidrocarbonetos (HC), observaram-se reduções de pequena magnitude para os automóveis, atingindo valores máximos da ordem de 2%. Embora esses resultados indiquem um efeito positivo associado à eliminação das paradas e da marcha lenta nas proximidades das praças, sua relevância analítica é limitada. Além disso, a interpretação desse poluente é restrita pelo fato de que os parâmetros de consumo e emissão disponíveis para calibração contemplavam apenas a categoria de veículos leves, o que impede uma avaliação mais abrangente e comparável entre classes veiculares.

Em contrapartida, o material particulado (PM) apresentou reduções significativamente mais expressivas, variando entre 10% e 37%, variando de praça, do tipo veicular e do cenário analisado, com destaque para os veículos pesados. Essa maior sensibilidade do PM à eliminação de paradas está associada ao fato de que fluxos de tráfego mais suaves e contínuos tendem a reduzir as emissões de partículas não exauridas, principalmente aquelas oriundas do desgaste de freios e pneus e da ressuspensão de poeira da via, sendo esses mecanismos intensificados em condições de tráfego interrompido ou congestionado, caracterizadas por ciclos frequentes de frenagem e aceleração (OECD, 2020).

Além disso, relatórios técnicos da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (2020) indicam que as emissões de material particulado não exaurido estão fortemente relacionadas aos padrões de condução e às forças mecânicas aplicadas aos veículos, sendo o efeito particularmente relevante para veículos de

maior massa, que impõem maiores cargas aos sistemas de frenagem e apresentam maior potencial de emissão de partículas nesses regimes operacionais.

Do ponto de vista da saúde pública, tais reduções são particularmente relevantes, uma vez que a exposição crônica ao material particulado tem sido associada a impactos adversos sobre a saúde respiratória e cardiovascular e ao aumento da mortalidade geral. As Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde destacam que os efeitos adversos do material particulado podem ocorrer mesmo em níveis baixos de exposição, e recomendam a redução contínua das emissões como estratégia de mitigação de riscos à saúde humana (WHO, 2021).

De forma complementar, os óxidos de nitrogênio (NO_x), embora tenham apresentado reduções percentuais menores, também são reconhecidos como poluentes associados ao tráfego rodoviário, com efeitos adversos sobre o sistema respiratório, sobretudo em exposições prolongadas (HEI, 2010; WHO, 2021). Relatórios científicos da *Health Effects Institute* evidenciam que a exposição à poluição viária, da qual NO_x faz parte, está associada ao agravamento de sintomas de asma e a evidências sugestivas de associações com mortalidade e morbidade cardiovascular, particularmente em populações vivendo próximas a grandes vias de tráfego (HEI, 2010).

Ademais, as diretrizes da Organização Mundial da Saúde reafirmam que não existe nível seguro de exposição a poluentes como o dióxido de nitrogênio (NO₂), principal componente de relevância toxicológica do grupo dos NO_x, e que reduções contínuas são necessárias para proteger a saúde pública (WHO, 2021). Assim, mesmo reduções percentuais aparentemente discretas devem ser interpretadas como ambientalmente relevantes, especialmente em áreas próximas às praças de pedágio, onde a concentração de emissões tende a ser maior e a população do entorno encontra-se mais exposta.

Para o entorno imediato das praças, a eliminação de filas e de regimes de tráfego interrompido contribui para a redução das concentrações locais de poluentes atmosféricos e de ruído, beneficiando populações residentes nas proximidades. Embora as reduções globais ao longo do trecho sejam modestas, os ganhos locais

tendem a ser mais significativos, especialmente para poluentes de impacto direto à saúde, como o material particulado (HEI, 2010).

Do ponto de vista dos usuários, os resultados indicam benefícios diretos associados à redução do atraso, à eliminação das filas e à regularidade do deslocamento, aspectos que impactam positivamente a previsibilidade das viagens e o conforto do usuário. Estudos comportamentais em tráfego indicam que o congestionamento intenso está associado a estados de humor mais negativos e maior estresse subjetivo dos motoristas (Morris; Hirsch, 2016). Com isso, fluxos mais contínuos e com menores interrupções, como os observados sob regimes *free flow*, podem contribuir para reduzir a carga de estresse e melhorar a experiência subjetiva de viagem.

Além disso, o sistema *free flow* permite maior flexibilidade na forma de pagamento, por meio de identificação automática do veículo, o que elimina a necessidade de interação física na praça e reduz o tempo de transação. Estudos conduzidos no âmbito da União Europeia indicam que a adoção desses sistemas favorece a interoperabilidade entre diferentes operadores e simplifica o processo de pagamento tanto para usuários frequentes quanto ocasionais, contribuindo para uma experiência de uso mais eficiente e integrada (European Commission, 2015).

As reduções percentuais modestas observadas para parte dos indicadores não devem ser interpretadas como ausência de benefícios, mas como reflexo da escala de análise adotada, da proximidade entre os volumes dos cenários médio e crítico e da não calibração específica dos parâmetros para a realidade brasileira.

De forma geral, os resultados indicam que o principal mecanismo de atuação do sistema *free flow* é a eliminação das interrupções do fluxo veicular, e não a alteração do regime de velocidade de cruzeiro, reforçando seu papel como medida de mitigação de impactos operacionais, ambientais e de qualidade de serviço associados às praças de pedágio convencionais.

5.1 Análise pontual da Praça 6

A análise pontual da Praça 6, realizada com foco restrito à área de influência imediata da infraestrutura de pedágio, evidencia de forma mais clara os impactos operacionais e ambientais associados à implantação do sistema *free flow* quando comparada à análise abrangente em trecho completo. Enquanto a avaliação ao longo de extensões maiores tende a diluir os efeitos relacionados às paradas e retomadas de velocidade ao longo do percurso, a abordagem pontual permite isolar os fenômenos vinculados diretamente à presença física da praça, ampliando a magnitude das variações observadas e evidenciando o papel da infraestrutura de cobrança como elemento disruptivo do fluxo.

Por isso, reduziu-se o trecho referente a praça 6, mantendo apenas um buffer de 1,5 km de cada lado da praça, para ser utilizado como exemplo comparativo em relação às outras praças. Ressalta-se que, assim como nas análises anteriores, as variações precedidas pela seta para cima (↑) indicam aumento do parâmetro analisado, ao passo que os valores com a seta para baixo (↓) correspondem a reduções. A Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam os valores encontrados:

Tabela 14 – Resultados da análise pontual do cenário médio para a praça 6 (parâmetros operacionais)

P6 CENÁRIO MÉDIO PONTUAL										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	68,795	86,43	↑26%	60,485	80,735	↑33%	68,59	88,84	↑30%	km/h
Tempo de viagem	105,65	83,78	↓21%	120,21	89,43	↓26%	52,93	40,71	↓23%	seg/km
Consumo de combustível	756,91	568,27	↓25%	1167,06	1183,06	↑1%	27,93	17,41	↓38%	l
Tempo de atraso	13,93	1,3	↓91%	21,96	0,43	↓98%	8,76	0,89	↓90%	seg/km
Número de paradas	3044,8	2,2	↓100%	1934,8	2	↓100%	133,8	0	↓100%	-
Fila média	0,7	0	↓100%	0,43	0	↓100%	0,04	0	↓100%	veíc
Tempo parado	10,26	0	↓100%	16,71	0	↓100%	7,03	0	↓100%	seg/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 15 - Resultados da análise pontual do cenário médio para a praça 6 (parâmetros ambientais)

P6 CENÁRIO MÉDIO PONTUAL							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	35,01	28,56	↓18%	-	-	-	-
Emissão de IEM VOC Interurbano	248,31	199,55	↓20%	170,28	138,6	↓19%	g/km
Emissão de IEM VOC	2438,08	1959,24	↓20%	1671,87	1360,8	↓19%	g
Emissão de IEM CO ₂ Interurbano	157057,39	122659,25	↓22%	506170,92	275487,85	↓46%	g/km
Emissão de IEM CO ₂	1542075,38	1204335,52	↓22%	4969862,78	2704890,3	↓46%	g
Emissão de IEM NOx Interurbano	41,91	11,5	↓73%	5270,05	4129,05	↓22%	g/km
Emissão de IEM NOx	411,5	112,84	↓73%	51744,28	40541,32	↓22%	g
Emissão de IEM PM	26,3	0,69	↓97%	350,54	11,15	↓97%	g
Emissão de IEM PM Interurbano	2,68	0,07	↓97%	35,7	1,14	↓97%	g/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 16 - Resultados da análise pontual do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros operacionais)

P6 CENÁRIO PONTUAL CRÍTICO										
PARÂMETROS OPERACIONAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	MOTOCICLETA NO CENÁRIO CONVENCIONAL	MOTOCICLETA NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Velocidade	68,995	86,515	↑25%	60,625	80,865	↑33%	69,2	88,82	↑28%	km/h
Tempo de viagem	105,29	83,7	↓21%	119,8	89,28	↓25%	52,43	40,74	↓22%	seg/km
Consumo de combustível	702,25	528,12	↓25%	1076,37	1092,82	↑2%	15,97	9,97	↓38%	l
Tempo de atraso	13,55	1,19	↓91%	21,67	0,42	↓98%	8,1	0,8	↓90%	seg/km
Número de paradas	2828,8	1,6	↓100%	1782,4	2	↓100%	76,2	0,2	↓100%	-
Fila média	0,62	0	↓100%	0,38	0	↓100%	0,02	0	↓100%	veíc
Tempo parado	9,95	0	↓100%	16,38	0	↓100%	6,44	0	↓100%	seg/km

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 17 - Resultados da análise pontual do cenário crítico para a praça 6 (parâmetros ambientais)

P6 CENÁRIO PONTUAL CRÍTICO							
PARÂMETROS AMBIENTAIS	CARRO NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CARRO NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	CAMINHÕES NO CENÁRIO CONVENCIONAL	CAMINHÕES NO CENÁRIO FREE FLOW	DIFERENÇA (%)	UNIDADE
Poluente NOx	32,46	26,52	↓18%	-	-	-	-
Emissão de IEM CO2 Interurbano	4893,9	3814,32	↓22%	395933,78	215227,13	↓46%	g/km
Emissão de IEM CO2	48050,99	37451,06	↓22%	3887494,32	2113217,65	↓46%	g
Emissão de IEM VOC Interurbano	24,79	18,79	↓24%	142,46	111,13	↓22%	g/km
Emissão de IEM VOC	243,44	184,5	↓24%	1398,74	1091,13	↓22%	g
Emissão de IEM Nox Interurbano	380,15	104	↓73%	47670,85	37347,06	↓22%	g/km
Emissão de IEM Nox	38,72	10,59	↓73%	4855,18	3803,73	↓22%	g
Emissão de IEM PM	4,95	0,12	↓98%	0,98	0,02	↓98%	g
Emissão de IEM PM Interurbano	48,57	1,15	↓98%	9,65	0,21	↓98%	g/km

Fonte: Autoral (2026)

Do ponto de vista operacional, a análise pontual da Praça 6 evidencia de forma mais clara os impactos da implantação do sistema *free flow* sobre indicadores sensíveis à interrupção localizada do fluxo. Embora a análise integrada já indique reduções expressivas na fila média e no número de paradas, a consideração exclusiva da zona de influência imediata da praça permite observar ganhos adicionais e mais representativos em parâmetros como tempo de atraso, tempo de viagem e velocidade média.

Nesse recorte espacial, a eliminação da parada obrigatória deixa de ser um evento diluído ao longo do trecho e passa a representar parcela significativa do deslocamento, resultando em reduções do tempo de atraso da ordem de 90% a 98%, variando por tipo de veículo. Como consequência, observa-se também melhora perceptível na velocidade média e redução do tempo total de viagem, efeitos que não se manifestam com a mesma intensidade quando a análise é realizada em trechos extensos.

Esse comportamento é consistente com a literatura, que indica que os maiores ganhos operacionais associados a sistemas de cobrança eletrônica sem barreiras ocorrem na área onde o pedágio convencional atua como um gargalo artificial ao fluxo veicular, intensificando atrasos e instabilidades operacionais (Lin; Yu, 2008; Xu *et al.*, 2020). De forma complementar, estudos técnicos sobre a identificação e mitigação de gargalos de tráfego indicam que a remoção de elementos que limitam a capacidade viária pode resultar em melhorias operacionais localizadas, especialmente no que se refere à redução de atrasos e à maior regularidade do fluxo em pontos críticos da rede (U.S. Department Of Transportation, 2016).

No caso da análise pontual da Praça 6, o aumento expressivo da velocidade média não está associado a alterações no regime de velocidade de cruzeiro da rodovia, mas à eliminação dos períodos de imobilização e das retomadas de velocidade impostas pela cobrança convencional. Em um recorte espacial reduzido, como o adotado nesta análise, o tempo parado passa a representar parcela significativa do deslocamento total, de modo que sua supressão exerce influência direta e relevante sobre o valor da velocidade média calculada.

Esse comportamento torna o indicador particularmente sensível à presença de interrupções localizadas, explicando por que os ganhos em velocidade média, chegando a um aumento de até 33%, conforme tabelas 14 e 16, se manifestam de forma mais intensa na análise pontual do que na análise integrada do trecho, onde o efeito da parada é diluído ao longo de maiores extensões. Resultados semelhantes são reportados na literatura para zonas de pedágio, nas quais a eliminação do *stop-and-go* altera significativamente os indicadores operacionais locais sem modificar a velocidade de cruzeiro da via (Lin; Yu, 2008; Coelho *et al.*, 2005).

Quando esses mesmos efeitos são avaliados em nível de trecho, as reduções nos indicadores de desempenho tornam-se mais modestas, uma vez que o tempo e a distância associados à travessia da praça representam apenas uma fração do deslocamento total. Dessa forma, os resultados pontuais da Praça 6 confirmam que a menor magnitude observada na análise integrada não decorre da ineficiência do *free flow*, mas sim de um efeito de escala espacial, no qual impactos locais relevantes são amortecidos quando analisados de forma agregada.

A análise pontual da Praça 6 evidencia que os impactos ambientais associados à implantação do sistema *free flow* são significativamente mais expressivos quando avaliados na área de influência imediata da infraestrutura de cobrança. Poluentes como NO_x, VOC e CO₂ chegaram a reduzir a emissão em até 73%, 24% e 46%, respectivamente. Diferentemente da análise em trecho, na qual as reduções percentuais tendem a se diluir ao longo de extensões elevadas, a abordagem pontual permite capturar os efeitos diretos da eliminação do regime de *stop-and-go*, característico da operação convencional de pedágios.

Estudos específicos sobre praças de pedágio demonstram que as fases de desaceleração, marcha lenta e aceleração a partir do repouso, características da cobrança convencional, concentram emissões de poluentes atmosféricos, especialmente material particulado e óxidos de nitrogênio, tornando esses trechos pontos críticos do ponto de vista ambiental (Coelho *et al.*, 2005; Lin; Yu, 2008; Xu *et al.*, 2020). Nesse contexto, as reduções expressivas observadas para o material particulado nesta análise da Praça 6, superiores às verificadas na análise integrada,

e atingindo valores de até 98%, mostram-se coerentes com a literatura que associa emissões veiculares elevadas a regimes de tráfego interrompido, caracterizados por baixas velocidades médias e acelerações frequentes (Coelho *et al.*, 2005; Lin; Yu, 2008).

Para os veículos pesados, embora as reduções de material particulado e de NO_x sejam da mesma ordem ou ligeiramente inferiores às observadas para os veículos leves, a redução de CO₂ apresenta maior destaque. Esse comportamento é coerente com o fato de que o CO₂ está diretamente relacionado ao consumo total de combustível, refletindo o balanço energético global do deslocamento, enquanto outros poluentes regulados dependem mais fortemente de regimes instantâneos de operação e de características tecnológicas do motor e dos sistemas de pós-tratamento (Barth; Boriboonsomsin, 2010; EEA, 2019; Xu *et al.*, 2020).

Em relação ao consumo de combustível, a análise pontual da Praça 6 permite identificar comportamentos que não se manifestam de forma clara na avaliação integrada. Para veículos leves, a eliminação das paradas resulta em redução do consumo em até 38%, compatível com a diminuição do tempo em marcha lenta e das acelerações a partir do repouso. Para os caminhões, entretanto, observa-se um leve aumento no consumo, de até 2%, resultado que pode ser explicado pelas particularidades da dinâmica veicular pesada.

Estudos de modelagem energética indicam que, em trechos curtos, a manutenção de velocidades mais elevadas e a operação contínua sob maior demanda de potência podem atenuar ou neutralizar os ganhos energéticos associados à eliminação das paradas, especialmente no caso de veículos de maior massa, cujo consumo é fortemente influenciado pela carga do motor e pelo perfil de velocidade adotado (Barth; Boriboonsomsin, 2010; *European Environment Agency*, 2019). Assim, o aumento pontual do consumo observado para os caminhões não invalida as reduções ambientais verificadas, em especial para o CO₂, mas evidencia a sensibilidade dos indicadores energéticos e ambientais à escala espacial da análise e às características do tipo veicular considerado.

Sob a perspectiva dos impactos à saúde da população, a análise pontual da Praça 6 é particularmente relevante por tratar de um ambiente caracterizado por elevada concentração espacial de emissões veiculares, associada à presença da operação convencional de cobrança. Estudos epidemiológicos sobre exposição em microambientes rodoviários indicam que áreas localizadas nas proximidades imediatas de vias com tráfego intenso tendem a apresentar níveis mais elevados de poluentes atmosféricos, como material particulado e óxidos de nitrogênio, em comparação a áreas mais afastadas, o que resulta em maior exposição de populações residentes e usuários frequentes dessas vias (Brugge *et al.*, 2007).

Evidências adicionais demonstram que variações nas concentrações de material particulado, especialmente nas frações mais finas, estão associadas a aumentos na mortalidade diária e a desfechos cardiopulmonares adversos, mesmo quando essas variações ocorrem em janelas temporais curtas (Stölzel *et al.*, 2007). Ademais, revisões sistemáticas de longo prazo documentam associações consistentes entre a exposição crônica à poluição veicular e o aumento da mortalidade geral, bem como da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares em populações expostas de forma contínua ao tráfego intenso (Boogaard *et al.*, 2022).

Nesse contexto, as reduções expressivas de emissões observadas na análise pontual da Praça 6 indicam que a eliminação do regime de *stop-and-go* pode contribuir para a mitigação da exposição da população em um ponto crítico da infraestrutura rodoviária. Ainda que, em escala de trecho, os efeitos apareçam de forma atenuada, a abordagem pontual permite capturar a diminuição de concentrações locais elevadas, que são particularmente relevantes do ponto de vista da exposição humana.

Em síntese, a análise pontual da Praça 6 evidencia que os benefícios ambientais do sistema *free flow* se manifestam de forma predominantemente localizada, concentrando-se na área de influência imediata da infraestrutura de cobrança. Ao complementar a análise integrada do trecho, essa abordagem permite revelar ganhos que tendem a se diluir quando avaliados apenas em extensões longas, especialmente para poluentes de impacto direto à saúde. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da adoção de avaliações em múltiplas escalas espaciais para a adequada

interpretação dos efeitos operacionais e ambientais da cobrança eletrônica sem barreiras, evitando a subestimação de benefícios associados à eliminação de regimes de tráfego interrompido.

6. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os impactos operacionais, energéticos e ambientais associados à implantação de um sistema de cobrança eletrônica em fluxo livre em um trecho rodoviário concedido, com ênfase na comparação entre resultados obtidos em escala integrada e em análise pontual no entorno das praças de pedágio. Para isso, foram considerados cenários representativos de volume médio de tráfego e um cenário crítico, correspondente ao mês de maior demanda dentre os períodos analisados. A partir da utilização de um modelo de simulação microscópica, foi possível quantificar alterações nos indicadores de desempenho do tráfego, no consumo de combustível e nas emissões veiculares decorrentes da eliminação das paradas associadas à cobrança convencional.

Os resultados indicam que a implantação do sistema *free flow* promove melhorias operacionais mais evidentes em escala local, sobretudo nas proximidades das praças de pedágio. A eliminação das filas e das paradas resulta em reduções substanciais do tempo de atraso e em maior regularidade do fluxo veicular, efeitos particularmente evidentes na análise pontual realizada na Praça 6, onde a cobrança convencional atuava como um gargalo operacional artificial. Em contraste, na análise integrada do trecho, os ganhos médios mostraram-se mais moderados, evidenciando que os benefícios do *free flow* apresentam caráter predominantemente localizado. Observou-se, ainda, que os resultados obtidos para os cenários médio e crítico foram semelhantes em magnitude, indicando que a tendência dos impactos identificados se mantém mesmo sob condições de maior carregamento da via.

Do ponto de vista ambiental, os resultados apontam reduções mais pronunciadas nas emissões de material particulado e de óxidos de nitrogênio em escala local, especialmente nas proximidades das praças de pedágio, em consonância com a literatura que associa tráfego interrompido e ciclos frequentes de parada e aceleração a picos de emissão. Em particular, verificou-se que os veículos pesados apresentam maior sensibilidade à eliminação desses regimes operacionais no que se refere às emissões associadas ao consumo energético, com destaque para o dióxido de carbono, em função de suas características de massa, potência e demanda

energética. Para outros poluentes regulados, como material particulado e óxidos de nitrogênio, as reduções observadas mostraram-se da mesma ordem de magnitude das obtidas para os veículos leves, reforçando o caráter dependente do poluente e da escala de análise desses benefícios ambientais.

Por outro lado, os resultados relacionados ao consumo de combustível e à velocidade média evidenciam a complexidade da relação entre fluidez do tráfego, perfil de velocidade e demanda energética. Em determinados cenários e em trechos curtos, a manutenção de velocidades mais elevadas e a operação contínua sob maior carga do motor tendem a atenuar, ou mesmo compensar, os ganhos energéticos associados à eliminação das paradas, sobretudo para veículos de maior porte. Esses achados reforçam a importância de interpretar os resultados à luz da escala espacial considerada, do tipo veicular predominante e das condições operacionais específicas, evitando generalizações simplificadas sobre os efeitos do *free flow*.

De forma geral, os resultados obtidos corroboram a relevância do sistema *free flow* como instrumento de melhoria operacional e ambiental em rodovias concedidas, especialmente em contextos nos quais a cobrança convencional gera interrupções significativas do fluxo. Ao mesmo tempo, o estudo evidencia que, no trecho analisado, os impactos do sistema não se distribuem de forma homogênea ao longo da rodovia e que sua avaliação demanda a consideração de múltiplas escalas de análise, diferentes categorias veiculares e da interação entre operação do tráfego, consumo de combustível e emissões veiculares.

Apesar dos resultados alcançados, este trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos achados e que, ao mesmo tempo, indicam oportunidades para investigações futuras.

Uma das principais limitações refere-se à calibração dos modelos de consumo de combustível e de emissões veiculares empregados na simulação. Os parâmetros utilizados não foram ajustados especificamente para a frota circulante brasileira, que apresenta particularidades relevantes quanto à idade média dos veículos, às tecnologias embarcadas, aos padrões de manutenção e aos estilos de condução. A calibração desses parâmetros a partir de dados empíricos nacionais poderia aumentar

a representatividade dos resultados e reduzir incertezas associadas à subestimação ou superestimação das variações observadas, sobretudo em termos absolutos.

Outra limitação diz respeito à extensão temporal e espacial da análise. O estudo concentrou-se em cenários representativos de volume médio e crítico, bem como em análises pontuais e integradas de um trecho específico. Pesquisas futuras podem ampliar essa abordagem por meio da incorporação de séries temporais mais extensas, como dados mensais ou anuais, de modo a captar variações sazonais de demanda, padrões diferenciados de tráfego ao longo do ano e possíveis efeitos cumulativos da implantação do sistema *free flow* em horizontes temporais mais amplos.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de validação estatística formal do modelo, por meio da aplicação de indicadores quantitativos de aderência entre os resultados simulados e dados observados em campo, como medidas de erro ou índices de ajuste. Tal procedimento poderá contribuir para o aprimoramento metodológico do estudo e permitir maior segurança na utilização dos valores absolutos obtidos nas simulações, especialmente em análises de caráter preditivo. Ressalta-se, contudo, que o enfoque comparativo adotado neste trabalho permite avaliar de forma consistente as diferenças relativas entre os cenários analisados, mesmo diante das limitações apresentadas.

No que se refere à ferramenta de simulação, embora o Aimsun Next tenha se mostrado adequado para a análise microscópica proposta, é importante reconhecer que suas estimativas de consumo e emissões se baseiam em modelos internos simplificados e em parâmetros de uso geral, não ajustados a condições locais específicas. Assim, análises complementares que envolvam o uso de outros softwares de simulação, modelos específicos de emissões veiculares ou a integração entre diferentes ferramentas podem fornecer visões adicionais e contribuir para uma avaliação ambiental mais robusta dos sistemas de cobrança eletrônica em fluxo livre. Nesse sentido, o Aimsun deve ser entendido como uma ferramenta apropriada ao objetivo do estudo, e não como a única ou necessariamente a mais adequada para todos os contextos analíticos.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros explorem abordagens metodológicas complementares, incluindo a incorporação de dados empíricos de monitoramento de tráfego e qualidade do ar, a análise de outros poluentes não contemplados neste estudo e a avaliação integrada de aspectos econômicos, sociais e de saúde pública. Essas extensões podem contribuir para uma compreensão mais abrangente dos impactos associados à implantação de sistemas de cobrança eletrônica em fluxo livre no contexto das concessões rodoviárias brasileiras.

7. Referências

AGÊNCIA GOV. **Nova concessão da BR-040 em MG prevê desconto de 11,21% na tarifa de pedágio.** Agência Gov, 11 abr. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202404/leilao-da-br-040-mg-preve-desconto-de-11-21-na-tarifa-basica-de-pedagio-1>. Acesso em: 08 ago. 2025.

AGÊNCIA INFRA. **Com menor nível de inadimplência após 18 meses de testes, ANTT começa a discutir regra definitiva para free flow.** Agência INFRA, 28 nov. 2024. Disponível em: <https://agenciainfra.com/blog/com-menor-nivel-de-inadimplencia-apos-18-meses-de-testes-antt-comeca-a-discutir-regra-definitiva-para-free-flow/>. Acesso em: 05 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Estudo de Viabilidade Técnica – BR-040/GO/MG – Rota dos Cristais.** 2023. Disponível em: <https://anttgov.sharepoint.com/sites/sucon/dataroom/Documentos/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fsucon%2Fdataroom%2FDocumentos%2FPortal%2FRodovias%2FBR%2D040%2DMG%2DGO%20%2D%20Rota%20dos%20Cristais&p=true&ga=1>. Acesso em: 05 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Pedágio eletrônico (Free Flow). Ambiente regulatório experimental (sandbox regulatório).** ANTT, [s.d.a]. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/ambiente-regulatorio-experimental-sandbox-regulatorio/pedagio-eletronico-free-flow>. Acesso em: 03 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **ANTT aprova etapa inicial para migração de praças de pedágio para o free flow.** Brasília: ANTT, 14 fev. 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/antt-aprova-etapa-inicial-para-migracao-de-pracas-de-pedagio-para-o-free-flow>. Acesso em: 5 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **ANTT e CCR RioSP iniciam a implantação do primeiro sistema Free Flow em rodovias federais.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/antt-e-ccr-riosp-iniciam-a-implantacao-do-primeiro-sistema-free-flow-em-rodovias-federais>. Acesso em: 08 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **BR-040/GO/MG – Rota dos Cristais.** 2025b. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt->

br/assuntos/rodovias/novos-projetos-em-rodovias/br-040-go-mg-rota-dos-cristais. Acesso em: 05 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Histórico das Concessões de Rodovias Federais**. Anuário, [s.d.b]. Disponível em: <http://anuario.antt.gov.br/index.php/content/view/4978/Historico.html#:~:text=O%20Programa%20de%20Concess%C3%B5es%20de%20Rodovias%20Federais,identificar%20outros%20segmentos%20considerados%20t%C3%A9cnica%20e%20economicamente>. Acesso em: 05 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Histórico das Concessões Rodoviárias Federais**. ANTT, 23 jun. 2022. Atualizado em 11 abr. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/historico>. Acesso em: 15 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Informações gerais sobre rodovias**. Portal Gov.br, [s.d.c]. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais>. Acesso em: 5 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Mais de 6 milhões de atendimentos mecânicos foram realizados de 2007-2017. Brasília: ANTT, 06 dez. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/noticias/mais-de-6-milhoes-de-atendimentos-mecanicos-foram-realizados-de-2007-2017>. Acesso em: 5 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **O que é o Free Flow**. Brasília: ANTT, [s.d.d]. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/free-flow/o-que-e-o-free-flow>. Acesso em: 27 fev. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Pedágio eletrônico em livre passagem começa a operar na BR-381/MG**; tecnologia traz mais segurança e fluidez ao trânsito. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/pedagio-eletronico-em-livre-passagem-comeca-a-operar-na-br-381-mg-tecnologia-traz-mais-seguranca-e-fluidez-ao-transito>. Acesso em: 27 fev. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Rodovias. Portal de Dados Abertos**, Brasília, 2025c. Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/group/rodovias>. Acesso em: 05 jan. 2026.

AIMSUN. **Manual do Usuário do Aimsun Next 24**. Disponível em: <https://docs.aimsun.com.br/index.html>. Acesso em: 08 ago. 2025.

ALBALATE, D.; BEL-PIÑANA, P. **The effects of public private partnerships on road safety outcomes**. *Accident Analysis & Prevention*, v. 128, p. 53–64, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.03.015>.

ALVARENGA, G. S. **Estudo do impacto do pedágio no aumento do tempo de viagem, no consumo de combustível e na emissão de poluentes**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-17012011-161609/publico/EstudodoImpactodoPedagioGustavoSiqueiraAlvarenga.pdf>.

ÂNGELO, L. B. **Indicadores de desempenho logístico**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

ARAÚJO, J. J. **Características operacionais de praças de arrecadação de pedágio**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

ARAÚJO, J. J. de; SETTI, J. R. **Caracterização operacional de praças de pedágio do estado de São Paulo**. *Revista Transportes*, v. 14, n. 1, p. 33–44, 2006.

ARCANJO, Alexandre Rabelo; TAKAMATSU, Renata Turola; DOS SANTOS, Paula Roberta. **Um estudo do desempenho econômico-financeiro da concessão da rodovia br-040 (Juiz de Fora–MG à Brasília–DF)**. *ConTexto-Contabilidade em Texto*, v. 23, n. 53, p. 66-81, 2023.

ARNOTT, Richard. William S. Vickrey: **Contributions to Public Policy**. Boston: Boston College, Department of Economics, oct. 1997. Disponível em: <http://fmwww.bc.edu/ec-p/wp387.pdf>.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). **Sistemas Inteligentes de Transportes**. Série Cadernos Técnicos, v. 8. São Paulo: ANTP, 2012. Disponível em: <https://files-server.antp.org.br/5dotSystem/download/dcmDocument/2013/03/18/9AB9A3EB-97Dc-4711-9751-162AD361D7F0.pdf>.

AUTO ESPORTE. **Como funciona o Sem Parar e outros sistemas de cobrança automática de pedágio.** Auto Esporte, 2021. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/seu-bolso/noticia/2021/12/como-funciona-o-sem-parar-e-outros-sistemas-de-cobranca-automatica-de-pedagio.ghtml>. Acesso em: 01 ago. 2025.

AVEP Brasil. **A Rodovia BR-040: história, importância e curiosidades.** AVEP Brasil, 30 ago. 2023. Disponível em: <https://www.avepbrasil.com.br/a-rodovia-br-040-historia-importancia-e-curiosidades>. Acesso em: 05 jan. 2026.

AYALA, R. J. L.; JACQUES, M. A. P. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores para o processo de calibração.** In: ANPET – XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2013, Belém do Pará. Anais [...]. Belém: ANPET, 2013. Disponível em: <http://www.redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2013-1/764-procedimento-para-identificacao-dos-principais-parametros-dos-microssimuladores-para-o-processo-de-c/file>.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-Event System Simulation.** 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.

BARBO, A. R. C.; CORREIA, D. E. R.; ENGELMANN, E. T.; GUZEN, É. R.; GOIS, G. A.; QUEBAUD, M. R.; ALI, M. M.; SOUZA, N. M.; QUEBAUD, S.; AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **The development of regulation in federal toll roads concessions.** Revista ANTT, Brasília, v. 2, n. 2, 24 nov. 2010. ISSN 2177-6571. Disponível em: http://seminario.antt.gov.br/index.php/content/view/15143/A_EVOLUCAO_DA_REGULACAO_NAS_RODOVIAS_FEDERAIS_CONCEDIDAS.html.

BARBOSA, Saulo Horta. **Rodovias de pedágio aberto ou free-flow: perspectivas para a implantação no Brasil.** 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BARTH, M.; BORIBOONSOMSIN, K. **Real-World CO₂ Impacts of Traffic Congestion.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n.2058, p.163-171, 2010. DOI: 10.3141/2058-20. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4fx9g4gn.pdf>

BARTH, M.; BORIBOONSOMSIN, K. **Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v.14, n.6, p.400-410, 2009. DOI: 10.1016/j.trd.2009.01.004.

BIRD, J.; STRAUB, S. **The Brasília experiment: The heterogeneous impact of road access on spatial development in Brazil.** *World Development*, v. 127, p. 1–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104739>.

BOOGAARD, H.; PATTON, A. P.; ATKINSON, R. W.; BROOK, J. R.; CHANG, H. H.; CROUSE, D. L.; FUSSELL, J. C.; HOEK, G.; HOFFMANN, B.; KAPPELER, R.; KUTLAR JOSS, M.; ONDRAS, M.; SAGIV, S. K.; SAMOLI, E.; SHAIKH, R.; SMARGIASSI, A.; SZPIRO, A. A.; VAN VLIET, E. D. S.; VIENNEAU, D.; WEUVE, J.; LURMANN, F. W.; FORASTIERE, F. **Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: a systematic review and meta-analysis.** *Environmental International*, v. 164, art. 107262, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35569389/>

BRAGA, Guilherme. **Concessão de rodovias no Brasil: análise comparativa entre o programa de concessões de rodovias federais e o programa de concessão de rodovias do Estado de São Paulo.** 2017. 44 f. Monografia (Curso de Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Mariana, 2017.

BRASIL, Augusto Cesar de Mendonça; ANHAIA, Cintia Adriana Azevedo de Liz; CUNHA, Francielly Cristina Sousa; LOPES, Jony Marcos do Valle; SILVA, Talita Evelyn Paulino da. **Avaliação do sistema de pedágio sem barreiras por quilômetro percorrido free-flow.** *Transporte y Territorio*, n. 29, p. 130–146, jul./dez. 2023. ISSN 1852-7175. DOI: <https://doi.org/10.34096/rtt.i29.10577>.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Resolução nº 5.926, de 2 de fevereiro de 2021. Estabelece diretrizes para encerramento, relicitação e extensão dos contratos de concessão de infraestrutura rodoviária sob competência da Agência Nacional de Transportes Terrestres.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 03 fev. 2021. Disponível em: https://anttleis.datalegis.net/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cod_menu=7220&cod_modulo=392&cotematica=20632096. Acesso em: 5 ago. 2025.

BRASIL. Casa Civil da Presidência da República. **Conheça o Novo PAC.** Portal Gov.br, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/conheca-o-programa>. Acesso em: 27 fev. 2026.

BRASIL. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. **Prazo para pagamento do pedágio nas rodovias com free flow é ampliado de 15 para 30 dias.** Últimas Notícias, 16 out. 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/prazo-para-pagamento-do-pedagio-nas-rodovias-com-free-flow-e-ampliado-de-15-para-30-dias>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.277, de 10 de maio de 1996. **Autoriza a União a delegar aos Municípios, Estados e ao Distrito Federal a administração e exploração de rodovias e portos federais.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 maio 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9277.htm. Acesso em: 15 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.334, de 13 de setembro de 2016. **Cria o Programa de Parcerias de Investimentos – PPI e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 set. 2016. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13334.htm. Acesso em: 27 fev. 2026.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Concessões de rodovias.** Portal Gov.br, 31 jul. 2020. Atualizado em 16 fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/concessoes-de-rodovias>. Acesso em: 05 ago. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Transportes no Brasil – Síntese Histórica.** Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transportes-no-brasil-sintese-historica>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BRUGGE, D.; DURANT, J. L.; RIOUX, C. **Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks.** *Environmental Health*, Londres, v. 6, p. 23, 2007. DOI: 10.1186/1476-069X-6-23. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1971259/>

BURNINGHAM, Sally L.; STANKEVICH, Natalya. **Why road maintenance is important and how to get it done.** Transport Note No. TRN-4. Washington, DC: The World Bank, jun. 2005. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/7aba3a7c-f2bc-5ff3-8199-64bb6b620ace/content>.

CALDERÓN, César A.; SERVÉN, Luis. **The effects of infrastructure development on growth and income distribution.** Washington, D.C.: World Bank, 2004. (Policy

Research Working Paper Series, n. 3400). Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=625277>.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto tributa concessões de serviços públicos.** Agência Câmara de Notícias, 14 jun. 2006. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/87088-PROJETO-TRIBUTA-CONCESSOES-DE-SERVICOS-PUBLICOS>. Acesso em: 5 ago. 2025.

CAMPOS NETO, Carlos Alvares da Silva; MOREIRA, Sérvulo Vicente; MOTTA, Lucas Varjão. **Modelos de concessão de rodovias no Brasil, no México, no Chile, na Colômbia e nos Estados Unidos: evolução histórica e avanços regulatórios.** Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2018. ISSN 1415-4765. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/c5ffc408-faa7-415e-a4e3-3fa66400ce9b/content>.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros.** Texto para Discussão, Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), n. 1606, abr. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/19c51c45-3712-400b-b239-f48ac6d5382b/content>

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA (CEPA) – USP. **Rodovias.** Disponível em: <http://www.cepae.usp.br/energia/energia1999/Grupo4A/rodovias.htm>.

CHU, Chengzan et al. **Electronic toll collection system engineering quality inspection evaluation and control method.** In: COTA INTERNATIONAL CONFERENCE OF TRANSPORTATION PROFESSIONALS – CICTP, 13., 2013, Pequim, 2013. p. 1420–1425. DOI: [10.1016/j.sbspro.2013.08.161](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.161).

COELHO, M. C.; FREY, H. C.; ROUSTEAU, C.; ZHAI, H. **Measuring and modeling emission effects for toll facilities.** *Transportation Research Record*, n. 1941, p. 136–144, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198105194100117>

CONCESSIONÁRIA BR-040 S.A. Via040, 2019. **Quem somos.** Disponível em: <http://via040.com.br/pages/quem-somos>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **ANTT analisa pedido de devolução amigável da concessão da BR-040**. 2017. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/antt-pedido-devolucao-br-040>. Acesso em: 05 ago. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Novas tecnologias de pagamento de pedágio**. Brasília: CNT, jun. 2020. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/bf8665da-3e39-45cf-9fbd-2dbbafc9ddd4.pdf>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2022**. Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em: 27 fev. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Parcerias: a provisão de infraestruturas de transporte pela iniciativa privada: rodovias**. Brasília: CNT, 2023. ISBN 978-85-68865-12-5.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT); SEST SENAT; INSTITUTO DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA (ITL). **Pesquisa CNT de Rodovias 2024**. Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2024. 224 p. ISBN 978-85-68865-23-1.

CROCI, Edoardo; RAVAZZI DOUVAN, Aldo. **Urban road pricing: a comparative study on the experiences of London, Stockholm and Milan**. Milano: Bocconi IEFE – Centre for Research on Energy and Environmental Economics and Policy, 2016. (Working Paper Series, ISSN 1973-0381). DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2737373>.

DE AVILA, Larah Macedo et al. **Avaliação de Impacto das Concessões Rodoviárias: Um estudo de caso para o Estado de Goiás**. In: Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos. Anais [S.l.], 2021. Disponível em: <https://brsa.org.br/wp-content/uploads/wpcf7-submissions/16183/AVALIA%C3%87%C3%83O-DE-IMPACTO-DAS-CONCESS%C3%95ES-RODOVI%C3%81RIAS-COM-AUTORES-.pdf>.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DER-MG). **ProAcesso atinge marco histórico**. Belo Horizonte, MG, 2012. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/noticias/1677-proacesso-atinge-marco-historico>. Acesso em: 27 fev. 2026.

EDENRED MOBILIDADE. **Novas rodovias com free flow: saiba onde essa tecnologia já chegou.** Blog Edenred Mobilidade, 24 fev. 2025. Disponível em: <https://blog.edenredmobilidade.com.br/gestao-de-frotas/novas-rodovias-com-free-flow-saiba-onde-essa-tecnologia-ja-chegou/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

EUROPEAN INVESTMENT BANK (EIB). **DARS – Free Flow Tolling System.** Luxemburgo, 23 nov. 2017. Disponível em: <https://www.eib.org/en/projects/all/20160945>. Acesso em: 27 fev. 2026.

ENGIMIND Brasil – Consultores e Representação Ltda; Viaponte Engenharia Ltda; Concessionária da Rodovia Osório – Porto Alegre S.A. **Manual para concepção, dimensionamento e implementação de praças de pedágio em concessões rodoviárias.** Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, maio 2018. Disponível em: <https://antt.gov.br/documents/359170/1462069/Manual+Planilha+Pracas+de+Pedagio.o.pdf/5a64a60e-1c21-dc6d-43b7-2b10dc6f2e7f?t=1595389043520>. Acesso em: 05 jan. 2026.

EPR SUL DE MINAS. **EPR Sul de Minas inicia fase de testes operacionais do primeiro sistema de pedágio sem cancela de Minas Gerais – o Free Flow.** EPR Sul de Minas, mar. 2024. Disponível em: <https://eprsuldeminas.com.br/epr-sul-de-minas-inicia-fase-de-testes-operacionais-do-primeiro-sistema-de-pedagio-sem-cancela-de-minas-gerais-o-free-flow/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Study on State of the Art of Electronic Road Tolling.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. Disponível em: <https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/study-electronic-road-tolling.pdf>.

EUROPEAN COURT OF AUDITORS. **Public Private Partnerships in the EU: Widespread shortcomings and limited benefits (pursuant to Article 287(4), second subparagraph, TFEU).** Luxembourg: European Court of Auditors, 2018. Disponível em: https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/sr18_09/sr_ppp_en.pdf.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Road transport.** Copenhagen, 2019. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2019>

EILBERT, Andrew; MITTELMAN, Anjuliee; CHOUINARD, Anne-Marie; GLAZE, Mark; HO, Cecilia. **Estimating Emission Benefits of Electronic Open-Road Tolling Conversion Projects.**

A&WMA 115th Annual Conference & Exhibition, San Francisco, 2022.
U.S. Department of Transportation – Volpe National Transportation Systems Center / Federal Highway Administration.

EUROPEAN INVESTMENT BANK ; EUROPEAN PPP EXPERTISE CENTRE (EPEC); EUROSTAT (European Commission). **A guide to the statistical treatment of PPPs.** Luxemburgo: Publications Office of the European Union, set. 2016. ISBN 978-92-861-2936-0. DOI: 10.2867/64196. Disponível em: https://www.eib.org/files/publications/thematic/epec_eurostat_statistical_guide_en.pdf

FARHADI, M. **Transport infrastructure and long-run economic growth in OECD countries.** *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 74, p. 73-90, 2015.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Congestion pricing – a primer: overview.** Report FHWA-HOP-08-039. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2008. Disponível em: https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08039/cp_prim1_00.htm

FERNALD, J. G. **Roads to prosperity? Assessing the link between public capital and productivity.** *American Economic Review*, v. 89, n. 3, p. 619–638, 1999.

FERNANDES, Bernardo Barros. **O impacto do ambiente regulatório e da modelagem licitatória sobre os investimentos privados em infraestrutura: evidências dos programas de concessões rodoviárias brasileiras.** 2018. 78 f. Monografia (Graduação em Economia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Bernardo_Correa_de_Barros_Fernandes_Mono_18_2.pdf.

FERREIRA, Arian Bechara; MACHADO, Bernardo Vianna Zurli; SALLES, Daniel Cardoso de; OLIVEIRA, Hugo Costa Simões de; TEIXEIRA, Lucas Milher Grego; RODRIGUES, Nathalia Farias Saad; FREIXO, Vitor de Bragança. **Modelagem e regulação de projetos de concessão rodoviária sob a ótica do financiador.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 27, n. 54, p. 7–82, set. 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/21524/3/BNDES_SETORIAL54%20-%20RODOVIAS-FINAL-rev14-12.pdf.

FERREIRA, S. N. D.; TEIXEIRA, E. C.; SILVA, G. D. **Infraestrutura de transporte rodoviário e crescimento econômico no Brasil**. Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos – BARU, v. 5, n. 2, p. 251–263, 2019.

FRATAR ENGENHARIA CONSULTIVA. **Avaliando os impactos ambientais das Zonas de Baixa Emissão com o Aimsun Next** (Nota Técnica n.º 75, nov. 2022). Belo Horizonte: Fratar Engenharia Consultiva, 2022. Disponível em: <https://www.fratar.com.br/posts/aimsun/avaliando-os-impactos-ambientais-das-zonas-de-baixa-emissao-com-o-aimsun-next/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

GALLAGHER, T. O.; WORRALL, H. W. **The path to open road tolling**. Tollways, Washington: *International Bridge, Tunnel and Turnpike Association*, v. 2, n. 3, p. 11–21, 2005.

GIBBONS, Stephen; LYYTIKÄINEN, Teemu; OVERMAN, Henry G.; SANCHIS-GUARNER, Rosa. **New road infrastructure: The effects on firms**. *Journal of Urban Economics*, v. 110, p. 35–50, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jue.2019.01.002>.

GOMES, L.F.M. **Um estudo do desempenho econômico-financeiro e operacional de concessionárias de rodovias federais**. 2015. 145 f. Dissertação (mestrado em Administração) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GOVERNO DE MINAS GERAIS. **Programa Caminhos pra Avançar: Governo de Minas apresenta avanços e benefícios do maior programa de expansão de obras rodoviárias das últimas décadas**. Agência Minas, 01 nov. 2024 (atualizado 27 jan. 2025). Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/caminhos-para-avancar-governo-de-minas-apresenta-avancos-e-beneficios-do-maior-programa-de-expansao-de-obras-rodoviaras-das-ultimas-decadas>. Acesso em: 27 fev. 2026.

HAMMAMI, Mona; RUHASHYANKIKO, Jean-Francois; YEHOUE, Etienne B. **Determinants of Public-Private Partnerships in Infrastructure**. Washington, D.C.: *International Monetary Fund*, 2006. (IMF Working Paper, WP/06/99). Disponível em: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2006/wp0699.pdf>.

Harvey, David. **Os limites do capital**. Brasil: Boitempo Editorial, 2013.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE – HEI. **Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects**. *Special Report* n. 17.

Boston: *Health Effects Institute*, 2010. Disponível em: <https://www.healtheffects.org/publication/traffic-related-air-pollution-critical-review-literature-emissions-exposure-and-health>

HELLINGA, B. R. **Requirements for the calibration of traffic simulation models**. Waterloo: *Department of Civil Engineering, University of Waterloo*, 1998. Disponível em: <https://www.civil.uwaterloo.ca/bhellinga/publications/publications/csce-1998-calibration.pdf>.

HONG KONG POLICY RESEARCH INSTITUTE (HKPRI). **Research Study on Open Road Tolling in Hong Kong: Literature Review**. Hong Kong: *Hong Kong Policy Research Institute*, 2018.

HUERTAS, Daniel Monteiro. **Configuração territorial dos caminhos rodoviários do Brasil: do papel ativo do Estado às concessões**. *Revista Transporte y Territorio*, n. 18, p. 122-155, 2018. ISSN 1852-7175.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Infraestrutura econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025**. Brasília: Ipea, 2010. 586 p. ISBN 978-85-7811-055-0. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/27ad4512-b924-420f-82a7-e4f0f176247b/content>. Acesso em: 08 ago. 2025.

KLODZINSKI, Jack; AL-DEEK, Haitham M. **New Methodology for Defining Level of Service at Toll Plazas**. *Journal of Transportation Engineering*, v. 128, n. 2, p. 173-181, mar. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2002\)128:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2002)128:2(173)). Acesso em: 7 ago. 2025.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

LIN, M.-Y. et al. **Effect of Implementing Electronic Toll Collection in Reducing Highway Particulate Matter Pollution**. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 15, p. 9210-9216, 2020. DOI: [10.1021/acs.est.0c00900](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00900).

LIN, J.; YU, D. **Traffic-related air quality assessment for open road tolling highway facility**. *Journal of Environmental Management*, v. 88, n. 4, p. 962–969, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479707001880>

LUCAS JUNIOR, R. **Metodologia para implantação de pedágio urbano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/907>.

MACIEL, Bruna Castro Souza. **Análise de propostas de política tarifária aplicada ao pedágio free-flow no Anel Rodoviário de Belo Horizonte**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, 2020.

MAPBIOMAS BRASIL. **Plataforma MapBiomas Brasil**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

MARINHO, Arthur Theodoro; ECCEL, Renan Artur Lopes; CARLSON, Rodrigo Castelan; KRAUS JUNIOR, Werner. **Calibração do modelo de consumo de combustível do simulador AIMSUN com dados coletados via OBD**. Transportes, v. 26, n. 2, p. 139-154, 31 ago. 2018. DOI: 10.14295/transportes.v26i6.1393.

MARINS ZURSSA, L. R.; MARTINS, A. C. G. **Análise Automática do Uso do Solo no Entorno de Rodovias Usando uma Abordagem Fuzzy**. Trends in Computational and Applied Mathematics, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 383–399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5540/tcam.2022.023.02.00383>.

MATOS, Bárbara Abreu. **Mobilidade pedonal e o efeito barreira das rodovias urbanas: as contradições e os conflitos no Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, em Belo Horizonte (MG)**. 2022. Tese (Doutorado em Geografia) — Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

MATTEI, L. M. **“A estrada vai além do que se vê”: uma análise sobre impactos sociais de concessões de rodovias**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar e Profissional em Desenvolvimento e Gestão Social, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

MÔNACO BR. **Sistema de pedágio Free Flow: o que você precisa saber ?**. Mônaco BR, 2024. Disponível em: <https://www.monacobr.com.br/blog/81/sistema-de-pedagio-free-flow-o-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 08 ago. 2025.

Moraes, Pedro B. de. **Infraestruturas rodoviárias e morfologia urbana: parâmetros e relações em diálogo com o urbanismo moderno.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INVESTIGAÇÃO EM URBANISMO (SIU), 12., 2020, São Paulo; Lisboa. Anais [...]. São Paulo; Lisboa: SIU, 2020. DOI: [10.5821/siu.9791](https://doi.org/10.5821/siu.9791)

MORRIS, Eric A.; HIRSCH, Jana A. ***Does rush hour see a rush of emotions? Driver mood in conditions likely to exhibit congestion.*** *Travel Behaviour and Society*, v. 5, p. 5–13, 2016. DOI: 10.1016/j.tbs.2015.07.002

MUCCI, Carolina Mara Passos de Moura. **Análise comparativa de modelos de concessão de rodovias no Brasil: um enfoque na segurança viária.** 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

O TEMPO. **BR-040: relembre o imbróglio da concessão até a aprovação do edital de R\$ 9 bi. 2024.** Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/br-040-relembre-o-imbroglio-da-concessao-ate-a-aprovacao-do-edital-de-r-9-bi-1.3281070>. Acesso em: 23 jul. 2025.

OBELHEIRO, Marta Rodrigues; CYBIS, Helena Beatriz Bettella; DE OLIVEIRA, Marcelo Leismann; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Método para análise de níveis de serviço em praças de pedágio.** TRANSPORTES, v. 19, n. 3, p. 18–27, 2011. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v19i3.374>.

OLIVEIRA, Cássio Antunes de. **O papel das concessões de rodovias na normatização do território brasileiro e suas relações com a circulação.** Tese de Doutorado – Geografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2016. Patrocinado por: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/138935>.

OLIVEIRA, Juliana Linder de. **Verificação da qualidade da representação do tráfego no simulador Aimsun a partir de metodologia de calibração.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília, UniCEUB, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/6423/1/21259400.pdf>.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). ***Non-exhaust particulate emissions from road transport: an ignored environmental policy challenge.*** Paris: OECD Publishing, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>

PÁDUA, Patrícia Milagres Tassara; GOMES, Rômulo Evangelista; MATOS, Bárbara Abreu; CARVALHO, Christiano Ottoni. **Mobilidade e acessibilidade dos pedestres entre as margens da BR-040, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG)**. In: ANAIS DO CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2023, Santos. Anais eletrônicos..., Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/mobilidade-e-acessibilidade-dos-pedestres-entre-as-margens-da-br-040-na-regiao-m?lang=pt-br>. Acesso em: 14 jan. 2026.

PANAZZOLO, Adriano Peixoto; FRANTZ, Letícia Coradini; SOARES AURÉLIO, Sílvia O.; COSTA, Fernanda Lemos; MUÑOZ, Catarina. **Gestão ambiental na construção de rodovias: o caso da BR-448, Rodovia do Parque**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento Gonçalves. Anais... Bento Gonçalves: [s.n.], 2012.

PARCERIAS RS. **Free Flow**. Parcerias RS, 2024. Disponível em: <https://parcerias.rs.gov.br/free-flow>. Acesso em: 05 ago. 2025.

PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. **O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil**. Caminhos de Geografia, v. 12, n. 40, p. 26-46, 2011.

PÉREZ-MARTÍNEZ, P. J.; D. Ming; G. Dell'Asin; A. Monzón. **Evaluation of the influence of toll systems on energy consumption and CO₂ emissions: a case study of a Spanish highway**, Journal of King Saud University — Science, v. 23, p. 123-130, 2011. ISSN: 1018-3647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.12.006>.

PIVATTO, D. et al. **Estimating the optimal time for a road concession contract in Brazil**. International Journal of Economics and Finance, v. 9, n. 12, 2017.

POON, N.; DIA, H. **Evaluation of toll collection performance using traffic simulation**. In: 27th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2005), Brisbane, 7-9 Dec. 2005.

QUEIROZ, Sarah Lima. **Os efeitos em infraestrutura de transporte rodoviário sobre o crescimento econômico brasileiro**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017. Disponível em: <https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/659ad4d2-2b86-464b-92d3-a33bcc2c2983/content>. Acesso em: 5 ago. 2025.

RAHMADANA, Muhammad Fitri; PUTRA, Ilham Mirzaya. **Community dynamics towards the existence of toll roads in Indonesia: a literature and spatial study.** *Frontiers in Built Environment, Lausanne*, v. 11, 30 abr. 2025. Seção: *Transportation and Transit Systems*. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1515186>.

RODRIGUE, Jean-Paul. **The Geography of Transport Systems**. 6ª ed. New York: Routledge, 2024.

RODRIGUES, Brenda Arielly Mendonça; BERTONCINI, Bruno Vieira. **Análise da influência da conectividade viária sobre a emissão de poluentes pelo transporte urbano de carga (TUC).** In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 38., 2024, Florianópolis. *Anais eletrônicos...* Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/analise-da-influencia-da-conectividade-viaria-sobre-a-emissao-de-poluente-pelo?lang=pt-br>.

ROTA EXATA. **Pedágio Free Flow: como funciona o novo pedágio eletrônico.** Rota Exata, 2023. Disponível em: <https://www.rotaexata.com.br/blog/pedagio-free-flow/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

SALOMÃO, Amador Pedro Emílio; SANTOS, Jéssica Aparecida Gonçalves; FERREIRA, Ramon de Souza; GONÇALVES, Bruno Balarini; ROGÉRIO, Starich. **Impactos ambientais gerados pela construção e operação de rodovias.** *Research, Society and Development*, v. 8, n. 10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1368>.

SANTOS JR., Wilson R.; PROENÇA, Anderson D. A. **A infraestrutura rodoviária e a urbanização regional contemporânea no território paulista: o caso do corredor urbano Campinas-Sorocaba, Brasil.** *EURE – Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, Santiago, v. 46, n. 138, p. 235-256, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612020000200235>.

SANTOS, Túlio Silveira. **Procedimento metodológico para avaliação de desempenho de praças de pedágio com uso de simulação.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, Túlio Silveira; RIBEIRO, Paulo Cezar Martins. **Estudo de impacto da implantação do sistema free flow de pedágio eletrônico no Brasil.** In: Congresso

de Ensino e Pesquisa de Engenharia de Transportes do Estado do Rio de Janeiro, XVI, 2018, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: RIO DE TRANSPORTES, 2018.

SILVEIRA, M. R. **A circulação, os transportes e a logística na reestruturação econômica do estado de São Paulo**. In: SPOSITO, E. S. (org.). Novo mapa da indústria no início do século XXI: diferentes paradigmas para a leitura das dinâmicas territoriais do estado de São Paulo. São Paulo: Editora UNESP, 2015.

SILVEIRA-SANTOS, T.; PORTUGAL, L. S. **Using a discrete-event simulation model for evaluating the operational performance of toll plazas: a case study in Brazil**. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 29, n. 1, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000722](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000722).

SINDICAMP – Sindicato das Empresas de Transportes e Cargas de Campinas e Região. **Tecnologia Free Flow contribui para a redução de emissões de CO₂ nas rodovias em até 30 %**. Sindicamp – *Notícias*, 17 set. 2024. Disponível em: <https://sindicamp.org.br/tecnologia-free-flow-contribui-para-a-reducao-de-emissoes-de-co2-nas-rodovias-em-ate-30>. Acesso em: 27 jul. 2025.

STÖLZEL, M. et al. **Daily mortality and particulate matter in different size classes in Erfurt, Germany**. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, v. 17, p. 458–467, 2007. DOI: 10.1038/sj.jes.7500538. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/7500538>

SOUZA JR., C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; de OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E.J. **Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat Archive and Earth Engine**. *Remote Sensing, Basel*, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

SOUZA, Sebastião Perez; SILVA, Eliuvomar Cruz da; LIMA, Wendell Teles de. **O modelo rodoviário do país**. *Revista Geopolítica Transfronteiriça*, v. 7, n. 3, p. 9, 2023. ISSN 2527-2349. Disponível em: <https://formularios.uea.edu.br/index.php/revistageotransfronteirica/article/view/3269/1638>. Acesso em: 05 ago. 2025.

SPOSITO, Eliseu Savério (org.). **O novo mapa da indústria no início do século XXI: diferentes paradigmas para a leitura das dinâmicas territoriais do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: Editora da Unesp Digital, 2015. ISBN 978-85-68334-66-9. Disponível em: <https://static.scielo.org/scielobooks/6y9nc/pdf/sposito-9788568334669.pdf>.

TOLEDO, Luis Roberto. **Rodovias: pedágio automático e asfalto reciclado são apostas para estradas menos poluentes**. 28 jul. 2024. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/economia/carbono-zero-free-flow-e-asfalto-reciclado-sao-apostas-para-rodovias-menos-poluentes>. Acesso em: 30 jul. 2025.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB); NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Highway Capacity Manual, 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis**. Washington, DC: The National Academies Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17226/26432>.

TRIPATHI, S.; GAUTAM, V. **Road transport infrastructure and economic growth in India**. *Journal of Infrastructure Development*, v. 2, n. 2, p. 135-151, 2010.

TSENG, P. H.; D. Y. Lin; S. Chien. **Investigating the impact of highway electronic toll collection to the external cost: a case study in Taiwan**, *Technological Forecasting and Social Change*, v. 86, p. 265-272, 2014. DOI: [10.1016/j.techfore.2013.10.019](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.10.019).

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – *Federal Highway Administration* (FHWA). **Traffic Bottlenecks: Identification and Solutions**. FHWA-HRT-16-064, Turner-Fairbank Highway Research Center, Washington, DC, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/16064/index.cfm>

VARGAS, C. R.; SCATOLIN, F. D. **Investimentos em transportes, desenvolvimento e o papel do Estado na economia paranaense na segunda metade do século XX**. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, n. 113, p. 83-102, 2007.

VIA CRISTAIS. **Serviços**. Disponível em: <https://viacristais.com.br/servicos/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

VILARINHO, C. A. T. **Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil

– Especialização em Vias de Comunicação) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65792/2/26494.pdf>.

WÆRSTED, K. **Urban tolling in Norway – practical experiences, social and environmental impacts and plans for future systems**. In: PIARC Seminar on Road Pricing with Emphasis on Financing, Regulation and Equity, 2005, Cancún, Mexico. Cancún: PIARC, 2005. p. 1–16. Disponível em: <https://www.piarc.org/ressources/documents/281,2.1-Waersted-0405C11.pdf>

WAN, Jianxiang; XIE, Qiang; FAN, Xianxian. **The impact of transportation and information infrastructure on urban productivity: evidence from 256 cities in China**. *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 68, p. 384–392, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.11.008>.

Weng, Jiancheng, Ru Wang, Mengjia Wang, and Jian Rong. **Fuel Consumption and Vehicle Emission Models for Evaluating Environmental Impacts of the ETC System**. *Sustainability* 7, no. 7: 8934–8949. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7078934>

WOO, T. H.; HOEL, L. A. **Toll plaza capacity and level of service**. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n. 1320, p. 119–127, 1991.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content>

WORLD BANK GROUP. **PPI Visualization Dashboard**. *Infrastructure Finance, PPPs & Guarantees*. Disponível em: <https://ppi.worldbank.org/en/visualization#sector=Collection%20and%20Transport%20CRoads&status=&ppi=&investment=®ion=&ida=&income=&ppp=PPP&mdb=&year=1990%2C1991%2C1992%2C1993%2C1994%2C1995%2C1996%2C1997%2C1998%2C1999%2C2000%2C2001%2C2002%2C2003%2C2004%2C2005%2C2006%2C2007%2C2008%2C2009%2C2010%2C2011%2C2012%2C2013%2C2014%2C2015%2C2016%2C2017%2C2018%2C2019%2C2020%2C2021%2C2022%2C2023&excel=false&map=&header=true>. Acesso em: 5 ago. 2025.

XU, Y. et al. *A model tree-based vehicle emission model at freeway toll plazas*. Sustainability, v. 12, n. 21, 8959, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8959>

ZANCHETTA, I. T., MATTOS, G. R., PORTUGAL, L. da S. **A influência da cobrança de pedágios em centros urbanos: um modelo casual utilizando dinâmica de sistemas**. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes da ANPET, 33º, 2019, Balneário Camboriú.

ZURSSA, L. R. Marins; MARTINS, A. C. G. **Análise automática do uso do solo no entorno de rodovias usando uma abordagem fuzzy**. Trends in Computational and Applied Mathematics, v. 23, n. 2, p. 383-399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5540/tcam.2022.023.02.00383>.

APÊNDICE A – PRAÇAS 4 E 5

A.1 Cenário Médio

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro manual	5860,11	153,09	I	Consumo de Combustível - Carro manual	5787,12	150,03	I
Consumo de Combustível - Caminhão manual	4039,4	191,41	I	Consumo de Combustível - Caminhão manual	4031,81	191,13	I
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	266,32	27,83	I	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	260,79	27,38	I
Consumo de Combustível - Caminhão automático	4281,11	177,13	I	Consumo de Combustível - Caminhão automático	4276,06	177,2	I
Consumo de Combustível - Carro automático	7252,73	70,4	I	Consumo de Combustível - Carro automático	7174,82	69,24	I

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - CO2 - Carro manual	12947073	N/D	g	Emissão de IEM - CO2 - Carro manual	12808349	N/D	g
Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Carro manual	69636,67	N/D	g/km	Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Carro manual	68890,53	N/D	g/km
Emissão de IEM - CO2 - Caminhão manual	10773886	N/D	g	Emissão de IEM - CO2 - Caminhão manual	10599333	N/D	g
Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Caminhão manual	57948,04	N/D	g/km	Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Caminhão manual	57009,2	N/D	g/km
Emissão de IEM - CO2 - Motocicleta manual	0	N/D	g	Emissão de IEM - CO2 - Motocicleta manual	0	N/D	g
Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - CO2 - Caminhão automático	11356977	N/D	g	Emissão de IEM - CO2 - Caminhão automático	11208854	N/D	g
Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Caminhão automático	61084,24	N/D	g/km	Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Caminhão automático	60287,54	N/D	g/km
Emissão de IEM - CO2 - Carro automático	15972115	N/D	g	Emissão de IEM - CO2 - Carro automático	15845156	N/D	g
Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Carro automático	85907,05	N/D	g/km	Emissão de IEM - CO2 - Interurbano - Carro automático	85224,19	N/D	g/km
Emissão de IEM - NOx - Carro manual	1920,03	N/D	g	Emissão de IEM - NOx - Carro manual	1822,61	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Carro manual	10,33	N/D	g/km	Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Carro manual	9,8	N/D	g/km
Emissão de IEM - NOx - Caminhão manual	147934,9	N/D	g	Emissão de IEM - NOx - Caminhão manual	146529,5	N/D	g
Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Caminhão manual	795,68	N/D	g/km	Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Caminhão manual	788,12	N/D	g/km
Emissão de IEM - NOx - Motocicleta manual	0	N/D	g	Emissão de IEM - NOx - Motocicleta manual	0	N/D	g
Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - NOx - Caminhão automático	156042,6	N/D	g	Emissão de IEM - NOx - Caminhão automático	155216,46	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Caminhão automático	839,28	N/D	g/km	Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Caminhão automático	834,84	N/D	g/km
Emissão de IEM - NOx - Carro automático	2287,93	N/D	g	Emissão de IEM - NOx - Carro automático	2218,71	N/D	g
Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Carro automático	12,31	N/D	g/km	Emissão de IEM - NOx - Interurbano - Carro automático	11,93	N/D	g/km
Emissão de IEM - PM - Carro manual	39,3	N/D	g	Emissão de IEM - PM - Carro manual	31,74	N/D	g
Emissão de IEM - PM - Interurbano - Carro manual	0,21	N/D	g/km	Emissão de IEM - PM - Interurbano - Carro manual	0,17	N/D	g/km
Emissão de IEM - PM - Caminhão manual	160,02	N/D	g	Emissão de IEM - PM - Caminhão manual	108,48	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - PM - Interurbano - Caminhão manual	0,86	N/D	g/km	Emissão de IEM - PM - Interurbano - Caminhão manual	0,58	N/D	g/km
Emissão de IEM - PM - Motocicleta manual	0	N/D	g	Emissão de IEM - PM - Motocicleta manual	0	N/D	g
Emissão de IEM - PM - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - PM - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - PM - Caminhão automático	151,1	N/D	g	Emissão de IEM - PM - Caminhão automático	106,72	N/D	g
Emissão de IEM - PM - Interurbano - Caminhão automático	0,81	N/D	g/km	Emissão de IEM - PM - Interurbano - Caminhão automático	0,57	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - PM - Carro automático	45,87	N/D	g	Emissão de IEM - PM - Carro automático	36,58	N/D	g
Emissão de IEM - PM - Interurbano - Carro automático	0,25	N/D	g/km	Emissão de IEM - PM - Interurbano - Carro automático	0,2	N/D	g/km
Emissão de IEM - VOC - Carro manual	21138,86	N/D	g	Emissão de IEM - VOC - Carro manual	20832,97	N/D	g
Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Carro manual	113,7	N/D	g/km	Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Carro manual	112,05	N/D	g/km
Emissão de IEM - VOC - Caminhão manual	4976,18	N/D	g	Emissão de IEM - VOC - Caminhão manual	4946,3	N/D	g
Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Caminhão manual	26,76	N/D	g/km	Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Caminhão manual	26,6	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - VOC - Motocicleta manual	0	N/D	g	Emissão de IEM - VOC - Motocicleta manual	0	N/D	g
Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Motocicleta manual	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - VOC - Caminhão automático	5253,58	N/D	g	Emissão de IEM - VOC - Caminhão automático	5239	N/D	g
Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Caminhão automático	28,26	N/D	g/km	Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Caminhão automático	28,18	N/D	g/km
Emissão de IEM - VOC - Carro automático	25912,31	N/D	g	Emissão de IEM - VOC - Carro automático	25786,06	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Carro automático	139,37	N/D	g/km	Emissão de IEM - VOC - Interurbano - Carro automático	138,69	N/D	g/km
Fila Média - Carro manual	0,79	0,02	veíc	Fila Média - Carro manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão manual	0,29	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta manual	0,05	0,01	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,09	0	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro automático	0,39	0,01	veíc	Fila Média - Carro automático	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro manual	2574,2	74,54		Número de Paradas Total - Carro manual	170,6	13,18	

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Número de Paradas Total - Caminhão manual	594,6	27,09		Número de Paradas Total - Caminhão manual	50,4	8,32	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	150,4	16,95		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	3,2	2,17	
Número de Paradas Total - Caminhão automático	539,6	21,22		Número de Paradas Total - Caminhão automático	7,6	1,82	
Número de Paradas Total - Carro automático	3112,2	23,57		Número de Paradas Total - Carro automático	23,8	4,55	
Poluente - NOx - Carro manual	280,96	411,47		Poluente - NOx - Carro manual	278,35	407,65	
Poluente - NOx - Carro automático	385,64	478,33		Poluente - NOx - Carro automático	383,24	476,19	
Tempo de Atraso - Carro manual	2,8	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	2,09	0,02	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo de Atraso - Caminhão manual	2,23	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão manual	1,07	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	3,24	0,11	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	2,5	0,12	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,29	0,03	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	0,92	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Carro automático	2,25	0,03	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	1,98	0,02	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	45,09	0,05	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	44,38	0,05	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,74	0,14	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	46,58	0,15	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	43,96	0,41	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	43,22	0,37	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,63	0,11	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,26	0,14	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	44,33	0,07	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	44,06	0,06	seg/km
Tempo Parado - Carro manual	0,65	0,01	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0,02	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão manual	1,15	0,04	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0,05	0,01	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,6	0,03	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0,01	0,01	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,32	0,01	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro automático	0,26	0	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro manual	80,17	0,1	km/h	Velocidade - Carro manual	81,45	0,11	km/h

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Velocidade - Caminhão manual	75,66	0,22	km/h	Velocidade - Caminhão manual	77,53	0,22	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	82,22	0,75	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	83,61	0,7	km/h
Velocidade - Caminhão automático	77,42	0,14	km/h	Velocidade - Caminhão automático	78,04	0,18	km/h
Velocidade - Carro automático	81,47	0,12	km/h	Velocidade - Carro automático	81,97	0,1	km/h

Fonte: Autoral (2026)

A.2 Cenário Crítico

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro manual	7143,2	124,41	l	Consumo de Combustível - Carro manual	7055,19	124	l
Consumo de Combustível - Caminhão manual	4550,33	372,12	l	Consumo de Combustível - Caminhão manual	4536,97	367,92	l

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	449,43	29,05	l	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	437,89	28,11	l
Consumo de Combustível - Caminhão automático	24789,47	723,15	l	Consumo de Combustível - Caminhão automático	24752,1	727,37	l
Consumo de Combustível - Carro automático	4605,74	64,57	l	Consumo de Combustível - Carro automático	4549,29	65,77	l
Emissão de IEM - Todos - CO2	1,07E+08	N/D	g	Emissão de IEM - Todos - CO2	1,1E+08	N/D	g
Emissão de IEM - Todos - CO2 - Interurbano	575457,6	N/D	g/km	Emissão de IEM - Todos - CO2 - Interurbano	568809	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro manual - CO2	16002543	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - CO2	1,6E+07	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Carro manual - CO2 - Interurbano	86070,71	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro manual - CO2 - Interurbano	85206,4	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	12524968	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	1,2E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2 - Interurbano	67366,35	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2 - Interurbano	66602,1	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	68116648	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	6,7E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2 - Interurbano	366369,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2 - Interurbano	361776	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Carro automático - CO2	10346766	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - CO2	1E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - CO2 - Interurbano	55650,75	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro automático - CO2 - Interurbano	55224,4	N/D	g/km
Emissão de IEM - Todos - NOx	1088346	N/D	g	Emissão de IEM - Todos - NOx	1081759	N/D	g
Emissão de IEM - Todos - NOx - Interurbano	5853,74	N/D	g/km	Emissão de IEM - Todos - NOx - Interurbano	5818,31	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro manual - NOx	2564,3	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - NOx	2449,98	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - NOx - Interurbano	13,79	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro manual - NOx - Interurbano	13,18	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	168907,6	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	167559	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx - Interurbano	908,48	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx - Interurbano	901,23	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	915232,2	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	910152	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx - Interurbano	4922,64	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx - Interurbano	4895,31	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro automático - NOx	1641,56	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - NOx	1598,26	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Carro automático - NOx - Interurbano	8,83	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro automático - NOx - Interurbano	8,6	N/D	g/km
Emissão de IEM - Todos - PM	1173,87	N/D	g	Emissão de IEM - Todos - PM	818,57	N/D	g
Emissão de IEM - Todos - PM - Interurbano	6,31	N/D	g/km	Emissão de IEM - Todos - PM - Interurbano	4,4	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro manual - PM	48,01	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - PM	39,45	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - PM - Interurbano	0,26	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro manual - PM - Interurbano	0,21	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	178,35	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	125,2	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM - Interurbano	0,96	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM - Interurbano	0,67	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	916,91	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	629,14	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM - Interurbano	4,93	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM - Interurbano	3,38	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro automático - PM	30,6	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - PM	24,78	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - PM - Interurbano	0,16	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro automático - PM - Interurbano	0,13	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Todos - VOC	79781,52	N/D	g	Emissão de IEM - Todos - VOC	79208,3	N/D	g
Emissão de IEM - Todos - VOC - Interurbano	429,11	N/D	g/km	Emissão de IEM - Todos - VOC - Interurbano	426,03	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro manual - VOC	26206,52	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - VOC	25828	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - VOC - Interurbano	140,95	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro manual - VOC - Interurbano	138,92	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	5710,29	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	5687,04	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC - Interurbano	30,71	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC - Interurbano	30,59	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	30998,45	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	30922,5	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC - Interurbano	166,73	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC - Interurbano	166,32	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro automático - VOC	16866,26	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - VOC	16770,8	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - VOC - Interurbano	90,72	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro automático - VOC - Interurbano	90,2	N/D	g/km
Fila Média - Carro manual	1	0,03	veíc	Fila Média - Carro manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão manual	0,33	0,03	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Fila Média - Motocicleta manual	0,1	0,01	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,7	0,02	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro automático	0,32	0,01	veíc	Fila Média - Carro automático	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro manual	2888	54,27		Número de Paradas Total - Carro manual	115,8	12,52	
Número de Paradas Total - Caminhão manual	592,2	48,87		Número de Paradas Total - Caminhão manual	23	4,47	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	288,8	22,73		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	9,2	2,95	

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Número de Paradas Total - Caminhão automático	3449,8	93,1		Número de Paradas Total - Caminhão automático	83,8	12,64	
Número de Paradas Total - Carro automático	2078,6	30,37		Número de Paradas Total - Carro automático	55,6	12,26	
Poluente - Carro manual - NOx	347,95	509,47		Poluente - Carro manual - NOx	344,82	504,89	
Poluente - Carro automático - NOx	250,77	311,04		Poluente - Carro automático - NOx	249,2	309,67	
Tempo de Atraso - Carro manual	3,43	0,09	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	2,74	0,09	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão manual	2,39	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão manual	1,36	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	4,12	0,18	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	3,45	0,16	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,78	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,33	0,02	seg/km
Tempo de Atraso - Carro automático	3,19	0,06	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	2,88	0,05	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	45,41	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	44,72	0,04	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,62	0,1	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	46,59	0,11	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	44,89	0,12	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	44,22	0,2	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,99	0,06	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,53	0,07	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	45,14	0,1	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	44,83	0,11	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Tempo Parado - Carro manual	0,64	0,01	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão manual	1,04	0,02	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0,01	0,01	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,74	0,02	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,42	0,01	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro automático	0,33	0,01	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro manual	79,46	0,07	km/h	Velocidade - Carro manual	80,7	0,07	km/h
Velocidade - Caminhão manual	75,76	0,14	km/h	Velocidade - Caminhão manual	77,43	0,15	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	80,3	0,22	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	81,53	0,37	km/h

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Velocidade - Caminhão automático	76,75	0,1	km/h	Velocidade - Caminhão automático	77,5	0,11	km/h
Velocidade - Carro automático	79,93	0,18	km/h	Velocidade - Carro automático	80,47	0,2	km/h

Fonte: Autoral (2026)

APÊNDICE B – PRAÇA 6

B.1 Cenário Médio

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro Manual	2300,79	56,6	l	Consumo de Combustível - Carro Manual	2232,9	55,94	l
Consumo de Combustível - Caminhão Manual	977,75	34,12	l	Consumo de Combustível - Caminhão Manual	970,22	32,24	l
Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	72	7,62	l	Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	68,66	7,5	l
Consumo de Combustível - Caminhão Automático	5757,13	169,71	l	Consumo de Combustível - Caminhão Automático	5741,85	169,15	l
Consumo de Combustível - Carro Automático	1465,62	39,22	l	Consumo de Combustível - Carro Automático	1436,6	38,86	l

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	5009124	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	4934930,5	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - CO2	82831,72	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - CO2	81604,85	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	967,45	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	925,38	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - NOx	16	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - NOx	15,3	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - PM	32,82	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - PM	27,86	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - PM	0,54	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - PM	0,46	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	8113,93	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	7896,67	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - VOC	134,17	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - VOC	130,58	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	3032550	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	2970054,2	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - CO2	50146,77	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - CO2	49113,32	N/D	g/km
Emissão de IEM -	37863,08	N/D	g	Emissão de IEM -	37230,15	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Caminhão Manual - NOx				Caminhão Manual - NOx			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - NOx	626,11	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - NOx	615,64	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	89,33	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	65,82	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - PM	1,48	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - PM	1,09	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	1261,15	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	1250,2	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - VOC	20,85	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - VOC	20,67	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	17673160	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	17288016	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - CO2	292246,4	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - CO2	285877,58	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	221198,1	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	219035,7	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - NOx	3657,77	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - NOx	3622,01	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	488,26	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	361,07	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - PM	8,07	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - PM	5,97	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	7366,21	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	7333,52	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - VOC	121,81	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - VOC	121,27	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	3173976	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	3132101,6	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - CO2	52485,41	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - CO2	51792,97	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	604,24	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	581,65	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - NOx	9,99	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - NOx	9,62	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - PM	21,81	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - PM	18,68	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - PM	0,36	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - PM	0,31	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	5012,46	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	4972,1	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - VOC	82,89	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - VOC	82,22	N/D	g/km
Fila Média - Carro Manual	0,73	0,03	veíc	Fila Média - Carro Manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Manual	0,16	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta Manual	0,03	0	veíc	Fila Média - Motocicleta Manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Automático	0,27	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro Automático	0,13	0,01	veíc	Fila Média - Carro Automático	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro Manual	1808,2	41,52		Número de Paradas Total - Carro Manual	84,4	6,54	
Número de Paradas Total - Caminhão Manual	290,6	11,3		Número de Paradas Total - Caminhão Manual	31,8	6,06	
Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	76,6	6,95		Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	4,2	2,17	
Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1605	48,3		Número de Paradas Total - Caminhão Automático	79	5,1	
Número de Paradas Total - Carro Automático	1216,8	31,24		Número de Paradas Total - Carro Automático	77,8	13,63	

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Poluente - NOx - Carro Manual	116	152,16		Poluente - NOx - Carro Manual	114,45	150,15	
Poluente - NOx - Carro Automático	75,06	93,92		Poluente - NOx - Carro Automático	74,46	93,13	
Tempo de Atraso - Carro Manual	4,24	0,07	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Manual	2,84	0,07	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Manual	4	0,16	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Manual	1,6	0,13	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	4,35	0,15	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	3,07	0,21	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Automático	2,23	0,03	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Automático	1,42	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Automático	3,12	0,1	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Automático	2,65	0,1	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Manual	47,23	0,09	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Manual	45,84	0,09	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Manual	50,24	0,19	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Manual	47,85	0,13	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	45,83	0,13	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	44,54	0,18	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Automático	48,25	0,1	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Automático	47,44	0,1	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Automático	45,96	0,08	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Automático	45,49	0,08	seg/km
Tempo Parado - Carro Manual	1,65	0,03	seg/km	Tempo Parado - Carro Manual	0,01	0	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo Parado - Caminhão Manual	2,47	0,08	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Manual	0,07	0,01	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta Manual	1,49	0,06	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta Manual	0,01	0,01	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Automático	0,72	0,01	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Automático	0,02	0	seg/km
Tempo Parado - Carro Automático	0,48	0,01	seg/km	Tempo Parado - Carro Automático	0,02	0	seg/km
Velocidade - Carro Manual	76,47	0,16	km/h	Velocidade - Carro Manual	78,8	0,17	km/h
Velocidade - Caminhão Manual	71,86	0,26	km/h	Velocidade - Caminhão Manual	75,41	0,2	km/h
Velocidade - Motocicleta Manual	78,82	0,21	km/h	Velocidade - Motocicleta Manual	81,07	0,34	km/h
Velocidade - Caminhão Automático	74,78	0,16	km/h	Velocidade - Caminhão Automático	76,05	0,16	km/h
Velocidade - Carro Automático	78,6	0,14	km/h	Velocidade - Carro Automático	79,43	0,13	km/h

Fonte: Autoral (2026)

B.2 Cenário Crítico

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro Manual	2457,34	38,94	l	Consumo de Combustível - Carro Manual	2381,89	35,17	l

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Consumo de Combustível - Caminhão Manual	1084,83	105,94	l	Consumo de Combustível - Caminhão Manual	1077,78	104,73	l
Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	125,84	3,86	l	Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	120,11	3,38	l
Consumo de Combustível - Caminhão Automático	6549,96	134,28	l	Consumo de Combustível - Caminhão Automático	6531,36	135,17	l
Consumo de Combustível - Carro Automático	1554,64	22,19	l	Consumo de Combustível - Carro Automático	1522,87	22,37	l
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	5369217	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	5290056	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - CO2	88786,29	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - CO2	87477,3	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	1052,68	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	1007,35	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - NOx	17,41	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - NOx	16,66	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - PM	34,75	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - PM	29,31	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - PM	0,57	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - PM	0,48	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	8711,37	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	8477,09	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - VOC	144,05	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Manual - VOC	140,18	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	3354231	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	3288048	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - CO2	55466,14	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - CO2	54371,7	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	42039,02	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	41361,6	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - NOx	695,16	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - NOx	683,96	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	92,87	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	67,3	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - PM	1,54	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - PM	1,11	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	1401,53	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	1390,34	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - VOC	23,18	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Manual - VOC	22,99	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	2000383 ₈	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	2E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - CO2	330786, ₉	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - CO2	323969	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão	251134, ₆	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão	248823	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Automático - NOx				Automático - NOx			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - NOx	4152,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - NOx	4114,5 ₇	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	511,88	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	375,58	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - PM	8,46	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - PM	6,21	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	8385,4	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	8351,2 ₈	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - VOC	138,66	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão Automático - VOC	138,1	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	3389906	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	334508 ₉	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - CO2	56056,0 ₇	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - CO2	55315	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	649,55	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	625,46	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - NOx	10,74	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - NOx	10,34	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - PM	22,65	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - PM	19,18	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - PM	0,37	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - PM	0,32	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	5373,89	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	5331,4	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - VOC	88,86	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro Automático - VOC	88,16	N/D	g/km
Fila Média - Carro Manual	0,8	0,04	veíc	Fila Média - Carro Manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Manual	0,17	0,02	veíc	Fila Média - Caminhão Manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta Manual	0,05	0,01	veíc	Fila Média - Motocicleta Manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Automático	0,28	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro Automático	0,15	0	veíc	Fila Média - Carro Automático	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro Manual	1923,6	28,45		Número de Paradas Total - Carro Manual	100	10,42	

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Número de Paradas Total - Caminhão Manual	305,4	32,26		Número de Paradas Total - Caminhão Manual	25	3,87	
Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	143,2	10,85		Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	17	4,12	
Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1662,2	34,54		Número de Paradas Total - Caminhão Automático	38,2	6,22	
Número de Paradas Total - Carro Automático	1274,4	15,82		Número de Paradas Total - Carro Automático	46	6,08	
Poluente - NOx - Carro Manual	124,48	163,24		Poluente - NOx - Carro Manual	122,81	161,07	
Poluente - NOx - Carro Automático	80,46	100,63		Poluente - NOx - Carro Automático	79,83	99,8	
Tempo de Atraso - Carro Manual	4,41	0,08	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Manual	2,99	0,06	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Manual	3,85	0,2	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Manual	1,58	0,1	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	4,97	0,41	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	3,42	0,4	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Automático	2,11	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Automático	1,39	0,04	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Automático	3,35	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Automático	2,86	0,02	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Manual	47,41	0,07	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Manual	46	0,07	seg/km
Tempo de Viagem -	49,94	0,12	seg/km	Tempo de Viagem -	47,67	0,05	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Caminhão Manual				Caminhão Manual			
Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	46,35	0,21	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	44,8	0,21	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Automático	48,05	0,07	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Automático	47,33	0,07	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Automático	46,13	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Automático	45,65	0,04	seg/km
Tempo Parado - Carro Manual	1,69	0,05	seg/km	Tempo Parado - Carro Manual	0,01	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Manual	2,34	0,12	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Manual	0,04	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta Manual	1,72	0,15	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta Manual	0,04	0,01	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Automático	0,64	0,01	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro Automático	0,49	0	seg/km	Tempo Parado - Carro Automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro Manual	76,18	0,11	km/h	Velocidade - Carro Manual	78,52	0,13	km/h
Velocidade - Caminhão Manual	72,25	0,17	km/h	Velocidade - Caminhão Manual	75,68	0,08	km/h
Velocidade - Motocicleta Manual	77,94	0,35	km/h	Velocidade - Motocicleta Manual	80,61	0,36	km/h
Velocidade - Caminhão Automático	75,06	0,11	km/h	Velocidade - Caminhão Automático	76,21	0,1	km/h
Velocidade - Carro Automático	78,32	0,07	km/h	Velocidade - Carro Automático	79,15	0,07	km/h

Fonte: Autoral (2026)

APÊNDICE C – PRAÇA 7

C.1 Cenário Médio – P7 Crescente

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro automático	8858,66	169,38	l	Consumo de Combustível - Carro automático	8835,78	190,26	l
Consumo de Combustível - Caminhão manual	6945,39	182,21	l	Consumo de Combustível - Caminhão manual	6923,96	180,42	l
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	715,47	25,85	l	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	713,51	26,72	l
Consumo de Combustível - Carro manual	17765,5	208,42	l	Consumo de Combustível - Carro manual	17699,98	233,78	l
Consumo de Combustível - Caminhão automático	27369,67	393,65	l	Consumo de Combustível - Caminhão automático	27327,29	388,84	l
Emissão de IEM - Carro automático - CO2	19007390	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - CO2	18896386	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - NOx	2793,29	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - NOx	2751,5	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - PM	81,84	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - PM	75,36	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - VOC	29715,61	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - VOC	29515,22	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	19814048	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão	19546890	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
				manual - CO2			
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	259522,4	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	257389,55	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	330,88	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	246,51	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	8656,91	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	8599,1	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - CO2	38236521	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - CO2	37946400	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - NOx	5711,19	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - NOx	5560,21	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - PM	166,01	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - PM	151,51	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Carro manual - VOC	60066,81	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - VOC	59289,94	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	77805888	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	76682783	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1018827	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1012780,2	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	1293,37	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	951,31	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	33979,04	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	33814,83	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	365705,1	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	363569,36	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	53,74	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	52,94	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,57	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,45	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	571,73	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	567,88	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	381225,3	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	376085,16	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	4993,25	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	4952,21	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	6,37	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	4,74	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	166,56	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	165,45	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	735676,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	730094,54	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	109,88	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	106,98	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	3,19	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	2,92	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	1155,69	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	1140,75	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1496997	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1475388,5	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	19602,38	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	19486,05	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	24,88	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	18,3	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	653,76	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	650,6	N/D	g/km
Fila Média - Carro automático	0,37	0,01	veíc	Fila Média - Carro automático	0	0	veíc

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Fila Média - Caminhão manual	0,42	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta manual	0,1	0	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Carro manual	1,64	0,02	veíc	Fila Média - Carro manual	0,01	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,62	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0,01	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro automático	3735,4	79,91		Número de Paradas Total - Carro automático	222	42,93	
Número de Paradas Total - Caminhão manual	988	20,06		Número de Paradas Total - Caminhão manual	79,4	12,92	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	488,4	17,97		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	37,2	6,46	
Número de Paradas Total - Carro manual	7540,8	104,49		Número de Paradas Total - Carro manual	483,8	186,06	
Número de Paradas Total - Caminhão automático	3931,4	44,62		Número de Paradas Total - Caminhão automático	290,2	26,32	
Poluente - Carro automático - NOx	443,57	554,46		Poluente - Carro automático - NOx	441,26	551,53	
Poluente - Carro manual - NOx	893,48	1116,65		Poluente - Carro manual - NOx	886,62	1108,03	
Tempo de Atraso - Carro automático	1,51	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	1,33	0,02	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo de Atraso - Caminhão manual	2,28	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão manual	1,38	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,78	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,3	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Carro manual	1,79	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	1,33	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,76	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,38	0,02	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	43,11	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	42,79	0,05	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,13	0,02	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	46,12	0,08	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	42,36	0,08	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	41,73	0,1	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	43,43	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	42,85	0,07	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,59	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,09	0,07	seg/km
Tempo Parado - Carro automático	0,21	0	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão manual	0,89	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0,01	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,5	0,01	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0	0	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo Parado - Carro manual	0,46	0	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,35	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0,01	0	seg/km
Velocidade - Carro automático	83,96	0,07	km/h	Velocidade - Carro automático	84,58	0,09	km/h
Velocidade - Caminhão manual	76,53	0,04	km/h	Velocidade - Caminhão manual	78,23	0,13	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	85,39	0,17	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	86,68	0,22	km/h
Velocidade - Carro manual	83,33	0,07	km/h	Velocidade - Carro manual	84,48	0,14	km/h
Velocidade - Caminhão automático	77,43	0,07	km/h	Velocidade - Caminhão automático	78,28	0,12	km/h

Fonte: Autoral (2026)

C.2 Cenário Crítico – P7 Crescente

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro automático	9779,55	125,85	l	Consumo de Combustível - Carro automático	9775,25	128,23	l
Consumo de Combustível - Caminhão manual	7041,03	283,46	l	Consumo de Combustível - Caminhão manual	7027,68	277,6	l
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	729,94	43,9	l	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	732,06	43,82	l

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Consumo de Combustível - Carro manual	20337,13	273,04	l	Consumo de Combustível - Carro manual	20299,2	260,56	l
Consumo de Combustível - Caminhão automático	28783,87	466,59	l	Consumo de Combustível - Caminhão automático	28733	471,61	l
Emissão de IEM - Carro automático - CO2	21062038	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - CO2	2,1E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - NOx	3163,36	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - NOx	3122,85	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - PM	93,93	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - PM	87,41	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - VOC	32883,6	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - VOC	32632,1	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	20256727	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	2E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	263397,1	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	260838	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	362,98	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	264,73	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	8775,03	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	8701,61	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta	0	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
manual - CO2				manual - CO2			
Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - CO2	43803869	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - CO2	4,3E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - NOx	6637,71	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - NOx	6465,1	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - PM	194,91	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - PM	178,84	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - VOC	68743,71	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - VOC	67779,7	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	82660023	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	8,1E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1075672	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1069277	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	1415,98	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	1051,34	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	35874,82	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	35689,3	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	405236,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	402877	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	60,86	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	60,08	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,81	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,68	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	632,69	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	627,85	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	389742,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	382898	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	5067,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	5018,57	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	6,98	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	5,09	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	168,83	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	167,42	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	842793,2	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	836154	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	127,71	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	124,39	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	3,75	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	3,44	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	1322,64	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	1304,09	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1590392	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1567674	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	20696,09	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	20573,1	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	27,24	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	20,23	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	690,24	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	686,67	N/D	g/km
Fila Média - Carro automático	0,43	0,01	veíc	Fila Média - Carro automático	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão manual	0,44	0,02	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta manual	0,1	0,01	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Carro manual	1,91	0,03	veíc	Fila Média - Carro manual	0,02	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,66	0,02	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0,02	0	veíc

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Número de Paradas Total - Carro automático	4217,6	54,62		Número de Paradas Total - Carro automático	291,2	21,9	
Número de Paradas Total - Caminhão manual	1032	49,96		Número de Paradas Total - Caminhão manual	86,8	15,97	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	503,2	31,67		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	45	8,8	
Número de Paradas Total - Carro manual	8689,4	135,27		Número de Paradas Total - Carro manual	569,2	7,6	
Número de Paradas Total - Caminhão automático	4176,2	99,85		Número de Paradas Total - Caminhão automático	333,8	33,85	
Poluente - Carro automático - NOx	491,09	613,83		Poluente - Carro automático - NOx	488,34	610,38	
Poluente - Carro manual - NOx	1022,83	1278,37		Poluente - Carro manual - NOx	1014,31	1267,71	
Tempo de Atraso - Carro automático	1,59	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	1,41	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão manual	2,4	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão manual	1,46	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,86	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,37	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Carro manual	1,86	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	1,4	0,01	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,78	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,42	0,01	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	43,23	0,02	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	42,88	0,02	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,25	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	46,13	0,04	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	42,27	0,06	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	41,59	0,06	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	43,51	0,02	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	42,88	0,02	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,64	0,03	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,12	0,03	seg/km
Tempo Parado - Carro automático	0,22	0	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão manual	0,93	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0,02	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,52	0,01	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro manual	0,47	0	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,35	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0,02	0	seg/km
Velocidade - Carro automático	83,71	0,05	km/h	Velocidade - Carro automático	84,4	0,05	km/h

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO FREE FLOW			
Velocidade - Caminhão manual	76,34	0,06	km/h	Velocidade - Caminhão manual	78,19	0,07	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	85,53	0,13	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	86,93	0,12	km/h
Velocidade - Carro manual	83,17	0,04	km/h	Velocidade - Carro manual	84,4	0,04	km/h
Velocidade - Caminhão automático	77,35	0,05	km/h	Velocidade - Caminhão automático	78,23	0,05	km/h

Fonte: Autoral (2026)

C.3 Cenário Médio – P7 Decrescente

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro manual	4516,73	109,1	l	Consumo de Combustível - Carro manual	4450,06	100,42	l
Consumo de Combustível - Caminhão manual	2791,51	72,59	l	Consumo de Combustível - Caminhão manual	2785,38	71,49	l
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	549,99	28,62	l	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	538,13	31,04	l
Consumo de Combustível - Caminhão automático	26219,25	558,76	l	Consumo de Combustível - Caminhão automático	26206,57	529,11	l
Consumo de Combustível - Carro automático	9195,49	227,56	l	Consumo de Combustível - Carro automático	9095,94	232,9	l
Emissão de IEM - Carro manual - CO2	9578177	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - CO2	9470911,6	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Carro manual - NOx	1424,13	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - NOx	1357,92	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - PM	43,51	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - PM	36,12	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - VOC	14952,6	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - VOC	14766,03	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	8021751	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	7772995,3	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	104670,7	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	103135,84	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	143,19	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	84,64	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	3469,42	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	3430,38	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	76408531	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	73751528	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	984909,6	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	972104,14	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	1473,57	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	896,41	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	32614,53	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	32293,99	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - CO2	19542517	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - CO2	19349987	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - NOx	2879,31	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - NOx	2777,98	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - PM	88,74	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - PM	75,27	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - VOC	30380,14	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - VOC	30142,66	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	154690,2	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	152957,88	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	23	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	21,93	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	0,7	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	0,58	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	241,49	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	238,48	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	129553,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	125536,05	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	1690,46	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	1665,67	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	2,31	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	1,37	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	56,03	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	55,4	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1234019	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1191107,9	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	15906,57	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	15699,75	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	23,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	14,48	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	526,73	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	521,56	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	315617,1	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	312507,71	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	46,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	44,87	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,43	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,22	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	490,65	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	486,81	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Fila Média - Carro manual	0,37	0,01	veíc	Fila Média - Carro manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão manual	0,17	0	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta manual	0,07	0	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,62	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0,04	0	veíc
Fila Média - Carro automático	0,35	0,01	veíc	Fila Média - Carro automático	0	0,01	veíc
Número de Paradas Total - Carro manual	1809	33,71		Número de Paradas Total - Carro manual	68,2	16,45	
Número de Paradas Total - Caminhão manual	434	14,78		Número de Paradas Total - Caminhão manual	43	5	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	358,4	21,62		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	33,8	5,85	
Número de Paradas Total - Caminhão automático	4397	103,36		Número de Paradas Total - Caminhão automático	666,2	23,11	
Número de Paradas Total - Carro automático	3762,8	87,65		Número de Paradas Total - Carro automático	242	9,41	
Poluente - HC - Carro manual	409,65	263,97		Poluente - HC - Carro manual	407,39	262,75	
Poluente - HC - Carro automático	25,25	32,44		Poluente - HC - Carro automático	21,25	27,3	
Tempo de Atraso - Carro manual	1,49	0,03	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	1,05	0,02	seg/km
Tempo de Atraso -	2,28	0,03	seg/km	Tempo de Atraso -	1,24	0,04	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Caminhão manual				Caminhão manual			
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,38	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	0,92	0,04	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,83	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,29	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Carro automático	1,28	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	1,05	0,01	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	43,14	0,11	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	42,55	0,12	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,17	0,03	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	45,97	0,03	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	41,6	0,18	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	40,99	0,17	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,81	0,03	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,08	0,03	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	42,89	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	42,54	0,02	seg/km
Tempo Parado - Carro manual	0,43	0	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão manual	0,95	0,02	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0,02	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,44	0,02	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0	0,01	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,4	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0,04	0	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo Parado - Carro automático	0,2	0	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro manual	83,9	0,22	km/h	Velocidade - Carro manual	85,08	0,23	km/h
Velocidade - Caminhão manual	76,48	0,05	km/h	Velocidade - Caminhão manual	78,48	0,04	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	86,96	0,38	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	88,27	0,36	km/h
Velocidade - Caminhão automático	77,07	0,05	km/h	Velocidade - Caminhão automático	78,29	0,05	km/h
Velocidade - Carro automático	84,39	0,08	km/h	Velocidade - Carro automático	85,11	0,05	km/h

Fonte: Autoral (2026)

C.4 – Cenário Crítico – P7 Decrescente

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro manual	5048,56	112,3	l	Consumo de Combustível - Carro manual	4976,31	106,67	l
Consumo de Combustível - Caminhão manual	2944,92	137,92	l	Consumo de Combustível - Caminhão manual	2932,27	138,93	l
Consumo de Combustível - Motocicleta manual	629,12	25,32	l	Consumo de Combustível - Motocicleta manual	609,52	23,18	l
Consumo de Combustível - Caminhão automático	28375,22	391,96	l	Consumo de Combustível - Caminhão automático	28306,1	411,17	l

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Consumo de Combustível - Carro automático	10051,27	140,22	l	Consumo de Combustível - Carro automático	9904,88	134,41	l
Emissão de IEM - Carro manual - CO2	10726044	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - CO2	1,1E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - NOx	1607,19	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - NOx	1537,02	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - PM	49,49	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - PM	41,25	N/D	g
Emissão de IEM - Carro manual - VOC	16736,79	N/D	g	Emissão de IEM - Carro manual - VOC	16530,4	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	8458714	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - CO2	8145644	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	110316,3	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - NOx	108322	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	149,6	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - PM	81,03	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	3652,26	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão manual - VOC	3603,99	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	81504453	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - CO2	7,9E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1060927	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - NOx	1046266	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	1384,29	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - PM	781,73	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	35159,28	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão automático - VOC	34800,9	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - CO2	21374581	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - CO2	2,1E+07	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - NOx	3260,1	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - NOx	3106,53	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - PM	104,25	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - PM	85,39	N/D	g
Emissão de IEM - Carro automático - VOC	33155,97	N/D	g	Emissão de IEM - Carro automático - VOC	32893,9	N/D	g
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	173228,6	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - CO2	171402	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	25,96	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - NOx	24,82	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	0,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - PM	0,67	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	270,3	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro manual - VOC	266,97	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	136610,6	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - CO2	131554	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	1781,64	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - NOx	1749,44	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	2,42	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - PM	1,31	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	58,98	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão manual - VOC	58,21	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - CO2	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - NOx	0	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - PM	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Motocicleta manual - VOC	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1316320	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - CO2	1270868	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	17134,27	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - NOx	16897,5	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	22,36	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - PM	12,63	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	567,83	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Caminhão automático - VOC	562,04	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	345205,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - CO2	341385	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	52,65	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - NOx	50,17	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,68	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - PM	1,38	N/D	g/km
Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	535,48	N/D	g/km	Emissão de IEM - Interurbano - Carro automático - VOC	531,25	N/D	g/km
Fila Média - Carro manual	0,42	0,01	veíc	Fila Média - Carro manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão manual	0,18	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta manual	0,07	0	veíc	Fila Média - Motocicleta manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão automático	0,61	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão automático	0,02	0	veíc
Fila Média - Carro automático	0,39	0	veíc	Fila Média - Carro automático	0,01	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro manual	2029,8	49,03		Número de Paradas Total - Carro manual	71,2	7,56	
Número de Paradas Total - Caminhão manual	429,2	16,33		Número de Paradas Total - Caminhão manual	11,8	4,44	
Número de Paradas Total - Motocicleta manual	371,4	13,13		Número de Paradas Total - Motocicleta manual	9	3,08	
Número de Paradas Total - Caminhão automático	4135,4	62,8		Número de Paradas Total - Caminhão automático	309,4	17,67	
Número de Paradas Total - Carro automático	4222,8	53,75		Número de Paradas Total - Carro automático	304,2	27,85	

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Poluente - HC - Carro manual	458,58	295,42		Poluente - HC - Carro manual	456,23	294,2	
Poluente - HC - Carro automático	30,06	38,6		Poluente - HC - Carro automático	24,11	30,95	
Tempo de Atraso - Carro manual	1,55	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Carro manual	1,11	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão manual	2,39	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão manual	1,22	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta manual	1,38	0,03	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta manual	0,95	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,7	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão automático	1,23	0,01	seg/km
Tempo de Atraso - Carro automático	1,38	0,01	seg/km	Tempo de Atraso - Carro automático	1,13	0,01	seg/km
Tempo de Viagem - Carro manual	43,17	0,09	seg/km	Tempo de Viagem - Carro manual	42,58	0,09	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão manual	47,27	0,09	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão manual	45,88	0,09	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta manual	41,58	0,24	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta manual	40,98	0,23	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão automático	46,55	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão automático	45,89	0,03	seg/km
Tempo de Viagem - Carro automático	43,07	0,05	seg/km	Tempo de Viagem - Carro automático	42,67	0,05	seg/km
Tempo Parado - Carro manual	0,44	0,01	seg/km	Tempo Parado - Carro manual	0	0	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo Parado - Caminhão manual	1,04	0,04	seg/km	Tempo Parado - Caminhão manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta manual	0,42	0,01	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão automático	0,35	0	seg/km	Tempo Parado - Caminhão automático	0,01	0	seg/km
Tempo Parado - Carro automático	0,2	0	seg/km	Tempo Parado - Carro automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro manual	83,84	0,18	km/h	Velocidade - Carro manual	85,03	0,19	km/h
Velocidade - Caminhão manual	76,35	0,13	km/h	Velocidade - Caminhão manual	78,63	0,15	km/h
Velocidade - Motocicleta manual	87	0,5	km/h	Velocidade - Motocicleta manual	88,27	0,48	km/h
Velocidade - Caminhão automático	77,5	0,06	km/h	Velocidade - Caminhão automático	78,61	0,05	km/h
Velocidade - Carro automático	84,04	0,1	km/h	Velocidade - Carro automático	84,85	0,09	km/h

Fonte: Autoral (2026)

APÊNDICE D – ANÁLISE PONTUAL PRAÇA 6

D.1 Cenário Médio

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Caminhão Automático	982,15	24,64	l	Consumo de Combustível - Caminhão Automático	998,7	24,92	l

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Consumo de Combustível - Caminhão Manual	184,91	13,1	l	Consumo de Combustível - Caminhão Manual	184,36	13,62	l
Consumo de Combustível - Carro Automático	283,86	7,72	l	Consumo de Combustível - Carro Automático	217,09	5,86	l
Consumo de Combustível - Carro Manual	473,05	1,68	l	Consumo de Combustível - Carro Manual	351,18	1,36	l
Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	27,93	3,15	l	Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	17,41	1,9	l
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	4180010	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	2279229,1	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2 - Interurbano	425726	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2 - Interurbano	232135,08	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	43370,1	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	34200,59	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx - Interurbano	4417,16	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx - Interurbano	3483,26	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	294,25	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	9,19	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM - Interurbano	29,97	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM - Interurbano	0,94	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	1401,85	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	1147,74	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC - Interurbano	142,78	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC - Interurbano	116,9	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	789852,5	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	425661,21	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2 - Interurbano	80444,95	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2 - Interurbano	43352,77	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	8374,18	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	6340,73	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx - Interurbano	852,89	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx - Interurbano	645,79	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	56,29	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	1,96	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM - Interurbano	5,73	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM - Interurbano	0,2	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	270,02	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	213,06	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC - Interurbano	27,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC - Interurbano	21,7	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	581083,7	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	459448,95	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2 - Interurbano	59182,25	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2 - Interurbano	46793,99	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	149,59	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	42,47	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx - Interurbano	15,24	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx - Interurbano	4,33	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - PM	9,92	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - PM	0,23	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - PM - Interurbano	1,01	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - PM - Interurbano	0,02	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	877,21	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	747,57	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC - Interurbano	89,34	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC - Interurbano	76,14	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	960991,7	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	744886,57	N/D	g

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2 - Interurbano	97875,14	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2 - Interurbano	75865,26	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	261,91	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	70,37	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx - Interurbano	26,67	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx - Interurbano	7,17	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - PM	16,38	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - PM	0,46	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - PM - Interurbano	1,67	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - PM - Interurbano	0,05	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	1560,87	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	1211,67	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC - Interurbano	158,97	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC - Interurbano	123,41	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2 - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2 - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx - Interurbano	0	N/D	g/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC - Interurbano	0	N/D	g/km
Fila Média - Caminhão Automático	0,27	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Automático	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Manual	0,16	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Manual	0	0	veíc
Fila Média - Carro Automático	0,12	0	veíc	Fila Média - Carro Automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro Manual	0,58	0,01	veíc	Fila Média - Carro Manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta Manual	0,04	0,01	veíc	Fila Média - Motocicleta Manual	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1634,4	41,74		Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1,8	1,3	
Número de Paradas Total - Caminhão Manual	300,4	21,51		Número de Paradas Total - Caminhão Manual	0,2	0,45	
Número de Paradas Total - Carro Automático	1168	36,05		Número de Paradas Total - Carro Automático	0,6	0,55	

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Número de Paradas Total - Carro Manual	1876,8	9,88		Número de Paradas Total - Carro Manual	1,6	0,89	
Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	133,8	13,88		Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	0	0	
Poluente - NOx - Carro Automático	13,31	16,71		Poluente - NOx - Carro Automático	11,11	13,87	
Poluente - NOx - Carro Manual	21,7	28,47		Poluente - NOx - Carro Manual	17,45	22,86	
Tempo de Atraso - Caminhão Automático	6,67	0,02	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Automático	0,23	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Manual	15,29	0,33	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Manual	0,2	0,04	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Automático	4,51	0,08	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Automático	0,58	0,04	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Manual	9,42	0,19	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Manual	0,72	0,02	seg/km
Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	8,76	0,6	seg/km	Tempo de Atraso - Motocicleta Manual	0,89	0,12	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Automático	55,72	0,09	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Automático	44,67	0,08	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Manual	64,49	0,41	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Manual	44,76	0,11	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Automático	50,39	0,11	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Automático	41,86	0,1	seg/km

CENÁRIO MÉDIO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO MÉDIO FREE FLOW			
Tempo de Viagem - Carro Manual	55,26	0,16	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Manual	41,92	0,05	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	52,93	0,6	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	40,71	0,28	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Automático	3,98	0,02	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Manual	12,73	0,32	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro Automático	2,62	0,05	seg/km	Tempo Parado - Carro Automático	0	0	seg/km
Tempo Parado - Carro Manual	7,64	0,18	seg/km	Tempo Parado - Carro Manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta Manual	7,03	0,52	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta Manual	0	0	seg/km
Velocidade - Caminhão Automático	64,73	0,1	km/h	Velocidade - Caminhão Automático	80,81	0,15	km/h
Velocidade - Caminhão Manual	56,24	0,3	km/h	Velocidade - Caminhão Manual	80,66	0,2	km/h
Velocidade - Carro Automático	71,82	0,15	km/h	Velocidade - Carro Automático	86,5	0,22	km/h
Velocidade - Carro Manual	65,77	0,16	km/h	Velocidade - Carro Manual	86,36	0,09	km/h
Velocidade - Motocicleta Manual	68,59	0,66	km/h	Velocidade - Motocicleta Manual	88,84	0,64	km/h

Fonte: Autoral (2026)

D.2 Cenário Crítico

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades	Séries Temporais	Valor	Desvio Padrão	Unidades
Consumo de Combustível - Carro Manual	425,93	13,98	l	Consumo de Combustível - Carro Manual	316,79	10,36	l
Consumo de Combustível - Caminhão Manual	160,86	9	l	Consumo de Combustível - Caminhão Manual	160,75	8,99	l
Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	15,97	2,05	l	Consumo de Combustível - Motocicleta Manual	9,97	1,32	l
Consumo de Combustível - Caminhão Automático	915,51	19,5	l	Consumo de Combustível - Caminhão Automático	932,07	20,32	l
Consumo de Combustível - Carro Automático	276,32	3,67	l	Consumo de Combustível - Carro Automático	211,33	2,9	l
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	864492,6	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2	671141	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - CO2 - Interurbano	88046,9	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - CO2 - Interurbano	68354,4	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	683061,1	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2	364425	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2 - Interurbano	69568,45	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - CO2 - Interurbano	37116	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2 - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - CO2 - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	3887494	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2	2113218	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2 - Interurbano	395933,8	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - CO2 - Interurbano	215227	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	565880,7	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2	447305	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - CO2 - Interurbano	57633,85	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - CO2 - Interurbano	45557,2	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	234,54	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx	62,97	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - NOx - Interurbano	23,89	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - NOx - Interurbano	6,41	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	7257,81	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx	5491,21	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx - Interurbano	739,19	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - NOx - Interurbano	559,27	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - NOx - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	40413,04	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx	31855,9	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx - Interurbano	4115,99	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - NOx - Interurbano	3244,46	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	145,61	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx	41,03	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - NOx - Interurbano	14,83	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - NOx - Interurbano	4,18	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - PM	14,69	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - PM	0,4	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - PM - Interurbano	1,5	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - PM - Interurbano	0,04	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	48,57	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM	1,15	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM - Interurbano	4,95	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual - PM - Interurbano	0,12	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - PM - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	272,02	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM	6,99	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM - Interurbano	27,7	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - PM - Interurbano	0,71	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - PM	9,65	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - PM	0,21	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - PM - Interurbano	0,98	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - PM - Interurbano	0,02	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	1398,74	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC	1091,13	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Manual - VOC - Interurbano	142,46	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Manual - VOC - Interurbano	111,13	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	233,79	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Manual - VOC	184,29	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Manual -	23,81	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Manual -	18,77	N/D	g/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
VOC - Interurbano				VOC - Interurbano			
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC	0	N/D	g
Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC - Interurbano	0	N/D	g/km	Emissão de IEM - Motocicleta Manual - VOC - Interurbano	0	N/D	g/km
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	1306,04	N/D	g	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC	1068,89	N/D	g
Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC - Interurbano	133,02	N/D	g/km	Emissão de IEM - Caminhão Automático - VOC - Interurbano	108,86	N/D	g/km
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	854,46	N/D	g	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC	727,94	N/D	g
Emissão de IEM - Carro Automático - VOC - Interurbano	87,03	N/D	g/km	Emissão de IEM - Carro Automático - VOC - Interurbano	74,14	N/D	g/km
Fila Média - Carro Manual	0,5	0,03	veíc	Fila Média - Carro Manual	0	0	veíc
Fila Média - Caminhão Manual	0,13	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Manual	0	0	veíc
Fila Média - Motocicleta Manual	0,02	0	veíc	Fila Média - Motocicleta Manual	0	0	veíc

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Fila Média - Caminhão Automático	0,25	0,01	veíc	Fila Média - Caminhão Automático	0	0	veíc
Fila Média - Carro Automático	0,12	0	veíc	Fila Média - Carro Automático	0	0	veíc
Número de Paradas Total - Carro Manual	1695	53,53		Número de Paradas Total - Carro Manual	1,2	1,64	
Número de Paradas Total - Caminhão Manual	261,8	14,41		Número de Paradas Total - Caminhão Manual	0,2	0,45	
Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	76,2	10,35		Número de Paradas Total - Motocicleta Manual	0,2	0,45	
Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1520,6	31,43		Número de Paradas Total - Caminhão Automático	1,8	1,79	
Número de Paradas Total - Carro Automático	1133,8	20,4		Número de Paradas Total - Carro Automático	0,4	0,55	
Poluente - NOx - Carro Manual	19,52	25,63		Poluente - NOx - Carro Manual	15,72	20,62	
Poluente - NOx - Carro Automático	12,94	16,24		Poluente - NOx - Carro Automático	10,8	13,48	
Tempo de Atraso - Carro Manual	9,07	0,16	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Manual	0,65	0,03	seg/km
Tempo de Atraso - Caminhão Manual	15,04	0,33	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Manual	0,22	0,06	seg/km
Tempo de Atraso -	8,1	0,4	seg/km	Tempo de Atraso -	0,8	0,11	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Motocicleta Manual				Motocicleta Manual			
Tempo de Atraso - Caminhão Automático	6,63	0,04	seg/km	Tempo de Atraso - Caminhão Automático	0,2	0,02	seg/km
Tempo de Atraso - Carro Automático	4,48	0,05	seg/km	Tempo de Atraso - Carro Automático	0,54	0,03	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Manual	54,93	0,21	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Manual	41,88	0,08	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Manual	64,12	0,37	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Manual	44,64	0,15	seg/km
Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	52,43	0,28	seg/km	Tempo de Viagem - Motocicleta Manual	40,74	0,17	seg/km
Tempo de Viagem - Caminhão Automático	55,68	0,04	seg/km	Tempo de Viagem - Caminhão Automático	44,64	0,05	seg/km
Tempo de Viagem - Carro Automático	50,36	0,1	seg/km	Tempo de Viagem - Carro Automático	41,82	0,09	seg/km
Tempo Parado - Carro Manual	7,34	0,14	seg/km	Tempo Parado - Carro Manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Manual	12,41	0,35	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Motocicleta Manual	6,44	0,43	seg/km	Tempo Parado - Motocicleta Manual	0	0	seg/km
Tempo Parado - Caminhão Automático	3,97	0,04	seg/km	Tempo Parado - Caminhão Automático	0	0	seg/km

CENÁRIO CRÍTICO PRAÇA CONVENCIONAL				CENÁRIO CRÍTICO <i>FREE FLOW</i>			
Tempo Parado - Carro Automático	2,61	0,04	seg/km	Tempo Parado - Carro Automático	0	0	seg/km
Velocidade - Carro Manual	66,13	0,22	km/h	Velocidade - Carro Manual	86,45	0,15	km/h
Velocidade - Caminhão Manual	56,47	0,32	km/h	Velocidade - Caminhão Manual	80,86	0,28	km/h
Velocidade - Motocicleta Manual	69,2	0,29	km/h	Velocidade - Motocicleta Manual	88,82	0,36	km/h
Velocidade - Caminhão Automático	64,78	0,05	km/h	Velocidade - Caminhão Automático	80,87	0,09	km/h
Velocidade - Carro Automático	71,86	0,13	km/h	Velocidade - Carro Automático	86,58	0,16	km/h

Fonte: Autoral (2026)

APÊNDICE E – Comprovação de Recebimento de VMD pela empresa Imtraff Engenharia e Mobilidade

24/10/2025 08:04



buenass vivian

bom dia

DADOS_TRAFFEGO.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PRACA	CATEGORIA	MES	VMD		CATEGORIA	TIPO	ESKOS
2	1	1	3	2360		1	Veiculo Leve	2
3	1	2	3	236		2	Veiculo Pesado	2
4	1	3	3	142		3	Veiculo Leve	3
5	1	4	3	273		4	Veiculo Pesado	3
6	1	5	3	11		5	Veiculo Leve	4
7	1	6	3	150		6	Veiculo Pesado	4
8	1	7	3	142		7	Veiculo Pesado	5
9	1	8	3	273		8	Veiculo Pesado	6
10	1	9	3	152		9	Veiculo Pesado	7
11	1	10	3	2		10	Veiculo Pesado	8
12	1	11	3	56		11	Moto	2
13	1	63	3	146		63	Veiculo Pesado	8+
14	2	1	3	2187				
15	2	2	3	294				
16	2	3	3	17				
17	2	4	3	309				
18	2	5	3	7				



DADOS_TRAFFEGO.xlsx

841 > Geral



...

Editada

aqui tem os dados de VMD das praças já em funcionamento

sexta-feira, 24 de outubro de 2025