

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

PAULO ANTONIO OKONSKI

ANÁLISE DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES VIÁRIAS E DA EVOLUÇÃO DA
TECNOLOGIA DOS VEÍCULOS PARA A EMISSÃO DE POLUENTES EM UMA
REGIÃO URBANA POR MEIO DA MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Joinville

2023

PAULO ANTONIO OKONSKI

ANÁLISE DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES VIÁRIAS E DA EVOLUÇÃO DA
TECNOLOGIA DOS VEÍCULOS PARA A EMISSÃO DE POLUENTES EM UMA
REGIÃO URBANA POR MEIO DA MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia de Transportes
e Logística do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Dr. Helry Luvillany Fontenele
Dias

Joinville

2023

PAULO ANTONIO OKONSKI

ANÁLISE DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES VIÁRIAS E DA EVOLUÇÃO DA
TECNOLOGIA DOS VEÍCULOS PARA A EMISSÃO DE POLUENTES EM UMA
REGIÃO URBANA POR MEIO DA MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 26 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Francielly Hedler Staudt
Professora do Centro Tecnológico de Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Felipe Soares Tiburcio
Gerente da Unidade de Mobilidade
Prefeitura Municipal de Joinville

Dedico este trabalho a minha família e amigos que fiz durante a vida.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Edna, o meu pai Vilson e a minha irmã Ana por me apoiar e ajudar nos momentos em que precisei.

A meu professor e orientador Helry que é parte fundamental para a minha formação e para a realização deste trabalho.

A meu amigo Renato que sempre esteve do meu lado para me auxiliar na faculdade e na vida.

A professora Francielly que me ajudou e escutou em um momento difícil durante a graduação e me incentivou na realização do primeiro artigo.

A todos que me ajudaram a desenvolver profissionalmente e na formação durante o estágio na SEPUR.

A todos os amigos que estiveram comigo durante a graduação.

A todos os professores da UFSC que passaram pela minha formação durante a graduação.

“A suprema arte da guerra é derrotar o inimigo sem lutar.”

(Sun Tzu)

RESUMO

O crescimento da população e a necessidade de deslocamento são fatores responsáveis pela expansão da quantidade de veículos que estão circulando nas cidades. O incremento da frota intensifica os congestionamentos, o estresse, as emissões de poluentes e o tempo necessário para realizar as viagens. Esses fatores intensificam os problemas econômicos, sociais, psicológicos e ambientais para os centros urbanos, afetando diretamente a qualidade de vida da população, que está vivenciando diariamente a poluição proveniente dos veículos automotores. Neste contexto, o objetivo do trabalho é a análise do impacto das alterações viárias e das mudanças de tecnologia na redução das emissões de poluentes dos veículos em uma região urbana, por meio da microssimulação de tráfego. A metodologia empregada segue a análise quantitativa dos indicadores de tráfego e das emissões de poluentes provenientes dos veículos no entorno do terminal do Itaum, localizada na região sul da cidade de Joinville, sendo utilizado o software Eclipse SUMO para a modelagem da simulação. Os cenários propostos para a região compõem: (i) a passagem do trem, (ii) a atualização da frota para as normas EURO 2, EURO 3 e EURO 5, (iii) a implementação de uma rotatória, (iv) a utilização de um binário e (v) a combinação entre os cenários propostos. A análise dos resultados possibilitou observar que a implementação de alterações viárias e as atualizações na tecnologia são alternativas efetivas para a redução nas emissões de poluentes em uma região urbana movimentada. O melhor cenário encontrado para a região foi a utilização da rotatória com a atualização da frota para normas equivalentes a EURO 5. A implementação tem como resultado uma melhoria média de 20,90% para os indicadores de tráfego e uma redução média de 47,31% nas emissões de poluentes provenientes dos veículos automotores.

Palavras-chave: Emissões de poluentes. Microssimulação de tráfego. Rotatória. Binário.

ABSTRACT

The growth of the population and the need to travel are factors responsible for the expansion of the number of vehicles circulating in the cities. The increase in the fleet intensifies congestion, stress, emissions of pollutants, and the time required for travel. These factors intensify the economic, social, psychological, and environmental problems for urban centers, directly affecting the quality of life of the population, who are experiencing daily pollution from motor vehicles. In this context, the objective of this work is to analyze the impact of road alterations and technology changes on the reduction of pollutant emissions from vehicles in an urban region, by means of traffic microsimulation. The methodology employed follows the quantitative analysis of traffic indicators and emissions of pollutants from vehicles around the Itaum station, located in the southern region of the city of Joinville, using the Eclipse SUMO software for simulation modeling. The scenarios proposed for the region comprise: (i) the passage of the train, (ii) updating the fleet to EURO 2, EURO 3 and EURO 5 standards, (iii) the implementation of a roundabout, (iv) the use of a one-way pair, and (v) a combination of the proposed scenarios. The analysis of the results made it possible to observe that the implementation of road changes and technology upgrades are effective alternatives for the reduction of pollutant emissions in a busy urban region. The best scenario found for the region was the use of the roundabout with the upgrade of the fleet to standards equivalent to EURO 5. The implementation results in an average improvement of 20.90% for traffic indicators and an average reduction of 47.31% in pollutant emissions from motor vehicles.

Keywords: Pollutant emissions. Traffic microsimulation. Roundabout. One-way pair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do trabalho	18
Figura 2 – Metodologia da pesquisa	33
Figura 3 – Região escolhida para o estudo	42
Figura 4 – Faixa de conversão para a esquerda da Rua Fátima.....	44
Figura 5 – Faixas de conversão no cruzamento.....	45
Figura 6 – Movimentos do primeiro estágio do semáforo do cenário atual	46
Figura 7– Movimentos do segundo estágio do semáforo do cenário atual	46
Figura 8 – Movimentos do terceiro estágio do semáforo do cenário atual	47
Figura 9 – Movimentos do quarto estágio do semáforo do cenário atual	47
Figura 10 – Velocidades permitidas na região e localização dos obstáculos	48
Figura 11 – Infraestrutura do terminal do Itaum na simulação	49
Figura 12 – Nome utilizados para os pontos de origem e destino	49
Figura 13 – Rota utilizada para a calibração	55
Figura 14 – Rede com o funcionamento do sistema ferroviário	59
Figura 15 – Implementação da rotatória.....	60
Figura 16 – Comparação do tempo médio de viagem dos cenários	68
Figura 17 – Comparação da velocidade média dos cenários.....	68
Figura 18 – Comparação do atraso médio dos cenários.....	69
Figura 19 – Comparação do tempo parado médio dos cenários.....	69
Figura 20 – Comparação do comprimento médio dos cenários	70
Figura 21 – Comparação dos principais indicadores do fluxo de veículos	71
Figura 22 – Comparação da emissão de dióxido de carbono dos cenários	72
Figura 23 – Comparação da emissão de monóxido de carbono dos cenários.....	72
Figura 24 – Comparação da emissão de hidrocarbonetos dos cenários.....	73
Figura 25 – Comparação da emissão de óxidos de nitrogênio dos cenários	73
Figura 26 – Comparação da emissão de material particulado dos cenários	74
Figura 27 – Benefícios das atualizações da tecnologia nas emissões.....	75
Figura 28 – Benefícios das alterações viárias nas emissões	76
Figura 29 – Benefícios das combinações de cenários nas emissões	77
Figura 30 – Comparação do combustível utilizado nos cenários	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Informações utilizadas na simulação e a origem dos dados	35
Quadro 2 – Configuração do semáforo no cenário atual	45
Quadro 3 – Fluxo de veículos da manhã.....	50
Quadro 4 – Fluxo de veículos da tarde	51
Quadro 5 – Transporte público da manhã.....	52
Quadro 6 – Transporte público da tarde.....	52
Quadro 7 – Distribuição das normas EURO em Joinville	53
Quadro 8 – Distribuição considerada no cenário atual.....	54
Quadro 9 – Modelos utilizados para quantificar as emissões.....	54
Quadro 10 – Tempo de viagem coletado na manhã	56
Quadro 11 – Tempo de viagem coletado na tarde	56
Quadro 12 – Erro encontrado sem a alteração do comportamento.....	57
Quadro 13 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,4	57
Quadro 14 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,3	58
Quadro 15 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,2	58
Quadro 16 – Resultados do cenário atual	58
Quadro 17 – Resultados do cenário com a passagem do trem.....	60
Quadro 18 – Resultados do cenário com a implementação da rotatória	61
Quadro 19 – Configuração do semáforo no cenário do binário	61
Quadro 20 – Resultados do cenário com a implantação do binário	62
Quadro 21 – Distribuição das normas EURO no quarto cenário	62
Quadro 22 – Resultado da atualização da frota para EURO 2.....	63
Quadro 23 – Distribuição das normas EURO no quinto cenário	63
Quadro 24 – Resultado da atualização da frota para EURO 3.....	63
Quadro 25 – Resultado da atualização da frota para EURO 5.....	64
Quadro 26 – Resultado da combinação do trem e a norma EURO 5.....	64
Quadro 27 – Resultado da combinação da rotatória e a norma EURO 5.....	65
Quadro 28 – Resultado da combinação do binário e a norma EURO 5	65
Quadro 29 – Apresentação dos cenários e suas alterações	67
Quadro 30 – Vantagens e desvantagens na implementação das alterações viárias	79
Quadro 31 – Estimativa dos custos das alterações viárias	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CHO – Aldeídos

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

DETRANS – Departamento de Trânsito de Joinville

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

HBEFA – Handbook Emission Factors for Road Transport

HC – Hidrocarbonetos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MP_x – Material particulado

NMHC – Hidrocarboneto não metano

NO – Óxido nítrico

NO₂ – Dióxido de nitrogênio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

PROCONVE – Programa de controle de emissões veiculares

PROMOT – Programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomotores e similares

SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito

SEPUR – Secretaria de Pesquisa e Planejamento Urbano

SO₂ – Dióxidos de enxofre

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMÁTICA	14
1.2. OBJETIVOS	16
1.2.1. Objetivo Geral	16
1.2.2. Objetivos Específicos	16
1.3. JUSTIFICATIVA	16
1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	19
2.2. MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	21
2.3. POLUIÇÃO DOS VEÍCULOS	22
2.3.1. Monóxido e dióxido de Carbono	24
2.3.2. Hidrocarbonetos	25
2.3.3. Óxidos de Nitrogênio	25
2.3.4. Dióxido de Enxofre	26
2.3.5. Material Particulado	27
2.4. PACOTE DE MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	27
2.4.1. Modelo de Car-Following	28
2.4.2. Modelo de Lane-Changing	30
2.4.3. Modelo de Gap-Acceptance	31
2.4.4. Modelo de Emissões de Poluentes dos Veículos	31
3. METODOLOGIA	33
3.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS	34
3.3. MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DA MICROSIMULAÇÃO	36
3.4. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	39
3.5. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	41
4. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E DOS RESULTADOS	42
4.1. ÁREA DE ESTUDO	42
4.2. MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL	43
4.3. MODELAGEM DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	59

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1. COMPARAÇÃO DOS INDICADORES DOS FLUXOS DE VEÍCULOS	67
5.2. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES	71
5.3. COMPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO PELOS VEÍCULOS	78
5.4. COMPARAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES VIÁRIAS NA REGIÃO.....	79
6. CONCLUSÃO	81
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras estão se expandindo por meio do acelerado crescimento da população, influenciando no aumento na quantidade de deslocamentos observados diariamente nos grandes centros urbanos. Essa situação aumenta a ocorrência de congestionamentos, estresse, acidentes e intensifica a emissão de poluentes veiculares para o meio ambiente, fomentando a necessidade de entender os motivos das pessoas em se deslocar e a escolha do modo de transporte utilizado pelos cidadãos (TAFFAREL, 2015).

O funcionamento do transporte está dividido em oferta e demanda, sendo representado e identificado com o desejo em realizar ou não um deslocamento. A escolha considera como métrica o tempo necessário para completar o percurso, a disponibilidade de acesso ao destino desejado, o modo de transporte escolhido, as condições da infraestrutura e da segurança das vias (IMMERS; STADA, 1998).

A análise da demanda utiliza da coleta de dados socioeconômicos e das viagens realizadas, definindo a vontade dos habitantes em se deslocar, identificando a origem e os polos atratores de viagem, compilando as informações em uma matriz origem-destino (MANICA, 2013). Por outro lado, a oferta de transporte está relacionada à associação entre o conjunto de regras que comandam seu funcionamento e a infraestrutura necessária para a circulação de pessoas e veículos, facilitando a movimentação dos usuários e mercadorias (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

A oferta de transporte pode ser modelada por uma combinação entre as teorias de fluxo de tráfego, que representam a interação entre os motoristas nas vias e a interação entre os motoristas e a infraestrutura, e o fluxo de rede, que elenca o desempenho do sistema, com o tempo da viagem. Essa variável é calculada por meio do comprimento da via e a velocidade dos veículos, podendo ser uma informação direta, como o tempo esperado para embarcar no ônibus, metrô, trem, avião ou barco (CASCETTA, 2009).

A combinação entre os modelos de demanda, oferta e tráfego, contribui para a estimativa da emissão de poluentes dos transportes, entretanto é necessário o auxílio de modelos matemáticos para quantificar as emissões provenientes do modo de transporte analisado (CAPPIELLO, 2002).

Nesse sentido, a simulação se apresenta como uma ferramenta que possibilita representar o comportamento do tráfego, modelando a interação entre os usuários e a infraestrutura. Essa ferramenta permite realizar análises em diferentes escalas de complexidade, dependendo do objetivo a ser alcançado, o conhecimento da pessoa que está utilizando a ferramenta, da disponibilidade de informações e de hardware (BARCELÓ, 2010).

A confecção da simulação do estado atual de um local, possibilita realizar comparações de diferentes cenários alternativos, apresentando o possível impacto positivo ou negativo para a cidade, otimizando o investimento em modificações viárias, auxiliando os responsáveis na tomada de decisão (FELIPE et al., 2020).

Segundo Lima, Lopes e Façanha (2019), o desenvolvimento das cidades está ligado diretamente com fatores ambientais, sociais, políticos e econômicos, que influenciam na consolidação do modo de transporte escolhido pelas pessoas e empresas para realizar seus transportes.

O cenário do crescimento sem planejamento, acarretou a presença constante de adversidades nos grandes centros urbanos, fomentando a busca por medidas que tenham o intuito de atenuar o aumento do número de automóveis e incentivar o uso do transporte coletivo e do transporte ativo. Essas intervenções tem a finalidade de diminuir o número de acidentes, a quantidade e o tempo perdido em congestionamentos, a presença de ruídos, a poluição visual e a emissão de poluentes para o ambiente (CAPPIELLO, 2002).

Os impactos do fluxo de veículos são evidentes nas regiões urbanas brasileiras, portanto, será realizada um estudo do impacto das alterações viárias e das atualizações na tecnologia dos veículos em relação às emissões de poluentes. Neste trabalho foi utilizado a ferramenta computacional Eclipse SUMO (Simulation of Urban Mobility) de microssimulação de tráfego, aplicando como região de estudo o entorno da Terminal do Itaum – Governador Pedro Ivo Figueiredo Campos, na cidade de Joinville, Santa Catarina.

1.1. PROBLEMÁTICA

Um levantamento realizado pelo WHO (2021a), demonstra que 90% das regiões urbanas apresentam no ar uma quantidade de material particulado acima do recomendado. Esse valor estabelecido pela organização tem um limite de dez

microgramas por metro cúbico de ar para partículas finas com o diâmetro inferior a 2,5 micrômetros, causando um cenário preocupante de sete milhões de mortes por ano decorrente da poluição do ar.

As principais fontes de poluentes no ar são os veículos, as indústrias, a geração de energia, os edifícios energeticamente ineficientes, a queima de lixo e a utilização de biomassa, querosene e carvão nas residências. Essas fontes das emissões são divididas em estacionárias e móveis, necessitando de interferência pública, privada ou cultural para buscar alternativas para reduzir a poluição (WHO, 2021a).

A mobilidade urbana é uma área do planejamento urbano que interfere nas escolhas das pessoas em seus deslocamentos, necessitando buscar alternativas para incentivar a redução das emissões de poluentes dos veículos. Essa redução vem com a criação de medidas que motivam a utilização de veículos com menor taxa de emissão de poluente, o uso do sistema de transporte público, a construção de cidades com a presença de áreas verdes e a possibilidade de realizar os deslocamentos por caminhada ou por bicicleta (WHO, 2021a).

Segundo CETESB (2022), realizou-se um estudo no estado de São Paulo sobre a poluição veicular, mostrando que a entrada de veículos com novas tecnologias na frota promove a diminuição na quantidade de poluentes no ar, entretanto foi observado que a atualização dos veículos diminuiu com o passar dos anos. Essa situação causa uma desaceleração na redução de poluentes na atmosfera, apresentando a necessidade de encontrar alternativas para reduzir os poluentes encontrados em regiões urbanas.

A ocorrência da problemática proporciona a formulação das seguintes questões:

- A microssimulação de tráfego é capaz de representar o comportamento dos fluxos de veículos de uma região urbana de uma cidade?
- A simulação pode ser uma ferramenta para quantificar os indicadores de tráfego e as emissões de poluentes provenientes dos veículos automotores?
- A implementação de alterações viárias conseguem ser uma alternativa para melhorar o fluxo e diminuir as emissões de poluentes dos veículos?

- A atualização da tecnologia encontrada na frota de veículos em uma cidade interfere na quantidade de emissões de poluentes?

1.2. OBJETIVOS

A necessidade de resolver a problemática da ocorrência dos congestionamentos e das emissões de poluentes dos veículos em uma região urbana, propõem-se os seguintes objetivos.

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar o impacto das alterações viárias e das mudanças de tecnologia dos veículos nas emissões de poluentes em uma região urbana da cidade de Joinville, SC.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Representar o comportamento do tráfego de uma região urbana por meio da microssimulação de tráfego.
- Quantificar os indicadores de tráfego e as emissões de dióxido de carbono, de monóxido de carbono, de hidrocarbonetos, de óxidos de nitrogênio e de material particulado provenientes dos veículos.
- Desenvolver cenários baseando-se nas atualizações das tecnologias dos veículos e na alteração na infraestrutura com a implementação de uma rotatória e de um binário na região.
- Analisar o impacto das alterações viárias e das atualizações de tecnologias na poluição proveniente dos veículos.

1.3. JUSTIFICATIVA

O município de Joinville está situado na região norte do estado de Santa Catarina, com uma área de 1.127,947 quilômetros quadrados e uma população registrada de 515.288 habitantes no ano de 2010. A estimativa é alcançar a marca de 604.708 habitantes para o ano de 2021, ocupando no ranking a posição da maior

cidade do estado e a terceira mais populosa da região sul do Brasil, com um índice de desenvolvimento humano de 0,809 (IBGE, 2010).

A cidade está dividida em setores industriais, residências e comerciais, distribuídos por todo o território, consolidando a necessidade de realizar deslocamentos diariamente. Essa divisão territorial aumenta a concentração de veículos no período da manhã e no período da tarde, ocasionando os conhecidos horários de pico, observados durante o decorrer do dia (PRATA et al., 2019).

Além disso, o IBGE (2022) levantou que no município de Joinville existe o registro de uma frota de 464.845 veículos, estando em 24º no ranking das cidades brasileiras com maior frota em circulação. Isto origina um cenário preocupante de aproximadamente 0,76 veículos por pessoa, impactando diretamente o desenvolvimento urbano, intensificando os congestionamentos e a emissão de poluentes, amplificando os danos ao meio ambiente.

A região escolhida da cidade apresenta um cruzamento que combina o terminal de transporte público, o sistema ferroviário, o elevado fluxo de veículos e o movimento constante de pedestres e ciclistas. Essa situação observada promove um alto índice de acidentes e congestionamentos, responsável pelo acúmulo de poluentes na proximidade do posto de saúde (CAVALCANTE, 2009).

Neste contexto, este estudo identifica os impactos positivos ou negativos na implementação de alterações viárias e da atualização das tecnologias dos veículos, com o intuito de reduzir os congestionamentos e as emissões de poluentes.

1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em seis capítulos, iniciando com uma introdução, que apresenta para o leitor as questões abordadas nesta pesquisa, elencando a problemática observada, os objetivos, a justificativa da pesquisa e a explicação de como é estruturado o trabalho.

O segundo capítulo evidencia a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do estudo, organizando um grupo de levantamentos e discussões que envolvem o tema da pesquisa.

O terceiro capítulo demonstra a metodologia aplicada e a sequência de passos utilizados para a realização da pesquisa, seguindo uma ordem lógica e organizada para alcançar os objetivos definidos.

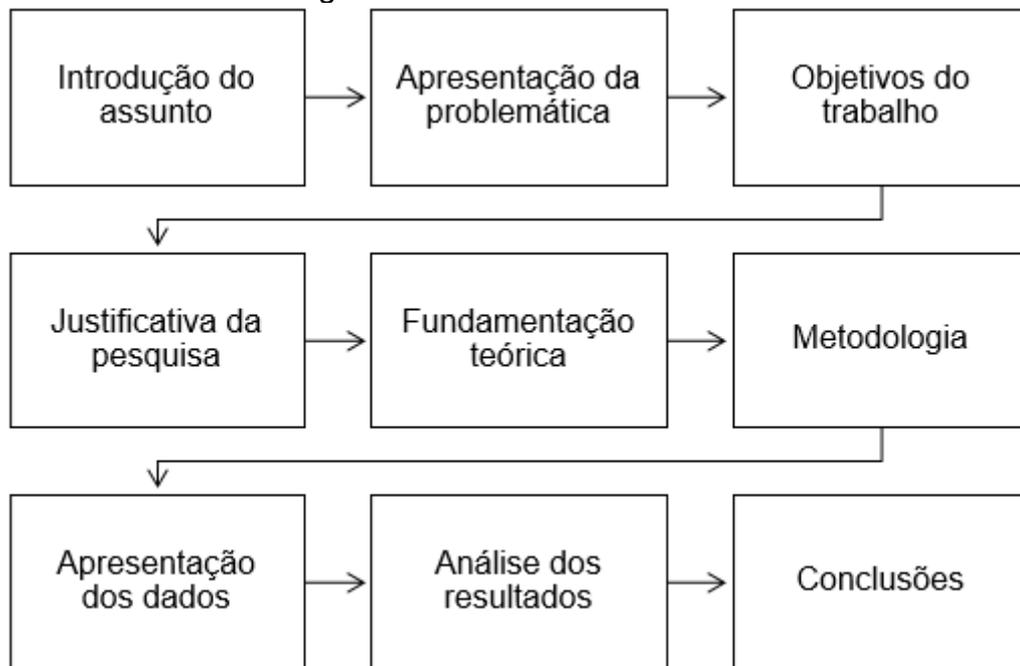
O quarto capítulo segue a ordem definida pelo capítulo da metodologia, apresentando as informações adquiridas, coletadas e consideradas no desenvolvimento e na idealização do trabalho.

O quinto capítulo apresenta a análise dos dados, que compara a situação atual da região com os cenários propostos, possibilitando observar quantitativamente os impactos positivos e negativos.

O sexto capítulo finaliza o trabalho expressando a conclusão encontrada no trabalho e listando as possibilidades de próximas pesquisas para a área de estudo.

A Figura 1 descreve a estrutura utilizada no trabalho.

Figura 1 – Estrutura do trabalho



Fonte: Autor (2023).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado a base teórica empregada no trabalho. A pesquisa utilizou-se de referências bibliográficas para conceituar a simulação de tráfego, a microssimulação de tráfego, os poluentes derivados dos veículos automotores e as normativas de regulamentação das emissões e o detalhamento do software de microssimulação utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A simulação é uma ferramenta que permite realizar uma representação da realidade, viabilizando analisar alternativas em um ambiente virtual, com o intuito de investigar possibilidades de melhorias e revelar possíveis problemas encontrados com o passar do tempo (BETHONICO, 2016).

Uma das utilizações da ferramenta computacional é para representar o funcionamento e o comportamento do tráfego, possibilitando quantificar o impacto positivo ou negativo de modificações propostas para uma região de estudo. Esse ferramental proporciona um amplo conjunto de informações para auxiliar e complementar a tomada de decisão dos responsáveis pela fiscalização, operação, planejamento e gerenciamento do trânsito das cidades (FELIPE et al., 2020).

Segundo Barceló (2010), uma forma de aplicar os modelos matemáticos desenvolvidos para representar o tráfego é por meio da simulação. Essa ferramenta representa por meio de modelos o funcionamento do fluxo de veículos, de pedestres e de ciclistas com a passagem do tempo, podendo ser empregado de uma forma assíncrona, com intervalos de tempo variáveis ou de uma forma síncrona, com intervalos de tempo definidos.

A dinâmica dos fluxos de veículos pode ser modelada com uma abordagem macroscópica, mesoscópica ou microscópica, dependendo do nível de representação esperada para uma região (ALGHAMDI et al., 2022).

A modelagem em escala macroscópica dos fluxos de tráfego utiliza como base a teoria de fluxo de tráfego contínuo, considerando que a quantidade de veículos é conservada dentro de dois pontos de contagem em uma área sem entradas ou saídas, buscando descrever a evolução do volume, da velocidade e da densidade,

representadas a cada instante de tempo e em cada ponto no espaço (BARCELÓ, 2010). A modelagem macroscópica é utilizada para representação de situações de fluxo livre de veículos, necessitando para a elaboração e a calibração da simulação uma quantidade menor de dados de entrada e de hardware em comparação as outras modelagens, entretanto apresentando resultados agrupados e com baixo nível de detalhamento (STORANI et al., 2021).

O modelo mesoscópico é um nível médio de detalhamento, utilizando a dinâmica e os resultados para um conjunto de veículos, conforme empregado na modelagem macroscópica e a configuração individual dos veículos, como é definido para o modelo microscópico, apresentando uma necessidade inferior de hardware em comparação a microssimulação de tráfego e um detalhamento dos resultados melhor que a macrossimulação de tráfego (BARCELÓ, 2010). A simulação mesoscópica é utilizada na necessidade em conseguir um nível de detalhamento encontrado na modelagem microscópica, entretanto inviável por se tratar de uma rede extensa ou pela falta de recursos para realizar o levantamento dos dados para a elaboração da rede (BURGHOUT; KOUTSOPOULOS; ANDRÉASSON, 2005).

A modelagem microscópica é baseada na representação do comportamento individual dos veículos na simulação, possibilitando configurar fatores como a aceleração, a desaceleração, a mudança de faixa e as repostas do motorista ao trânsito, apresentando o maior custo computacional em comparação aos outros modelos (BARCELÓ, 2010). A utilização permite adquirir o maior nível de detalhamento nos resultados, entretanto, necessita um grande volume de variáveis para a elaboração da simulação e para a configuração dos modelos matemáticos utilizados para representar os comportamentos dos motoristas (OTKOVIĆ et al., 2023).

A escolha da modelagem utilizada em um estudo está vinculada com a configuração da infraestrutura da região, a disponibilidade de conseguir realizar o levantamento dos dados necessários para a elaboração e calibração de uma simulação, a definição das variáveis e do detalhamento necessário para realização das análises, o conhecimento técnico e familiaridade da pessoa com a ferramenta que será aplicada ao estudo e as limitações de hardware, para a confecção de redes complexas (FERNANDES et al., 2009).

Neste trabalho, a região escolhida como objeto de estudo e a análise proposta a ser realizada, necessita de um alto nível de detalhamento nos resultados e nas

configurações da rede e dos veículos, portanto, incentivando a utilização da modelagem microscópica. A escolha da modelagem estabeleceu a necessidade de apresentar o detalhamento dos conceitos que compõem uma microsimulação de tráfego.

2.2. MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A microsimulação de tráfego é uma combinação entre as ferramentas de simulação e a modelagem matemática microscópica de tráfego, representando os veículos individualmente e os comportamentos dos motoristas durante os deslocamentos, considerando a interação entre os veículos da região e entre os veículos e a infraestrutura (ASTARITA et al., 2001).

A individualização de cada um dos veículos permite um maior nível de detalhamento nas configurações da idade, das dimensões, dos pesos, das tecnologias e dos comportamentos dos veículos na infraestrutura considerada para a região de estudo, portanto, possibilitando adquirir resultados como a velocidade instantânea para cada um dos veículos em qualquer instante de tempo em que estiverem na simulação (DIAS et al., 2017).

A modelagem microscópica de tráfego utiliza de submodelos como o de car-following, de lane-changing e de gap-acceptance para realizar a representação do comportamento dos veículos no trânsito, apresentando uma diversidade de parâmetros para definir a percepção dos motoristas ao trânsito vivenciado na realidade (BARCELÓ, 2010).

A presença de diferentes modelos matemáticos implementados em softwares para representar cada um dos submodelos, promove diversas possibilidades de cenários comportamentais, ocasionando uma maior complexidade na realização da calibração das simulações (DIAS, 2014).

A vantagem da simulação considerando a modelagem microscópica é a possibilidade de detalhar as configurações dos veículos e a facilidade em conseguir resultados desagregados para cada um dos veículos em cada instante de tempo. Esse funcionamento aumenta a sensibilidade das análises, proporcionando observar o impacto positivo ou negativo de uma implementação de um cenário proposto, diminuindo gastos desnecessários com infraestruturas e permitindo encontrar problemas futuros para uma região de estudo (KRAJZEWICZ, 2012).

A finalização do entendimento sobre a ferramenta computacional que possibilita a representação do comportamento dos veículos e das configurações dos fluxos de tráfego de uma região urbana, direcionou o estudo para a fase de detalhamento dos poluentes derivados dos veículos automotores e as normas que regulamentam as emissões de poluentes.

2.3. POLUIÇÃO DOS VEÍCULOS

Os setores que apresentam a maior contribuição para a poluição atmosférica em regiões urbanas são os transportes, a geração de energia, as indústrias e os resíduos descartados, provocando um cenário preocupante para o presente e para o futuro da humanidade, estimando que 91% da população mundial está exposta a ar poluído diariamente em áreas urbanas (WHO, 2021b).

No Brasil é possível observar um crescimento constante na quantidade de veículos automotores em circulação, demonstrando um aumento na frota de 6,51% no ano de 2020 em relação ao ano de 2015, entrando em sexto lugar no ranking dos países com o maior registro de veículos, possibilitando estimar um crescimento de aproximadamente 1% da frota por ano (OICA, 2023).

Segundo Lopes et al. (2018), os transportes são responsáveis pela emissão de substâncias tóxicas, como o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), dióxidos de enxofre (SO₂) e material particulado (MP), causando também a poluição sonora e visual. Além disso, a queima completa de combustíveis fósseis nos veículos promove a emissão do dióxido de carbono (CO₂), que não representa toxicidade para os seres humanos em baixas quantidades, entretanto está ligado diretamente com o aquecimento global, que conseqüentemente causa alterações no clima e na vida das pessoas (OLIVEIRA, 2012).

As substâncias tóxicas provenientes dos veículos automotores são responsáveis por doenças e complicações na saúde dos moradores que vivem e frequentam as regiões urbanas, afetando especialmente o sistema respiratório e agravando a situação dos indivíduos com asma, alergias e problemas cardíacos (NICOLUSSI et al., 2014). A saúde da população é uma questão ligada diretamente com o planejamento urbano das cidades, fazendo necessário a elaboração de políticas e investimentos que buscam incentivar o uso de transportes com menores níveis de poluentes, buscando desenvolver uma cidade saudável (WHO, 2021b).

No Brasil a regulamentação das emissões de poluentes dos veículos automotores é realizada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio do programa de controle de emissões veiculares (PROCONVE) (BRASIL, 1986).

O programa busca os seguintes objetivos:

- Reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender os Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos;
- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional tanto na engenharia automobilística como em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;
- Criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;
- Promover a conscientização sobre a poluição do ar por veículos automotores;
- Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos disponíveis para a frota nacional de veículos automotores, visando a redução de poluentes emitidos na atmosfera;
- Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados.

O PROCONVE regulamenta o limite permitido para as emissões de monóxido de carbono (CO), de hidrocarbonetos totais (THC), de hidrocarboneto não metano (NMHC), de óxidos de nitrogênio (NOx), de material particulado (MP) para motores com o ciclo diesel, de aldeídos (CHO) e monóxido de carbono em marcha lenta para motores com o ciclo Otto (BRASIL, 2009).

A regulamentação do programa é aplicada para novos veículos produzidos nacionalmente ou importados, diferenciando as medidas para os veículos leves e os pesados e separando entre ciclo diesel e ciclo Otto (BRASIL, 1986). As novas fases de regulamentação previam a inclusão do ruído como medida para os veículos leves e os veículos pesados (BRASIL, 2018a, 2018b).

A regulamentação dos limites para as emissões de poluentes de motocicletas, ciclomotores e similares é estabelecida pelo programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomotores e similares (PROMOT) (BRASIL, 2002). Os limites são estabelecidos para os mesmos tipos de poluentes exigidos para os veículos leves e

pesados, entretanto o ruído entrou na regulamentação antes mesmo de existir um controle das emissões de poluentes (BRASIL, 1993).

A União Europeia estipula os limites das emissões de monóxido de carbono (CO), de hidrocarbonetos totais (THC), de hidrocarboneto não metano (NMHC), de óxidos de nitrogênio (NOx) e de material particulado (MP) para os veículos, exceto navios e aviões, que seguem uma regulamentação específica (UNIÃO EUROPEIA, 1991).

As regulamentações do Brasil e da União Europeia apresentam semelhanças e equivalências nas limitações exigidas para as emissões de poluentes dos veículos, possibilitando uma conversão entre as normas (DIAS, 2018).

Os conceitos sobre a poluição dos veículos permitiram observar que a regulamentação do Brasil e da União Europeia consideram os mesmos poluentes para o controle da qualidade do ar, portanto, motivando o detalhamento dos principais poluentes derivados dos veículos.

2.3.1. Monóxido e dióxido de Carbono

O monóxido de carbono é um gás inodoro, incolor e extremamente tóxico para as pessoas, resultante da queima incompleta dos combustíveis com o carbono em sua composição (CETESB, 2022). A exposição ao poluente em altas concentrações provoca uma reação com a hemoglobina do sangue, reduzindo a capacidade do organismo em transportar oxigênio, causando a morte por hipóxia (NASCIMENTO, 2016).

A intoxicação por monóxido de carbono tem como sintoma inicial as dores na cabeça e no peito, a tontura, a confusão, a náusea e o vômito, agravando a situação com o aumento da exposição ao poluente, causando consequências irreversíveis, afetando principalmente os idosos, crianças e gestantes, podendo provocar perda nas funções psicomotoras e desenvolver doenças cardiovasculares (WEAVER et al., 2002).

Nos grandes centros urbanos os automóveis são os principais responsáveis pelas emissões de monóxido de carbono para a atmosfera, correspondendo a 65% do total de monóxido de carbono resultante dos deslocamentos realizados pelos veículos, possibilitando observar que a redução das emissões com o passar dos anos

é motivada pela evolução da tecnologia e não pela redução do uso de veículos automotores (CETESB, 2022).

O dióxido de carbono é o resultado da combustão completa dos motores alimentados por combustíveis fósseis, responsável principal pelo efeito estufa, com a permanência na atmosfera por pelo menos centenas de anos (TERRENOIRE et al., 2022).

A preocupação com o aquecimento global incentivou a busca por medidas e alternativas para realizar a mitigação das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, necessitando encontrar ferramentas para quantificar as emissões e alternativas para os combustíveis fósseis nos veículos (BUBERGER et al., 2022).

2.3.2. Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são compostos formados por cadeias de carbono e hidrogênio, podendo ser encontrado nos veículos automotores como uma parcela de combustível não queimado ou queimado parcialmente expelido pelo motor ou como vapor de combustível emitido de diversos pontos do veículo ou expelido durante o abastecimento do tanque (CETESB, 2022).

A combinação entre as reações dos hidrocarbonetos e dos óxidos de nitrogênio na atmosfera e a presença da luz solar, implicam a ocorrência do efeito conhecido como smog fotoquímico, formando uma névoa de poluição que é visível principalmente nos grandes centros urbanos que apresentam grande movimentação de veículos (SOUZA, M. et al., 2022).

O conjunto de compostos conhecidos como hidrocarbonetos apresentam efeito prejudicial para a saúde das pessoas quando ingeridos ou inalados, ocasionando problemas pulmonares e no sistema respiratório (YANG et al., 2021).

2.3.3. Óxidos de Nitrogênio

O óxido de nitrogênio (NO_x) é uma representação do óxido nítrico (NO) e do dióxido de nitrogênio (NO_2), proveniente da reação do nitrogênio com o oxigênio em razão da alta temperatura na câmara de combustão, participando na formação da chuva ácida, do material particulado e do efeito smog, causando irritação para os pulmões e diminuindo a resistência a infecções respiratórias, aumentando a

sensibilidade para o desenvolvimento da asma e da bronquite, principalmente em crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios (LORENTE et al., 2019).

Nas regiões urbanas os veículos automotores são as principais fontes das emissões de óxidos de nitrogênio, possibilitando observar que as emissões estão relacionadas diretamente com o tipo de veículos, o tipo de combustível utilizado, a tecnologia de tratamento de exaustão e as condições de condução (SOUZA, A. et al., 2018). Os caminhões representam 55% do total de óxido de nitrogênio (NO_x) resultante dos deslocamentos realizados pelos veículos, principalmente os caminhões pesados e os semipesados (CETESB, 2022).

2.3.4. Dióxido de Enxofre

O dióxido de enxofre é um composto formado pela reação do oxigênio com o enxofre contido nos combustíveis dos veículos na forma de óleo diesel ou gasolina, igualmente ao que acontece com os óxidos de nitrogênio, contribuindo para a formação das chuvas ácidas, a diminuição da visibilidade, a acidificação de corpos d'água e a corrosão de edificações, de monumentos, de estruturas metálicas e de condutores elétricos nas regiões urbanas (GRENNFELT et al., 2020).

O alto nível de exposição ao dióxido de enxofre causa dificuldade respiratória, alteração na defesa dos pulmões, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares (CETESB, 2022). Além disso, o poluente acaba irritando o nariz, a garganta e os pulmões, causando catarro, chiado no peito, crises de asma, falta de ar e tosse, afetando principalmente as pessoas com doenças crônicas de pulmão e as crianças, que são sensíveis aos efeitos do dióxido de enxofre (SO_2) (OGA; CAMARGO; BATISTUZZO, 2021).

Nos grandes centros urbanos os caminhões são os principais responsáveis pelas emissões de dióxido de enxofre para a atmosfera, correspondendo a 71% do total de dióxido de enxofre resultante dos deslocamentos realizados pelos veículos (CETESB, 2022).

As regulamentações do Brasil e da União Europeia não consideram o dióxido de enxofre como um dos poluentes necessários a ser controlado e limitado para a produção de novos veículos (UNIÃO EUROPEIA, 1991; BRASIL, 2009).

2.3.5. Material Particulado

Os materiais particulados são um conjunto de poluentes constituído principalmente de fumaças, de poeiras, de partículas sólidas e líquidas, que se mantêm suspensas no ar devido ao seu tamanho reduzido (GEISS et al., 2010).

O tamanho das partículas está ligado diretamente a sua capacidade em conseguir atingir os alvéolos pulmonares e bronquíolos, provocando problemas na saúde humana como doenças respiratórias e cardiovasculares. Além disso, as emissões dos materiais criam um desconforto nas condições estéticas do ambiente e prejudicam as atividades normais da região, podendo ocasionar acidentes pela redução da visibilidade da pista para os motoristas (JANSEN et al., 2005).

Os veículos automotores equipados com motores que utilizam o ciclo diesel são responsáveis pela maior parte das emissões de material particulado, óxidos de nitrogênio e dióxidos de enxofre observados nos grandes centros urbanos, necessitando a imposição de limites máximos para as emissões dos motores a diesel está associada aos danos provocados para as pessoas e para o meio ambiente (MENEZES; CATALUÑA, 2008).

Os veículos com motores do ciclo diesel podem atingir taxas de liberação de material particulado de 50 a 100 vezes maior que os veículos com motores do ciclo Otto, pela combustão incompleta do combustível (DIAS, 2018). Segundo CETESB (2022), no estado de São Paulo o maior responsável pela emissão de material particulado é os caminhões, com a participação de 70% do total, reforçando o conceito do alto nível das emissões provenientes do ciclo diesel.

O entendimento sobre a simulação tráfego, a microssimulação e os poluentes derivados dos veículos automotores, permitiu o trabalho continuar para a fase de detalhamento do pacote computacional utilizado como ferramenta para realizar a elaboração da simulação e a obtenção dos resultados necessários para a realização das análises propostas para este estudo.

2.4. PACOTE DE MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A análise proposta para ser realizada neste trabalho, necessita de uma ferramenta que possibilite a representação do comportamento dos motoristas e a quantificação das emissões de poluentes dos veículos em uma região urbana

congestionada, portanto, motivando a escolha de um software de microsimulação de tráfego (ALEKO; DJAHHEL, 2020).

O programa computacional escolhido é o Eclipse SUMO, desenvolvido pelos funcionários do Institut für Verkehrssystemtechnik do Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) em parceria com a Zentrum für Angewandte Informatik der Universität zu Köln (ZAIK) para a formulação inicial da modelagem microscópica, com o intuito de ser um software com código aberto para realização de estudos de tráfego com a microsimulação de redes complexas (LOPEZ et al., 2018).

Segundo Barceló (2010), o desenvolvimento do software é direcionado para o público acadêmico, proporcionando a capacidade de realizar simulações em escalas diversas e comparações de submodelos, seguindo como fundamento a portabilidade para diversificados sistemas e a facilidade em conseguir iniciar e adaptar a ferramenta para o desejo do usuário.

O Eclipse SUMO viabiliza a construção de simulações com veículos de diferentes classes e configurações, permitindo a modelagem de ruas exclusivas para sua operação, como os corredores que são exclusivos os ônibus, as calçadas para os pedestres, as ciclofaixas para os ciclistas, os rios para o sistema hidroviário e os trilhos para o sistema ferroviário e metroviário (BEHRISCH; ERDMANN; KRAJZEWICZ, 2010).

A ferramenta possibilita realizar a avaliação do nível de desempenho das ruas, dos cruzamentos e da região escolhida, utilizando de indicadores de tráfego, representados pela formação de fila, pela velocidade dos veículos, pelo atraso, pelo tempo de viagem e pelo tempo parado, proporcionando quantitativamente os impactos positivos e negativos de uma proposta de alteração viária ou de tecnologia dos veículos (FILHO, 2019).

O software tem a implementação de modelos matemáticos para representar as emissões de poluentes dos veículos e os comportamentos dos motoristas com os modelos de car-following, lane-changing e gap-acceptance, portanto, fazendo necessário o detalhamento dos conceitos e das configurações dos modelos.

2.4.1. Modelo de Car-Following

O modelo de car-following representa o comportamento padrão dos motoristas em realizar aproximações ou distanciamentos do veículo que está na sua

frente, utilizando da percepção da variação de velocidade observada entre os veículos, considerando como parâmetros a aceleração e a desaceleração para manter uma distância padrão e segura entre os veículos (CHAVES, 2017).

O software Eclipse SUMO possibilita a utilização e configuração de diferentes modelos matemáticos para representar o comportamento de car-following dos veículos, apresentando na sua implementação os modelos de Krauss, Krauss adaptado, Krauss com a inclinação dos veículos, Krauss com limitação na aceleração, PWagner2009, IDM, EIDM, IDMM, Wiedemann e Wiedemann99 (KRAJZEWICZ et al., 2012).

A ferramenta utiliza como padrão uma adaptação do modelo original proposto por Krauss, apresentando como diferença a possibilidade de configurar as capacidades de desaceleração entre os veículos sem desobedecer a segurança perfeita e da atualização da velocidade de segurança para possibilitar a utilização de desacelerações instantâneas ou contínuas na simulação, mostrando ser um modelo apropriado para a representação do comportamento dos motoristas (BROCKFELD; WAGNER, 2004).

O modelo conhecido como Krauss foi proposto por Stefan Krauss em 1998, considerando permitir que os veículos se desloquem o mais rápido possível, mantendo uma segurança perfeita, responsável por sempre evitar uma colisão se o veículo líder começar a desacelerar nos limites da habilidade de aceleração máxima do líder e do seguidor (Krauss, 1998).

Segundo Barceló (2010), a modificação realizada no software Eclipse SUMO para o modelo de car-following discreto no tempo e contínuo no espaço proposto por Krauss é apresentado na equação (1) para o cálculo da velocidade de segurança do veículo seguidor:

$$v_{safe}(t) = -\tau \cdot b + \sqrt{(\tau \cdot b)^2 + v_{leader}(t-1)^2 + 2 \cdot b \cdot g_{leader}(t-1)} \quad (1)$$

Onde:

$v_{safe}(t)$ é a velocidade segura no tempo t (m/s);

τ é a reação do veículo seguidor (s);

b é a habilidade máxima de desaceleração (m/s²);

$v_{leader}(t)$ é a velocidade do líder no tempo t (m/s);

$g_{leader}(t)$ é a distância entre o veículo seguidor e o líder no tempo t (m);

Segundo Barceló (2010), a equação (2) é utilizada no modelo de Krauss para o cálculo da velocidade desejada do veículo seguidor:

$$v_{des}(t) = \min\{v_{safe}(t), v(t-1) + a, v_{max}\} \quad (2)$$

Onde:

$v_{des}(t)$ é a velocidade desejada do veículo seguidor no tempo t (m/s);

$v(t)$ é a velocidade atual do veículo seguidor no tempo t (m/s);

a é a habilidade máxima de aceleração do veículo seguidor (m/s²);

v_{max} é a velocidade máxima do veículo seguidor (m/s).

O modelo proposto por Krauss assume que um motorista não é perfeito em conseguir a velocidade desejada para o veículo, modelando a imperfeição da condução do veículo com uma desaceleração estocástica, possibilitando obter a próxima velocidade do veículo seguidor, necessitando garantir que o veículo não vai recuar (BARCELÓ, 2010). A equação (3) demonstra o cálculo da velocidade final do veículo seguidor no tempo:

$$v(t) = \max\{0, v_{des}(t) - r \cdot a \cdot \varepsilon\} \quad (3)$$

Onde:

$v(t)$ é a velocidade final do veículo seguidor no tempo t (m/s);

a é a habilidade máxima de aceleração do veículo seguidor (m/s²);

r é um número aleatório entre 0 e 1;

ε é a imperfeição da condução do veículo seguidor entre 0 e 1;

2.4.2. Modelo de Lane-Changing

O modelo de lane-changing representa o comportamento padrão dos motoristas em realizar as trocas de faixa, determinando o motivo da escolha da faixa utilizada e a velocidade necessária para realizar um troca de faixa sem o acontecimento de acidentes, com o intuito de conseguir aumentar a velocidade e diminuir o tempo de viagem (BARCELÓ, 2010).

O software Eclipse SUMO considera como modelagem padrão o modelo LC2013 desenvolvido pelo Jakob Erdmann, seguindo como funcionamento o cálculo da decisão de mudança de faixa de um veículo para todo instante de tempo da simulação, com base na rota do veículo e nas condições de tráfego atuais e históricas no entorno dos veículos. Além disso, considera as variações de velocidade para o próprio veículo e para os veículos obstrutores que promovem a execução bem-sucedida da manobra de mudança de faixa desejada (ERDMANN, 2014).

Segundo Erdmann (2014), o modelo de lane-changing utilizado no software Eclipse SUMO, considerando para a troca de faixa as seguintes motivações:

- A estratégica: Alteração de faixa para continuar ou acessar a rota.
- A cooperativa: Alteração de faixa para abrir espaço para a passagem de um veículo.
- A tática: Alteração de faixa para evitar um veículo com baixa velocidade.
- A regulatória: Alteração de faixa para manter a faixa de ultrapassagem livre, estipulado como obrigatório por regulamentações.

2.4.3. Modelo de Gap-Acceptance

O modelo de Gap-Acceptance no software Eclipse SUMO está implementando em conjunto ao modelo de lane-changing, utilizando de funções para determinar a brecha mínima aceitável para adentrar em uma via, considerando os parâmetros da motivação em realizar mudanças de faixas para determinar as brechas aceitáveis para realização de manobras (ERDMANN, 2014).

2.4.4. Modelo de Emissões de Poluentes dos Veículos

Os modelos de emissão de poluentes dos veículos são uma ferramenta que combina as informações dos veículos na microssimulação de tráfego e um conjunto de fatores de emissão para cada tipo de veículo, possibilitando representar de uma forma quantitativa os valores para as emissões no trânsito (CAPPIELLO, 2002).

O Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA), desenvolvido nas agências de proteção ambiental de países como Alemanha, Áustria e Suíça, apresenta uma base de dados contendo fatores de emissão para automóveis de passeio, veículos de carga leves e pesados, ônibus e motocicletas, configurando cada

veículo em diferentes classes, buscando representar diversas situações de tráfego observados na realidade (HBEFA, 2017).

Os modelos nomeados de HBEFA de emissões de poluentes do Eclipse SUMO foram implementados utilizando os fatores encontrados no HBEFA para cada tipo de veículo e a função contínua obtida com a simplificação da função da potência que o motor do veículo deve produzir para vencer a força de resistência motriz (KRAJZEWICZ et al., 2014). A função simplificada implementada no software é dada pela equação (4):

$$EF_p(v, a) = c_0 + c_1va + c_2va^2 + c_3v + c_4v^2 + c_5v^3 \quad (4)$$

Onde:

$EF_p(v, a)$ é o fator das emissões de poluentes do veículo;

v é a velocidade do veículo (m/s);

a é a aceleração do veículo (m/s²);

c_{0-5} são os fatores obtidos no HBEFA.

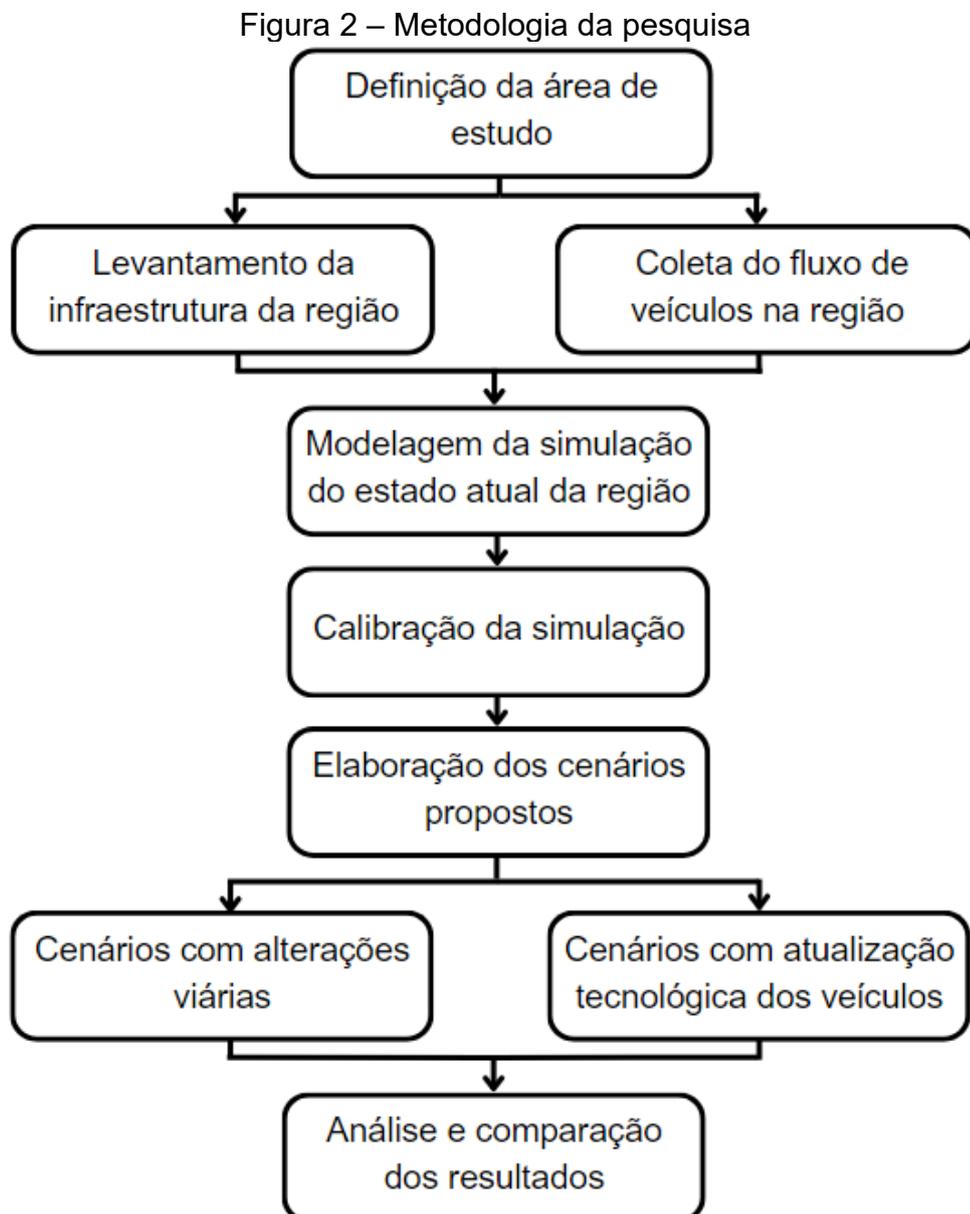
No software Eclipse SUMO é disponibilizado modelos que são desenvolvidos utilizando como base o HBEFA ou com base no modelo comercial PHEM, possibilitando quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), de monóxido de carbono (CO), de óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), de dióxidos de enxofre (SO₂), de material particulado (MP) e de combustível utilizado para cada tipo de veículo para completar o deslocamento dentro de uma região (KRAJZEWICZ et al., 2014).

Este capítulo apresentou o referencial teórico utilizado como base para o trabalho, detalhando os conceitos que constituem a simulação de tráfego, a microsimulação, a poluição dos veículos e o pacote de microsimulação. A base teórica possibilitou a elaboração de uma metodologia que será apresentada no próximo capítulo.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos do trabalho. Essa seção inicia com a definição da região, seguindo com a aquisição de dados, permitindo a modelagem e a calibração da simulação, possibilitando a formulação de cenários propondo mudanças viárias e atualizações na tecnologia da frota que circula pela cidade, proporcionando realizar análises e comparações dos resultados encontrados.

A Figura 2 apresenta o passo a passo aplicado na pesquisa.



Fonte: Autor (2023).

3.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A definição da região de estudo está relacionada com a ocorrência de congestionamentos, a possibilidade de conseguir os dados para a modelagem da microssimulação de tráfego e a presença de alternativas a serem aplicadas em busca de solucionar o problema. O processo de escolha da área considerou o índice de congestionamentos e o número de acidentes observados nos últimos anos na cidade de Joinville, SC.

A região escolhida é o entorno do terminal do Itaum, localizado na Rua Monsenhor Gercino, conhecida na cidade como a rua com maior formação de congestionamentos e maior número de acidentes nos últimos quatro anos. Essa área apresenta polos geradores de viagens no horário de pico da manhã e no horário de pico da tarde, contando com a presença de centros de educação, comércios e prestadores de serviço, provocando um acúmulo de pedestres, ciclistas e veículos.

3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

Após a definição da área de estudo, o trabalho seguiu para a representação do deslocamento dos veículos observado atualmente na região, necessitando identificar e adquirir informações sobre a infraestrutura, os fluxos de veículos e o funcionamento da região. Essas informações possibilitam a realização da modelagem da microssimulação de tráfego.

A infraestrutura utilizada para a elaboração da simulação foi composta por informações coletadas em campo e disponibilizadas na internet como a largura, o comprimento, a velocidade permitida em cada trecho, os movimentos exclusivos, as prioridades de movimentos em cada cruzamento, a localização dos sistemas de redução de velocidade e o funcionamento de cada rua. Além disso, a região apresenta o funcionamento de um semáforo, portanto, entrou-se em contato com o Departamento de Trânsito de Joinville (DETRANS) para aquisição do ciclo semafórico.

O fluxo de veículo foi configurado com as informações de uma contagem volumétrica classificatória, realizada pela Secretaria de Pesquisa e Planejamento Urbano (SEPUR). A pesquisa realizada forneceu como dados a quantidade, a classificação e as rotas realizadas para os automóveis, as motos e os caminhões na região.

Além disso, o transporte público atual da região foi adquirido com as informações disponibilizadas no site da empresa responsável. Dentro do site está disponibilizado os itinerários, os horários de saída programados para cada uma das viagens de cada linha e a localização dos pontos de parada dos ônibus e a definição da plataforma de embarque e desembarque no terminal.

A estimativa das emissões de poluentes dos veículos necessitou das informações relacionadas a tecnologia existente em cada um dos veículos, portanto, realizou-se a classificação dos veículos registrados na cidade. O registro disponibilizado pela Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN) tem como informação disponível os modelos dos veículos e os anos de fabricação, portanto, foi possível classificar nas respectivas normas regulatórias aplicadas no Brasil.

A calibração da simulação utilizou como métrica o tempo médio de viagem necessário para realizar o deslocamento na rota com maior comprimento e maior presença de interferências. A coleta em campo foi realizada em dias típicos com um vehicle probe, com o propósito de diminuir a diferença entre a realidade e representação da simulação.

O Quadro 1 demonstra as informações utilizadas para o desenvolvimento da microsimulação de tráfego do cenário atual e a origem dos dados.

Quadro 1 – Informações utilizadas na simulação e a origem dos dados

Informações	Origem dos dados
Tempo Semafórico	Fornecido pelo DETRANS no formato de planilha eletrônica no dia 19/04/2023
Transporte Público	Site da empresa responsável acessado no dia 13/04/2023
Contagem de Tráfego	Fornecido pela SEPUR no formato de planilha eletrônica no dia 20/01/2023
Registro dos Veículos	Secretaria Nacional de Trânsito acessado no dia 31/03/2023
Infraestrutura da Região	Coleta em campo nos dias 18/03/2023 e 19/03/2023 Google Maps e OpenStreetMap acessado no dia 13/03/2023
Tempo de Viagem	Coleta em campo nos dias 19/04/2023 e 25/04/2023

Fonte: Autor (2023).

3.3. MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DA MICROSSIMULAÇÃO

A modelagem da simulação que representa o funcionamento atual da região, permite analisar o impacto positivo ou negativo da implementação de alterações viárias e da evolução das tecnologias da frota. Essa ferramenta computacional permite analisar o tempo de viagem, a velocidade dos veículos, o tempo parado e o atraso, responsáveis pela concentração das emissões de poluentes veiculares nas áreas urbanas.

A elaboração da simulação começou com a utilização de uma função de exportar os dados disponibilizados no OpenStreetMap. A malha viária obtida tem como informação a posição e os respectivos comprimentos das vias, a formatação dos cruzamentos, a posição do semáforo, o número de faixas de tráfego em cada sentido, a velocidade permitida e as prioridades das ruas.

O mapa exportado apresentou divergências em relação a informações observadas em campo, portanto, realizou-se um aperfeiçoamento da rede. As correções necessárias realizadas estão ligadas com o posicionamento das faixas exclusivas de conversão, a velocidade permitida em cada trecho, a faixa exclusiva de entrada dos ônibus no terminal, a posição dos sistemas de redução de velocidade, os movimentos proibidos nos cruzamentos e o ciclo semaforico.

A região apresenta a passagem do sistema ferroviário, entretanto na simulação do comportamento atual da região não foi considerado a operação do trem de carga. Essa escolha foi necessária pela falta de informação disponibilizada sobre a operação e os horários de passagem do trem, dificultando a aquisição de uma métrica para a calibração.

O aprimoramento da representação da região seguiu para a configuração da infraestrutura utilizada na operação do transporte público. Os detalhamentos foram aplicados no terminal com a configuração da velocidade permitida, do número de faixas, dos movimentos internos e das posições de embarque e desembarque dos passageiros. Além disso, considerou-se um limite na velocidade na faixa exclusiva para a entrada no terminal e uma prioridade máxima para os ônibus na saída do terminal.

A finalização da infraestrutura, encaminhou a simulação para a configuração do fluxo de veículos que percorrem a área. A contagem volumétrica classificatória de veículos utilizada foi uma adaptação de um estudo na cidade no mês de junho do ano

de 2019, onde foi realizado uma contagem de tráfego em treze cruzamentos no horário de pico da manhã e da tarde na região sul da cidade.

Essa pesquisa foi realizada numa região extensa que contém o local escolhido para o trabalho. O que possibilita separar somente as rotas, as quantidades e os tipos de veículos que estão se deslocando na área definida como objeto de estudo.

A contagem disponibilizada pela SEPUR permitiu elaborar um fluxo de veículos habitual, entretanto a pesquisa fornecida não considerou a contagem dos ônibus particulares e nem do transporte público passando na região. Essa falta de informações fez necessário considerar somente a passagem do transporte público que está em circulação atualmente.

O funcionamento do transporte público foi considerado com uma operação em que todas as viagens vão realizar paradas em todos os pontos de ônibus que estão presentes em sua rota. Além disso, considerou-se que somente a primeira viagem de cada linha vai seguir fielmente a tabela de horários, portanto, usando da distribuição de tempo de saída padrão do software de simulação para completar o número de viagens programadas.

A distribuição das tecnologias é necessária para quantificar as emissões de poluentes, entretanto não existe um levantamento prévio da informação, logo, elaborou-se uma representação da frota utilizando como base os veículos registrados pelo SENATRAN. A distribuição da tecnologia responsável pela emissão de poluentes da frota, seguiu premissas que buscam possibilitar o estudo e aproximar a simulação com a situação cotidiana da cidade.

Neste contexto, considerou-se que somente veículos registrados no município de Joinville realizaram deslocamentos na região de estudo e que não será considerado o movimento de máquinas agrícolas e de máquinas de construção civil durante o período simulado. Além disso, os veículos estão com o funcionamento e a calibração de fábrica, portanto, seguindo corretamente as normas reguladoras PROCONVE e PROMOT.

A separação começou com a categorização dos modelos de veículos registrados em automóveis, motos, caminhões e ônibus. A categoria e a informação do ano de fabricação possibilitam identificar as respectivas normas responsáveis pela regulamentação das quantidades de emissões de poluentes dos veículos no Brasil.

O modelo escolhido para a estimativa das emissões de poluentes dos veículos automotores foi o HBEFA. Essa modelagem matemática está implementada no

software de simulação, entretanto a ferramenta estima as emissões com base na regulamentação europeia, portanto, tornou-se necessário realizar uma equivalência entre as normas PROCONVE e PROMOT para as normas EURO.

A definição das proporções das tecnologias encontradas nos veículos, possibilitou continuar com a configuração da frota, distribuindo as categorias de veículos nos modelos matemáticos que representam as normas EURO, viabilizando estimar a quantidade de poluentes no cenário atual. Além disso, alterou-se os atributos dos veículos como o comprimento dos veículos e a velocidade máxima, considerando como comportamento dos motoristas que nenhum motorista ultrapassa o limite de velocidade e nem o sinal vermelho do semáforo.

A microssimulação de tráfego possibilita representar a infraestrutura e o comportamento do tráfego de uma região, necessitando passar pelo processo de calibração, constituindo-se na realização de comparações entre a representação e a realidade, com a intenção de identificar a veracidade e a confiabilidade. Escolheu-se utilizar como métrica uma comparação entre o tempo médio de viagem encontrado na simulação com o tempo médio de viagem coletado em campo, considerando a rota que apresenta o maior número de conflitos (VILARINHO, 2018).

O valor real foi obtido pela média dos valores encontrados na coleta de campo realizada em dias típicos, sem o acontecimento de feriados próximos, acidentes e chuva durante a coleta, respeitando as leis de trânsito e a prioridade estabelecida pela pirâmide inversa do tráfego em vias urbanas durante as passagens. O levantamento foi realizado para cada um dos sentidos da rota e para cada um dos horários de pico (DNIT, 2006).

Os resultados encontrados na simulação do cenário atual da região utilizado para a calibração seguiram a aplicação de um tempo de aquecimento de quinze minutos para o carregamento do sistema e a média de dez rodadas, utilizando do sistema de sementes aleatórias para criar cenários distintos. Essas considerações têm o intuito de evitar a influência de cenários com valores atípicos e aumentar a confiança da modelagem (DOWLING; SKABARDONIS; ALEXIADIS, 2004; VILARINHO, 2008).

A calibração inicial apresentou um erro que ultrapassa a margem de precisão de dez por cento estipulado para a região no tempo médio de viagem, portanto, levando a realizar uma verificação completa na infraestrutura, encontrando ajustes necessários na modelagem das velocidades, nos movimentos realizados pelos

veículos e na configuração da lombada e da faixa de pedestre elevada (HOLLANDER; LIU, 2008). As correções não conseguiram fazer o erro entrar na margem estipulada, entretanto observou-se que os veículos estavam demorando para realizar a rota nos dois sentidos.

A observação do acontecimento abriu a necessidade de buscar alternativas para melhorar o tempo de viagem. Essa situação abriu a oportunidade de analisar o impacto da alteração do comportamento dos motoristas na calibração da microssimulação, seguindo como modelagem inicial os valores e os modelos padrões do software.

A modelagem comportamental escolhida para calibrar é a de car-following, utilizando o modelo adaptado de Krauss, escolhendo como variável o valor de sigma, responsável pela quantificação da proficiência do motorista em manter a velocidade desejada. A alteração do valor padrão permitiu observar que a modificação do comportamento de 0,5 para 0,3 diminuiu significativamente a diferença encontrada entre a representação e a realidade (KANAGARAJ, 2013).

3.4. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

A finalização da modelagem e da calibração da microssimulação de tráfego do cenário atual, permitiu uma observação detalhada do comportamento dos veículos no trânsito, possibilitando a elaboração de implementações propostas para reduzir os congestionamentos, o atraso, o tempo parado e as emissões de poluentes provenientes dos veículos.

Os cenários propostos estão separados em modificações na infraestrutura, na atualização da tecnologia encontrada na frota da cidade e no funcionamento do sistema ferroviário que está presente na região.

A elaboração dos cenários propostos tem como consideração buscar analisar soluções para a problemática apresentada, portanto, desconsiderando questões políticas e econômicas que inviabilizam qualquer alteração na região de estudo.

O primeiro cenário representa a situação atual com o incremento da operação do trem passando durante o horário de pico da manhã e da tarde, possibilitando verificar o impacto que o sistema ferroviário de carga causa no fluxo de veículos e nas emissões de poluentes dos veículos, entretanto não foi considerado o resultado proveniente do veículo definido como o trem de carga na simulação.

O segundo cenário é a implementação de uma rotatória com uma faixa de rodagem no cruzamento entre a Rua Monsenhor Gercino, a Rua João da Costa Júnior e a Rua Fátima, que atualmente tem o funcionamento de um semáforo. A alteração na infraestrutura tem como interesse diminuir o número de conflitos no fluxo de veículos, os congestionamentos, o atraso e o tempo parado no trânsito, que estão relacionados com a concentração das emissões de poluentes (DNIT, 2005).

O terceiro cenário é a configuração de um binário, utilizando da transformação da infraestrutura existente de vias de sentido duplo próximas para vias de sentido únicos, com o intuito de melhorar o fluxo de veículos, aumentando a velocidade na via e diminuindo o número de conflitos existente, entretanto aumentando a distância percorrida, transformando a Rua Fátima em sentido único sul/norte e a Rua Elpídio Lemos e a Rua Agulhas Negras em sentido único norte/sul (TEIXEIRA et al., 2015).

A simulação considerou que os veículos vão continuar na área e seguiram para o mesmo destino utilizando a nova configuração, necessitando organizar os fluxos, alocando a origem na Rua Agulhas Negras e o destino na Rua Fátima, mantendo a mesma quantidade de veículos utilizando a região.

O quarto, quinto e sexto cenário são as atualizações das tecnologias encontradas nos veículos no cenário atual, com o propósito de quantificar o impacto da evolução nas tecnologias e regulamentações responsáveis pelas emissões de poluentes, seguindo um método de efetuar atualizações em etapas, mostrando o ganho que os novos veículos têm em relação aos antigos para o meio ambiente.

O quarto cenário representa a transformação da frota que utiliza a tecnologia da norma EURO 1 em veículos que seguem a norma EURO 2.

O quinto cenário realiza a atualização dos veículos da norma EURO 1 e EURO 2 para veículos com a tecnologia exigida pela norma EURO 3.

O sexto cenário segue o mesmo conceito dos cenários anteriores, entretanto no Brasil para os caminhões e ônibus, optou-se em seguir diretamente para a norma que está equivalente à norma EURO 5 e para os automóveis ainda não é regulamentado uma norma equivalente a EURO 4. Essa situação estabeleceu a necessidade de seguir a atualização da frota de veículos para a regulamentação da norma EURO 5.

O sétimo cenário é a combinação do cenário com a passagem do trem no horário de pico da manhã e da tarde com a atualização da frota de veículos da cidade para as tecnologias necessárias para seguir as normas EURO 5. Esse cenário tem o

intuito de observar se a atualização da frota consegue mitigar as emissões de poluentes causadas pela passagem do trem de carga na região.

O oitavo e o nono cenário representam a combinação da implementação da rotatória e do binário separadamente com a atualização da frota de veículos da cidade para as normas EURO 5. Esses cenários foram criados para identificar o melhor cenário para a região e analisar a diferença que as alterações viárias têm com a atualização da frota.

3.5. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

As análises dos resultados seguem o conceito de realizar comparações entre a representação da situação atual da região e os cenários propostos. Esses valores encontrados possibilitaram observar o impacto positivo ou negativo da passagem do trem de carga, das implementações de mudanças viárias e das atualizações das tecnologias exigidas pelas normas reguladoras das emissões de poluentes dos veículos.

Os indicadores escolhidos para a comparação dos cenários são o tempo de viagem, a velocidade, o atraso, o tempo parado, o combustível utilizado, o comprimento das rotas e a quantidade propagada de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e material particulado. Esses indicadores seguiram como métrica a média de todas as viagens finalizadas no período da manhã e no período da tarde, possibilitando encontrar um valor único para quantificar o impacto dos cenários propostos no fluxo de veículos, nas emissões e no gasto de combustível.

A finalização do detalhamento da metodologia que será utilizada para este trabalho, possibilitou seguir para o próximo capítulo com a apresentação do cenário atual e dos cenários propostos, demonstrando os dados e as considerações utilizadas para a confecção das simulações e os resultados obtidos com a utilização do pacote de microssimulação de tráfego.

A região tem a presença da unidade de pronto atendimento 24 horas do sul, da Escola Municipal João Costa, da Escola Municipal Professor Oswaldo Cabral e de diversos estabelecimentos de comércio e serviço. Essa concentração de estabelecimentos aumenta a quantidade de movimentos realizados por veículos, pedestres e bicicletas na região.

A área reúne as crianças das escolas, as pessoas necessitadas que estão utilizando o pronto atendimento, a passagem do sistema ferroviário de carga e o intenso deslocamento de veículos. Essa situação propicia um cenário preocupante da exposição dos pedestres, ciclistas e dos motoristas aos poluentes dos veículos parados nos congestionamentos, aumentando a quantidade e a concentração de poluentes absorvidos pelas pessoas.

A situação é agravada pela localização da unidade de pronto atendimento situada no cruzamento entre a Rua Monsenhor Gercino, a Rua João da Costa Júnior e a Rua Fátima com o funcionamento de um semáforo, a passagem do trilho do trem e o constante fluxo de ônibus e caminhões, expondo as pessoas com problemas de saúde a uma concentração de poluentes. Além disso, a Rua Monsenhor Gercino é conhecida na cidade pelo elevado índice de acidentes e de congestionamentos.

4.2. MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL

A modelagem do tráfego do cenário atual começou definindo que o software utilizado como ferramenta para a modelagem é a versão 1.16.0. do Eclipse SUMO, que tem como finalidade a representação microscópica de tráfego e a simulação de grandes redes de transporte. Esse simulador tem a possibilidade de representar os deslocamentos intermodais e quantificar os impactos positivos ou negativos de cenários propostos (LOPEZ et al., 2018).

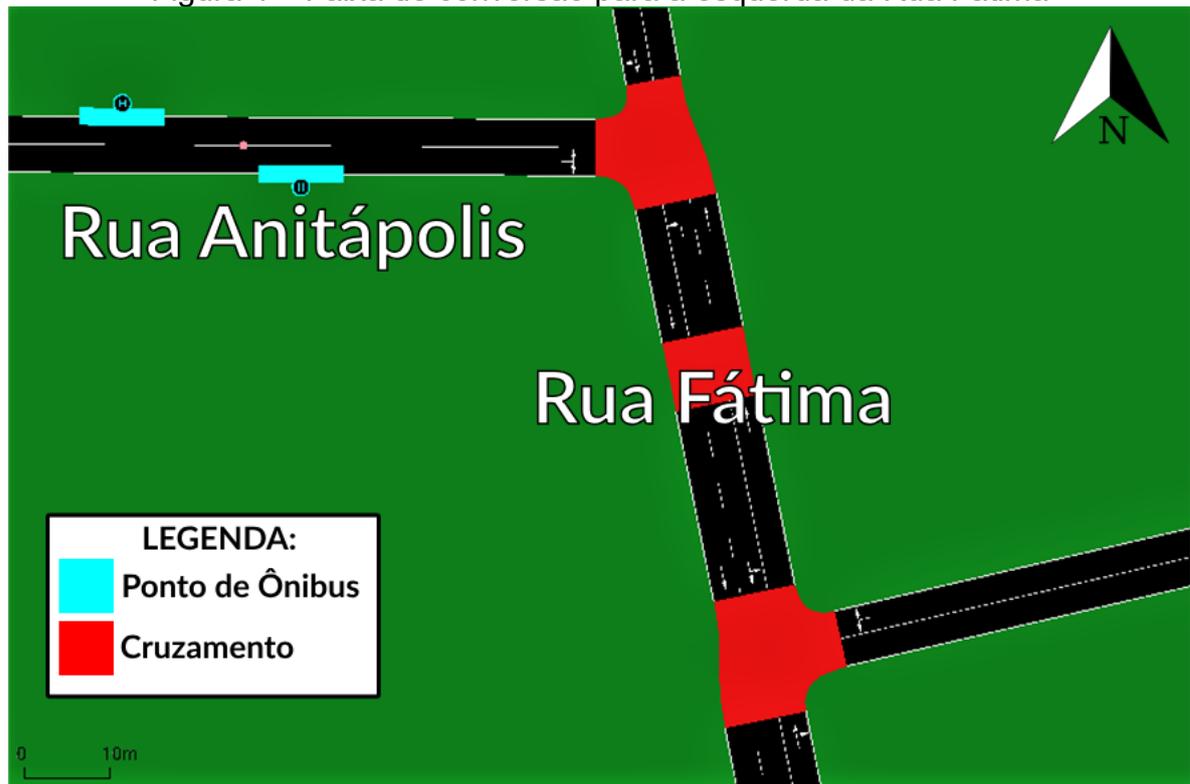
O processo de configuração do cenário atual da região iniciou com a elaboração da infraestrutura, com a utilização da função de exportação do mapa do site OpenStreetMap, possibilitando adquirir uma estrutura base inicial da região, informando sobre as vias a posição geográfica, os nomes, os cruzamentos, o número de faixa em cada sentido, a prioridade nos movimentos, a velocidade permitida, a presença do sistema semafórico, a faixa exclusiva de ônibus e as movimentações internas da terminal do Itaum.

A rede exportada apresentou divergências com a situação observada em campo e no Google Maps, sendo assim, necessitando realizar os ajustes e considerações na modelagem. O ajuste da infraestrutura na simulação começou com a remoção dos espaços internos dos comércios, das ruas que estão fora da região definida, das ciclofaixas, dos caminhos para os pedestres e do trilho do trem que não é considerado parte do cenário atual.

A definição das principais infraestruturas da região encaminhou a modelagem para a etapa do detalhamento da rede, iniciando a implementação das faixas exclusivas de conversão, possibilitando configurar todos os movimentos dos cruzamentos e as prioridades.

A Figura 4 apresenta a faixa de conversão para a esquerda da Rua Fátima para a Rua Anitápolis.

Figura 4 – Faixa de conversão para a esquerda da Rua Fátima

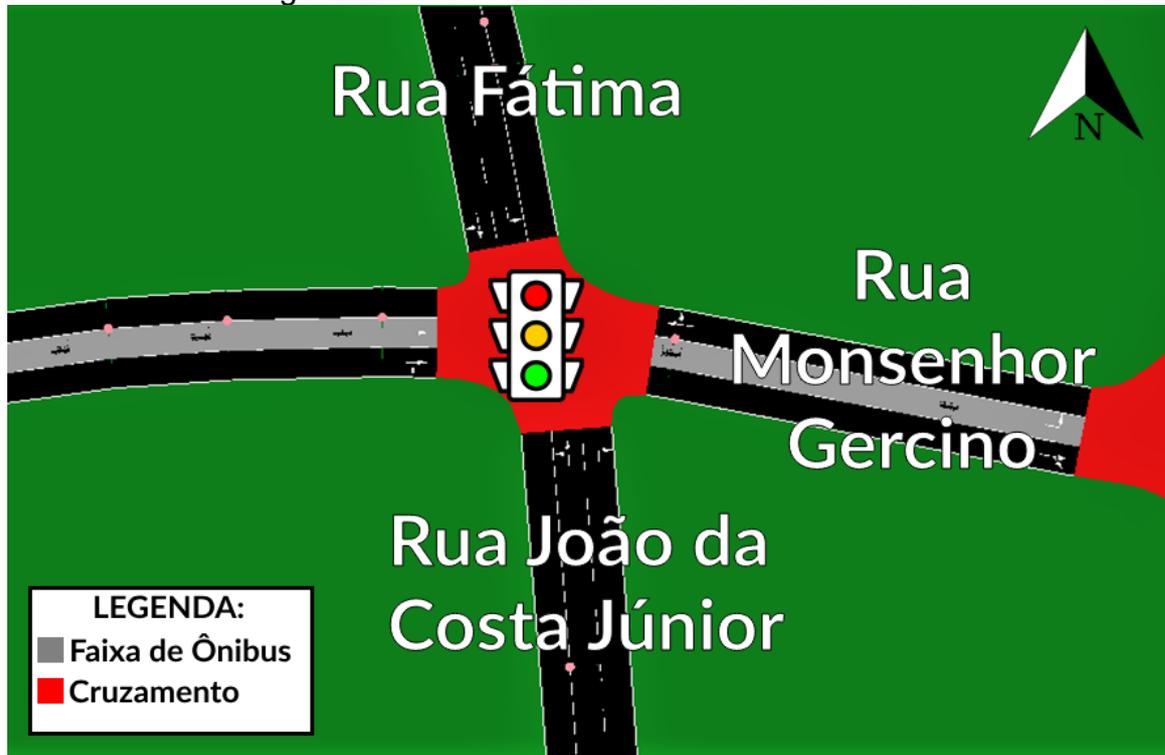


Fonte: Autor (2023).

A Figura 5 apresenta a localização da faixa de conversão para a direita da Rua João da Costa Júnior para a Rua Monsenhor Gercino e da faixa de conversão para a esquerda da Rua Fátima para a Rua Monsenhor Gercino, a posição da faixa

exclusiva para o transporte público entrar no terminal, as proibições de movimento na Rua Monsenhor Gercino e a localização do semáforo.

Figura 5 – Faixas de conversão no cruzamento



Fonte: Autor (2023).

As informações sobre os semáforos da cidade foram disponibilizadas pelo DETRANS, detalhando o semáforo localizado no cruzamento entre a Rua Monsenhor Gercino, a Rua João da Costa Júnior e a Rua Fátima, com o total de quatro estágios.

O Quadro 2 identifica os movimentos de cada estágio e o tempo de verde em segundos, considerando o resto do tempo de ciclo para as fases de amarelo e vermelho geral para o semáforo em funcionamento atualmente na região.

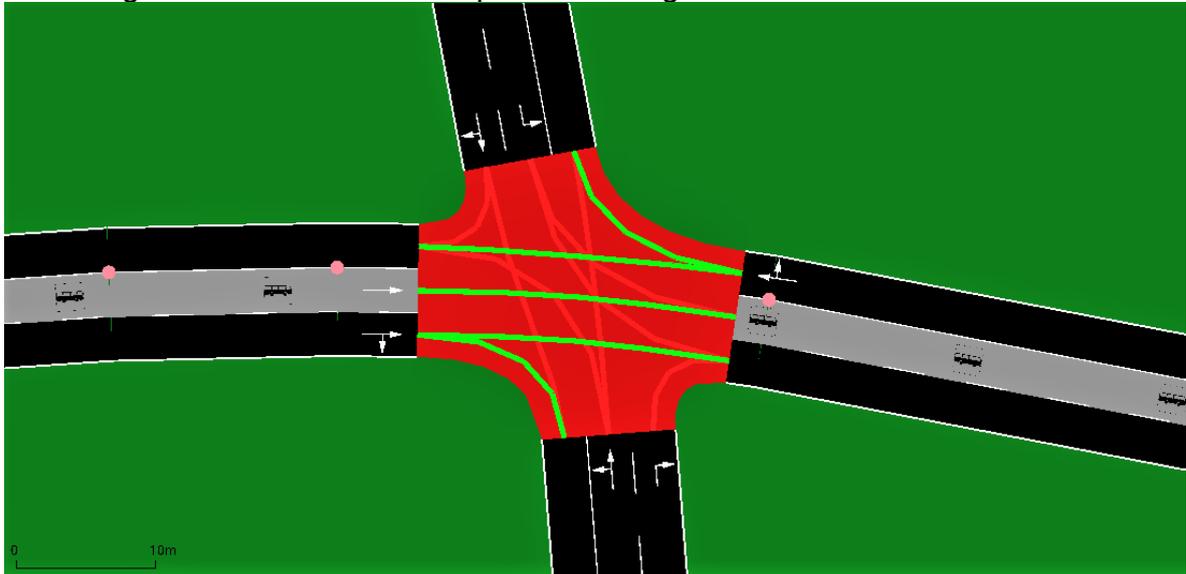
Quadro 2 – Configuração do semáforo no cenário atual

Movimento do estágio	Tempo de Verde	
	Manhã	Tarde
Veicular Rua Monsenhor Gercino	30	35
Pedestre Geral	10	10
Veicular Rua Fátima	20	22
Veicular Rua João da Costa Júnior	18	16
Tempo total de ciclo	95	100

Fonte: Adaptado do DETRANS (2023).

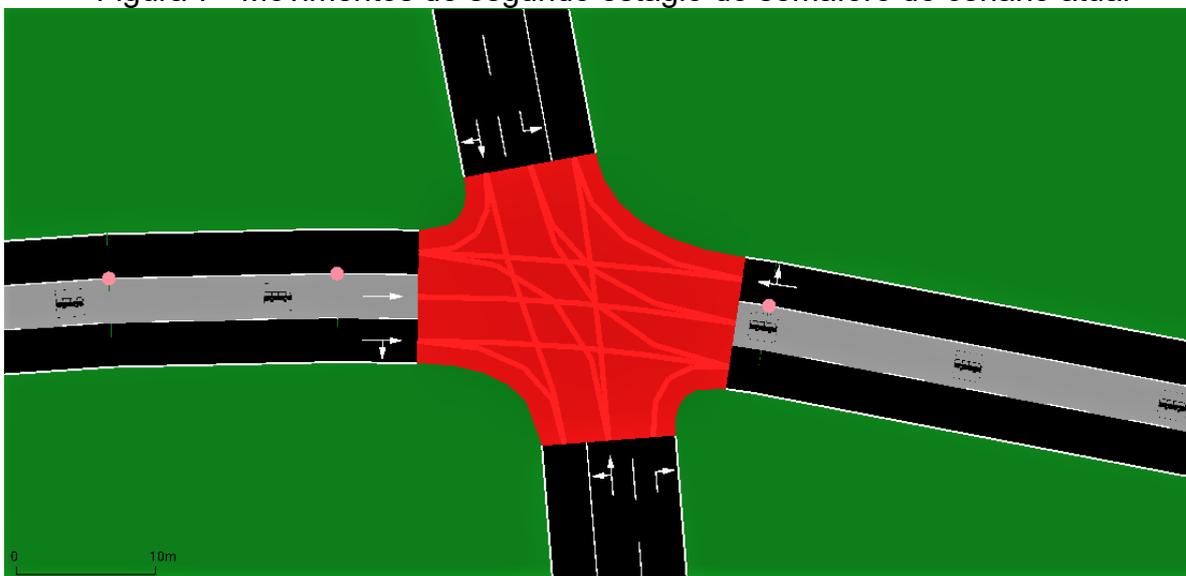
A Figura 6 mostra os movimentos permitidos no primeiro estágio do semáforo do cenário atual, a Figura 7 no segundo, a Figura 8 no terceiro e a Figura 9 do quarto.

Figura 6 – Movimentos do primeiro estágio do semáforo do cenário atual



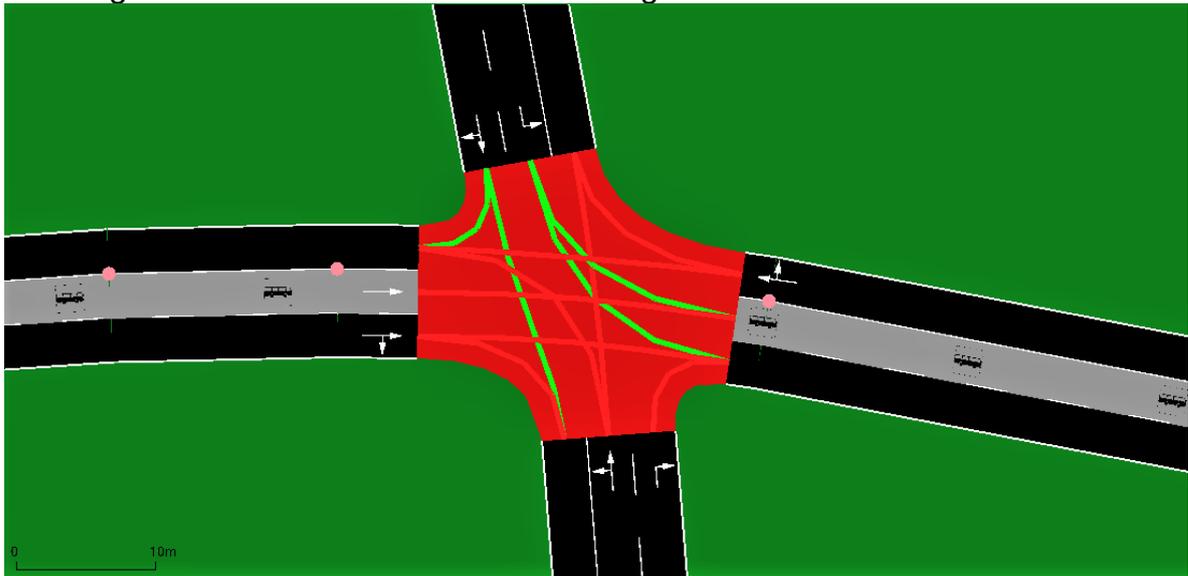
Fonte: Autor (2023).

Figura 7– Movimentos do segundo estágio do semáforo do cenário atual



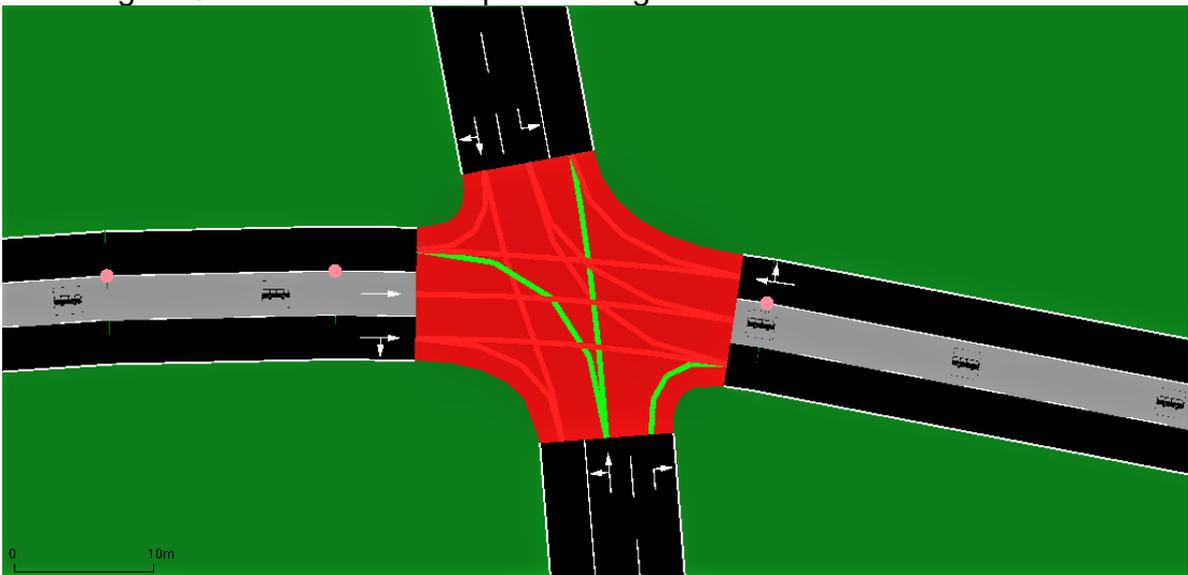
Fonte: Autor (2023).

Figura 8 – Movimentos do terceiro estágio do semáforo do cenário atual



Fonte: Autor (2023).

Figura 9 – Movimentos do quarto estágio do semáforo do cenário atual



Fonte: Autor (2023).

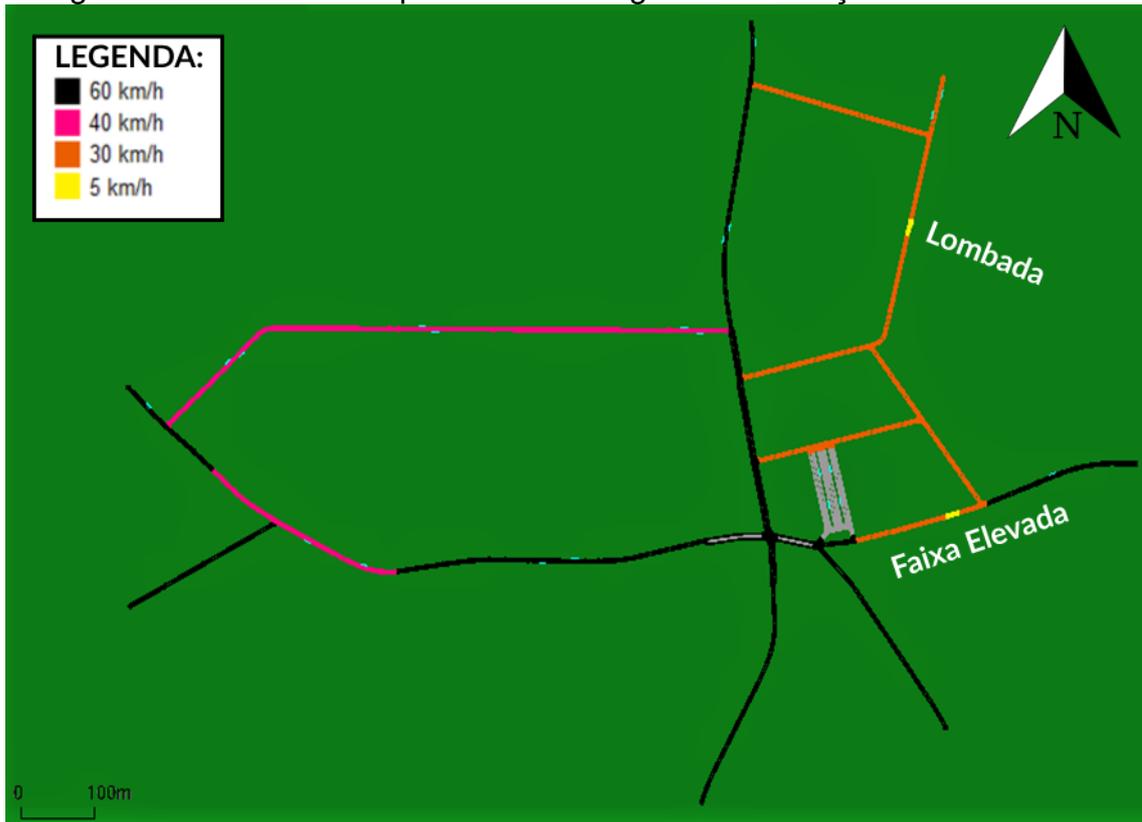
A região tem a presença de uma faixa elevada para a travessia dos pedestres localizada na Rua Monsenhor Gercino na frente da Paróquia Nossa Senhora de Fátima e uma lombada localizada na Rua Agulhas Negras.

As infraestruturas mencionadas não são implementadas como opção de configuração no software, portanto, considerou-se simular o comportamento dos motoristas adicionando nas localizações dos obstáculos uma extensão de cinco metros de via com a velocidade limitada de 5 km/h, buscando representar a desaceleração dos veículos e a necessidade de parada pela interferência dos

pedestres, possibilitando observar os impactos sobre o sistema (AMANCIO et al., 2023).

A Figura 10 apresenta as velocidades permitidas para cada segmento das ruas no cenário atual, a posição da faixa elevada de pedestres e da lombada utilizadas na simulação em amarelo.

Figura 10 – Velocidades permitidas na região e localização dos obstáculos

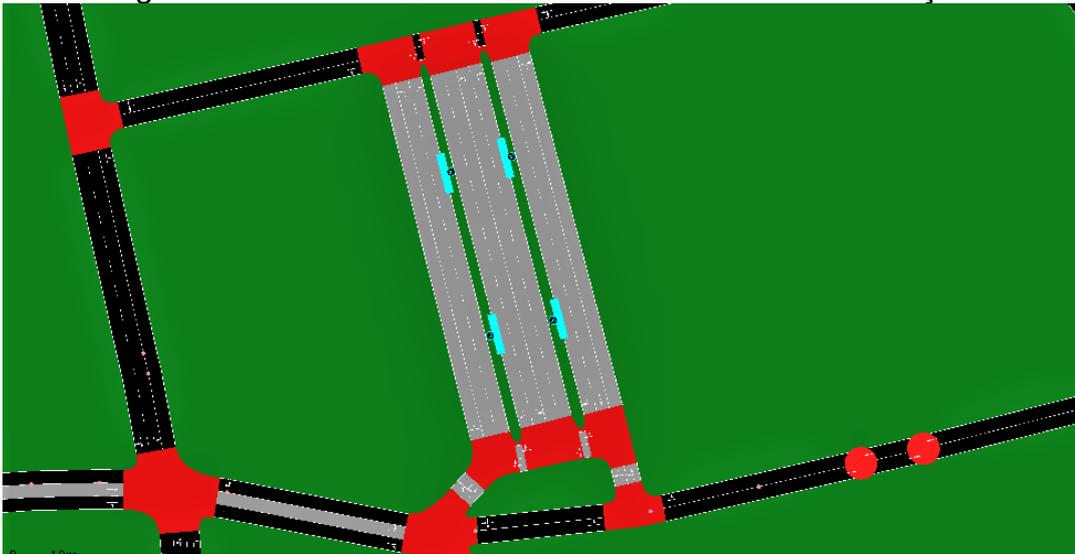


Fonte: Autor (2023).

A infraestrutura do transporte público seguiu com a modelagem do posicionamento dos pontos de embarque e desembarque, no número de faixas, nos movimentos e na velocidade de 10 km/h no terminal e na configuração de limitar a velocidade da faixa exclusiva do ônibus para 40 km/h, conforme é combinado pela empresa responsável pela operação e a fiscalização da prefeitura, buscando aumentar a segurança para os pedestres e ciclistas da cidade.

A Figura 11 apresenta os pontos de embarque e desembarque e as entradas e saídas do terminal, que estão na Rua Monsenhor Gercino e Rua Maria Júlia Pereira da Costa.

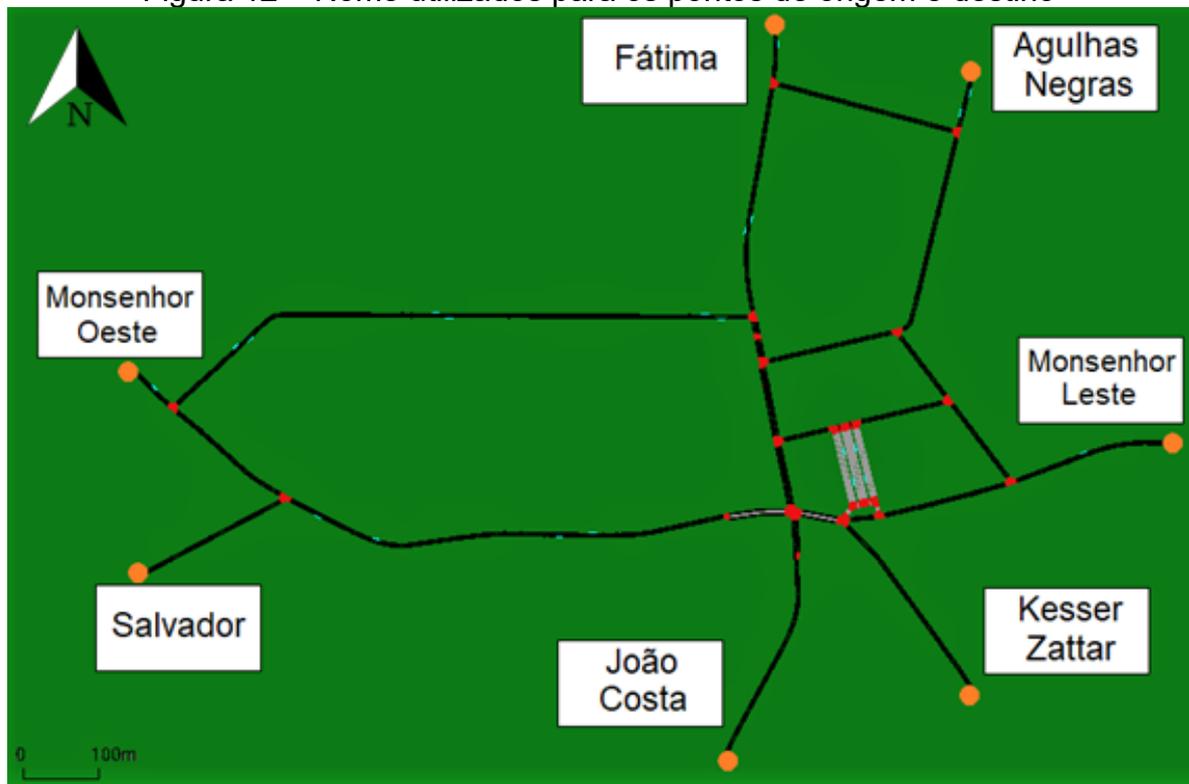
Figura 11 – Infraestrutura do terminal do Itaum na simulação



Fonte: Autor (2023).

A Figura 12 apresenta os nomes utilizados para identificação da localização das entradas e saídas dos veículos na região.

Figura 12 – Nome utilizados para os pontos de origem e destino



Fonte: Autor (2023).

O fluxo de veículos utilizado para o trabalho seguiu como base um estudo realizado em junho de 2019 disponibilizado pela SEPUR, que realizou uma contagem

volumétrica classificatória de tráfego em treze cruzamentos distribuídos pela Rua Monsenhor Gercino e pela Rua Florianópolis no horário de pico da manhã e no horário de pico da tarde, permitindo identificar as rotas, as quantidades e os tipos de veículos que circulam pela região.

A pesquisa tinha como área de estudo a movimentação da Rua Monsenhor Gercino e pela Rua Florianópolis, fazendo o entorno do terminal do Itaum ser contemplada nas contagens, portanto, possibilitando realizar uma filtragem para adquirir as informações necessárias para a realização da simulação da área escolhida para este trabalho.

O Quadro 3 mostra as origens, os destinos e as quantidades de veículos de cada categoria no período da manhã e o Quadro 4 mostra para o período da tarde.

Quadro 3 – Fluxo de veículos da manhã

Origem	Destino	Automóveis	Motos	Caminhões
Monsenhor Oeste	Salvador	143	10	1
	João Costa	78	6	2
	Monsenhor Leste	242	7	2
	Fátima	27	2	1
	Agulhas Negras	21	2	1
Salvador	Monsenhor Oeste	38	3	0
	João Costa	23	2	1
	Monsenhor Leste	35	2	1
	Fátima	16	1	0
	Agulhas Negras	5	1	1
João Costa	Monsenhor Oeste	139	8	2
	Salvador	17	4	1
	Monsenhor Leste	77	7	2
	Fátima	28	2	0
	Agulhas Negras	13	2	0
Monsenhor Leste	Monsenhor Oeste	482	13	2
	Salvador	67	8	1
	João Costa	45	5	1
	Fátima	120	10	1
	Agulhas Negras	39	3	1
Fátima	Salvador	52	3	1
	João Costa	69	3	2
	Monsenhor Leste	81	3	0
Agulhas Negras	Monsenhor Oeste	22	2	0
	Salvador	38	5	1
	João Costa	45	3	0
	Monsenhor Leste	79	4	2

Fonte: Autor (2023).

Quadro 4 – Fluxo de veículos da tarde

Origem	Destino	Automóveis	Motos	Caminhões
Monsenhor Oeste	Salvador	188	8	2
	João Costa	178	5	1
	Monsenhor Leste	403	3	1
	Fátima	71	10	1
	Agulhas Negras	50	9	1
Salvador	Monsenhor Oeste	21	5	1
	João Costa	7	10	0
	Monsenhor Leste	29	12	2
	Fátima	9	7	1
	Agulhas Negras	15	8	0
João Costa	Monsenhor Oeste	76	11	1
	Salvador	19	3	0
	Monsenhor Leste	57	11	1
	Fátima	27	7	1
	Agulhas Negras	19	7	0
Monsenhor Leste	Monsenhor Oeste	361	9	2
	Salvador	30	7	0
	João Costa	34	7	0
	Fátima	69	6	1
	Agulhas Negras	42	5	0
Fátima	Salvador	18	3	0
	João Costa	101	15	2
	Monsenhor Leste	56	4	0
Agulhas Negras	Monsenhor Oeste	12	2	0
	Salvador	20	3	0
	João Costa	23	6	0
	Monsenhor Leste	32	1	1

Fonte: Autor (2023).

O filtro dos dados da pesquisa realizada pela SEPUR identificou que para a região do terminal do Itaum no período da manhã das 6h às 7h tem o deslocamento de 2041 automóveis, 121 motos e 27 caminhões e no período da tarde das 17h às 18h tem o deslocamento de 1967 automóveis, 184 motos e 19 caminhões. A contagem realizada não considerou a passagem de ônibus, com isso, foi escolhido para a simulação considerar somente a passagem do transporte público em funcionamento atualmente na região.

O transporte público seguiu como estrutura a definição do número de viagens que vão ser realizadas durante o horário de pico da manhã e da tarde, a origem nas ruas ou no local de embarque, o destino nas ruas ou no terminal e os pontos de parada das linhas, considerando que todas as viagens dos ônibus vão realizar paradas em todos os pontos com a duração de doze segundos e no local de desembarque uma

parada de um minuto antes de sair da simulação ou seguir seu destino, buscando representar a inconsistência do tempo das paradas de uma forma constante (ARHIN et al., 2016).

O Quadro 5 e Quadro 6 demonstram as linhas, os nomes e o número de viagens realizadas no total, considerando as saídas e as entradas no terminal no período da manhã e no período da tarde.

Quadro 5 – Transporte público da manhã

Linha	Nome	Viagens
110	Sul / Guanabara via Itaum	3
111	Itaum / Sul via João Ramalho	2
112	Sul / Itaum	1
121	Itaum / Guanabara via Agulhas Negras	1
300	Itaum / Centro	19
302	Itaum / Centro via Anitápolis	2
304	Itaum / Centro via Procópio Gomes	17
1206	Estevão de Matos	5
1209	Jardim Edilene	1
1215	Rua Colombo	1
1220	Paranaguamirim	2
1222	Circular Guarani	3
1230	Paranaguamirim via Monsenhor Gercino	1
6000	Norte/Itaum	4
Total		62

Fonte: Autor (2023).

Quadro 6 – Transporte público da tarde

Linha	Nome	Viagens
110	Sul / Guanabara via Itaum	3
111	Itaum / Sul via João Ramalho	2
121	Itaum / Guanabara via Agulhas Negras	2
300	Itaum / Centro	12
302	Itaum / Centro via Anitápolis	9
304	Itaum / Centro via Procópio Gomes	9
1206	Estevão de Matos	8
1209	Jardim Edilene	1
1220	Paranaguamirim	1
1222	Circular Guarani	2
1223	Morro do Amaral via Jardim Edilene	2
6000	Norte/Itaum	5
Total		56

Fonte: Autor (2023).

A linha Paranaguamirim e Paranaguamirim via Monsenhor Gercino tem seu itinerário passando pela Rua Kesser Zattar, portanto, fez necessário considerar a

infraestrutura para o funcionamento da operação do transporte público, entretanto nas visitas em campo observou-se que a rua não apresenta fluxo de veículos significativo, com isso, utilizando a via somente para a passagem dos ônibus.

A definição dos fluxos de veículos encaminhou o desenvolvimento da simulação para a distribuição das normas que regulamentam as emissões de poluentes dos veículos, utilizando como base os dados disponibilizados pelo SENATRAN. Esses dados tem como informação a quantidade, o modelo e o ano de fabricação dos veículos registrados no mês de dezembro de 2022 para todo o Brasil, necessitando filtrar os dados para a cidade de Joinville.

O passo a passo seguiu com um trabalho manual de identificar todos os modelos de veículos existentes na cidade para realizar a separação em automóveis, motos, caminhões e ônibus. A separação dos veículos finalizada apresentou que 442653 veículos são categorizados como emissores de poluentes do total de 463136 veículos registrado na cidade, possibilitando observar que existem um total de 23969 combinações entre modelos e anos de fabricação.

A informação da classificação dos veículos e do ano de fabricação, permitiu distribuir os veículos nas respectivas regulamentações. O levantamento da equivalência das regulamentações das normas PROCONVE e PROMOT para as regulamentações das normas EURO, mostrou que no Brasil as normativas para os caminhões e para os ônibus começaram a ser equivalente no ano de 2000 e que se optou por não implementar a EURO 4 para seguir diretamente para a EURO 5.

A regulamentação das motos começou com a equivalência no ano de 2002, seguindo uma conversão direta com as normativas europeias. Os automóveis começaram somente no ano de 2005 seguindo diretamente para a norma EURO 2 e atualmente existe regulamentação com equivalência até a norma EURO 3.

O Quadro 7 demonstra a distribuição das porcentagens das normas EURO encontradas na frota de Joinville.

Quadro 7 – Distribuição das normas EURO em Joinville

Veículo	Sem Classificação	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5
Automóveis	31%	0%	42%	27%	0%	0%
Motos	18%	18%	19%	25%	20%	0%
Caminhões	35%	3%	10%	20%	0%	32%
Ônibus	13%	2%	18%	29%	0%	38%

Fonte: Autor (2023).

A cidade tem o registro de veículos fabricados no ano de 1927, ocasionando uma diversidade de tecnologias encontradas nos veículos sem regulamentação equivalente até a chegada do ano de 2005. Neste contexto, necessitou considerar que os veículos antigos não estão em circulação ou estão próximos de entrar na primeira regulamentação, possibilitando agrupar a distribuição na normativa EURO 1.

O Quadro 8 demonstra a distribuição das porcentagens das normas EURO utilizadas para a modelagem do cenário atual da região.

Quadro 8 – Distribuição considerada no cenário atual

Veículo	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5
Automóveis	31%	42%	27%	0%	0%
Motos	36%	19%	25%	20%	0%
Caminhões	38%	10%	20%	0%	32%
Ônibus	15%	18%	29%	0%	38%

Fonte: Autor (2023).

A estimativa da quantidade de poluentes necessita da configuração das distribuições das tecnologias nos veículos com a aplicação de uma categoria, considerando como modelo de emissões o HBEFA v4.2. O Quadro 9 identifica os modelos utilizados para cada tipo de veículo e para cada norma EURO.

Quadro 9 – Modelos utilizados para quantificar as emissões

Veículo	Norma	Modelo
Automóveis	EURO 1	PC_petrol_Euro-1
	EURO 2	PC_petrol_Euro-2
	EURO 3	PC_petrol_Euro-3
	EURO 5	PC_petrol_Euro-5
Motos	EURO 1	MC_4S_1e250cc_Euro-1
	EURO 2	MC_4S_1e250cc_Euro-2
	EURO 3	MC_4S_1e250cc_Euro-3
	EURO 4	MC_4S_1e250cc_Euro-4
	EURO 5	MC_4S_1e250cc_Euro-5
Caminhões	EURO 1	RT_gt14-20t_Euro-I
	EURO 2	RT_gt14-20t_Euro-II
	EURO 3	RT_gt14-20t_Euro-III
	EURO 5	RT_gt14-20t_Euro-V_EGR
Ônibus	EURO 1	UBus_Midi_1e15t_Euro-I
	EURO 2	UBus_Midi_1e15t_Euro-II
	EURO 3	UBus_Midi_1e15t_Euro-III
	EURO 5	UBus_Midi_1e15t_Euro-V_EGR

Fonte: Autor (2023).

A calibração segue o conceito de comparar os valores encontrados na realidade e os valores encontrados com a utilização da ferramenta. A métrica escolhida para a realização do aperfeiçoamento da simulação é o tempo médio de viagem, considerando um tempo para a viagem de ida e um para a viagem de volta na rota, aplicando para o horário de pico da manhã e para o horário de pico da tarde.

A rota escolhida inicia na parte oeste da Rua Monsenhor Gercino, passando pelo cruzamento com o funcionamento de um semáforo na Rua Monsenhor Gercino, a Rua João da Costa Júnior e a Rua Fátima, seguindo pela frente do terminal e passando pela faixa elevada de pedestre, entrando na Rua Elpídio Lemos até o final da Rua Agulhas Negras.

A Figura 13 apresenta a rota escolhida para a calibração da simulação, iniciando no lado oeste da Rua Monsenhor Gercino e terminando na Rua Agulhas Negras.

Figura 13 – Rota utilizada para a calibração



Fonte: Autor (2023).

A coleta em campo dos tempos de viagem foi realizada com um hb20 comfort 1.0 com duas pessoas, servindo como um vehicle probe, em uma quarta-feira dia 19/04/2023 e em uma terça-feira dia 25/04/2023, conseguindo no total um levantamento de sete contagens para cada um dos sentidos de viagem e para cada

um dos períodos, buscando manter no possível realizar as passagens dentro do horário de pico e o mesmo número de passagens para cada sentido e horário.

O Quadro 10 demonstra o dia da coleta, o horário inicial da contagem, o tempo de viagem em minutos e o sentido da viagem no período da manhã. O Quadro 11 demonstra as informações para o período da tarde.

Quadro 10 – Tempo de viagem coletado na manhã

Dia	Hora	Tempo de viagem	Sentido
19/04/2023	06:44	04:17	Ida
19/04/2023	06:49	23:09	Volta
19/04/2023	07:13	04:45	Ida
19/04/2023	07:19	18:11	Volta
19/04/2023	07:39	04:03	Ida
19/04/2023	07:45	05:33	Volta
25/04/2023	07:05	04:21	Ida
25/04/2023	07:12	06:58	Volta
25/04/2023	07:20	04:51	Ida
25/04/2023	07:27	05:37	Volta
25/04/2023	07:34	04:12	Ida
25/04/2023	07:40	05:22	Volta
25/04/2023	07:47	04:01	Ida
25/04/2023	07:54	04:58	Volta

Fonte: Autor (2023).

Quadro 11 – Tempo de viagem coletado na tarde

Dia	Hora	Tempo de viagem	Sentido
19/04/2023	16:51	05:37	Ida
19/04/2023	16:57	05:33	Volta
19/04/2023	17:05	05:57	Ida
19/04/2023	17:11	05:07	Volta
19/04/2023	17:18	08:20	Ida
19/04/2023	17:28	06:59	Volta
19/04/2023	17:39	09:51	Ida
19/04/2023	17:50	06:01	Volta
25/04/2023	17:05	05:19	Ida
25/04/2023	17:12	05:31	Volta
25/04/2023	17:18	05:24	Ida
25/04/2023	17:27	05:10	Volta
25/04/2023	17:30	06:47	Ida
25/04/2023	17:39	05:46	Volta

Fonte: Autor (2023).

Os dados obtidos em campo apresentaram a ocorrência de valores atípicos no dia 19/04/2023 nas duas primeiras passagens de volta da manhã, ocasionado pela

interferência do trem que prejudicou o funcionamento do terminal, acumulando os ônibus no terminal e aumentando o tempo de viagem, necessitando realizar o tratamento dos dados com a retirada dos valores da média.

A aquisição do tempo de viagem na região permitiu realizar comparações, identificando que o tempo de viagem na simulação estava divergindo significativamente do valor presenciado na realidade, conseqüentemente, possibilitando observar erros na codificação na rede.

A correção detalhada da rede encaminhou o processo para a próxima comparação entre o tempo médio de viagem coletado e o tempo médio de viagem simulado para cada sentido da viagem e para cada turno em segundos, encontrando erros maiores que os 10% estipulados para a representação da região, como demonstrado no Quadro 12.

Quadro 12 – Erro encontrado sem a alteração do comportamento

Rota	Turno	Coletado	Simulação	Erro
Ida	Manhã	261	324	24,14%
Ida	Tarde	405	427	5,43%
Volta	Manhã	341	385	12,90%
Volta	Tarde	343	350	2,04%

Fonte: Autor (2023).

A situação encontrada representa que os veículos estão demorando mais tempo do que a realidade em todos os sentidos e em todos os turnos, portanto, necessitando analisar as configurações da microssimulação, com a intenção de encontrar uma maneira de melhorar o tempo de viagem dos veículos.

A opção encontrada foi a alteração no modelo de car-following, referenciado no item 2.4.1, modificando a variável sigma, representando com o valor zero o motorista perfeito e com o valor um motorista imperfeito, portanto, escolheu-se diminuir o valor padrão de 0,5 para 0,4. O Quadro 13 mostra o impacto da alteração da variável sigma no erro.

Quadro 13 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,4

Rota	Turno	Coletado	Simulação	Erro
Ida	Manhã	261	277	6,13%
Ida	Tarde	405	416	2,72%
Volta	Manhã	341	353	3,52%
Volta	Tarde	343	328	4,37%

Fonte: Autor (2023).

A alteração do valor de sigma para 0,4 fez a simulação entrar no valor estipulado para o erro, entretanto a possibilidade de diminuir o erro instigou a análise da mudança do erro com a diminuição da variável sigma. O Quadro 14 demonstra a mudança do sigma para o valor de 0,3 e o Quadro 15 a mudança do sigma para o valor de 0,2.

Quadro 14 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,3

Rota	Turno	Coletado	Simulação	Erro
Ida	Manhã	261	259	0,77%
Ida	Tarde	405	401	0,99%
Volta	Manhã	341	344	0,88%
Volta	Tarde	343	330	3,79%

Fonte: Autor (2023).

Quadro 15 – Resultado da calibração com alteração do sigma para 0,2

Rota	Turno	Coletado	Simulação	Erro
Ida	Manhã	261	248	4,98%
Ida	Tarde	405	379	6,42%
Volta	Manhã	341	327	4,11%
Volta	Tarde	343	328	4,37%

Fonte: Autor (2023).

A configuração satisfatória encontrada é a utilização do valor de 0,3 para a variável sigma, seguindo como representação da proficiência dos motoristas. A finalização da calibração considerada adequada para a região, possibilitou obter os resultados do cenário atual para o período da manhã e para o período da tarde, como demonstrado no Quadro 16.

Quadro 16 – Resultados do cenário atual

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	204,54	277,20	240,87
Velocidade (Km/h)	25,46	23,24	24,35
Atraso (s)	106,73	176,24	141,48
Tempo parado (s)	53,41	119,91	86,66
CO ₂ (mg)	332276,38	435422,47	383849,42
CO (mg)	332,39	385,83	359,11
HC (mg)	101,64	134,91	118,28
Nox (mg)	589,74	703,62	646,68
MPx (mg)	29,55	33,38	31,47
Combustível (ml)	107637,66	141077,74	124357,70
Comprimento (m)	1228,62	1260,49	1244,55

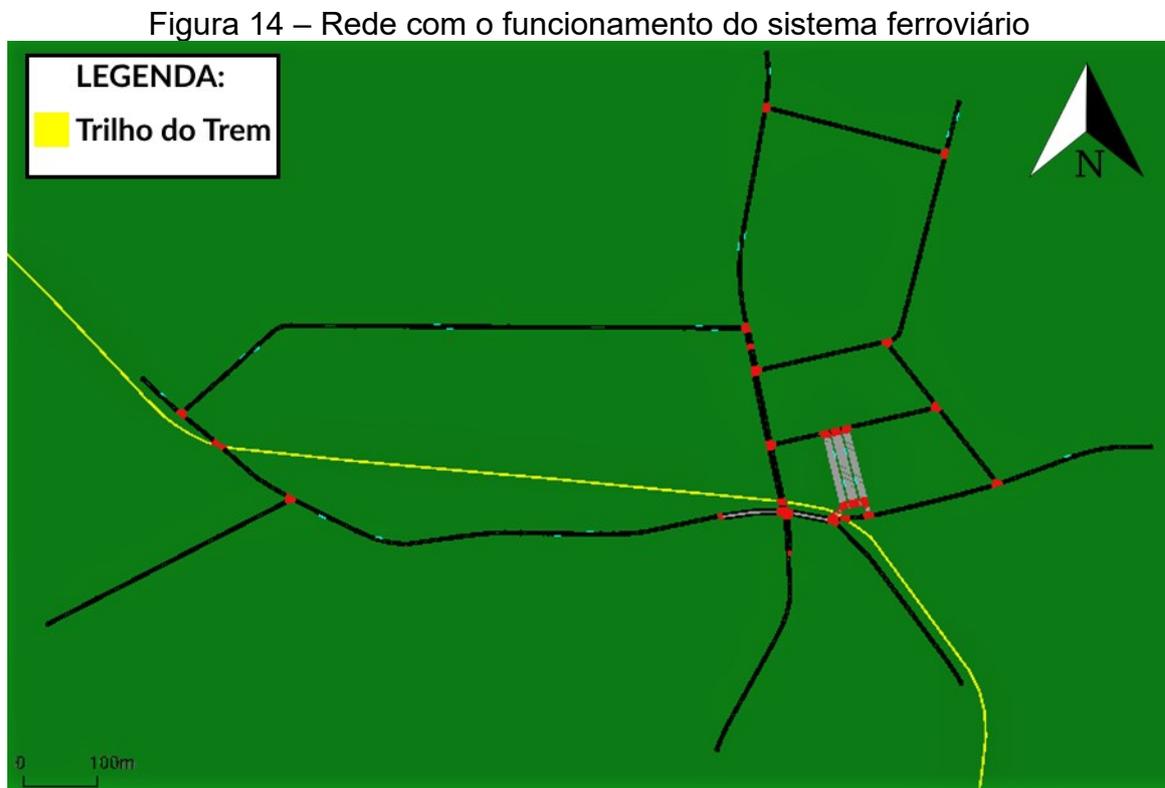
Fonte: Autor (2023).

4.3. MODELAGEM DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Os cenários propostos utilizaram como base a infraestrutura e os fluxos de veículos calibrados para o cenário atual, permitindo realizar comparações entre a representação da realidade com os cenários propostos. Essa comparação permite observar o impacto positivo ou negativo da passagem do trem de carga em uma região urbana, das alterações viárias e das atualizações nas tecnologias responsáveis pelas emissões de poluentes dos veículos.

O primeiro cenário proposto é a análise da passagem do trem de carga em uma região urbana, considerando que a passagem iniciou nos primeiros quinze minutos do horário de pico da manhã e da tarde, com um comprimento de 1620 metros, correspondente a 100 vagões e com a velocidade máxima de 20 km/h. A estimativa dos resultados considerou somente o impacto do trem no sistema, portanto, removendo as métricas da viagem realizada pelo trem.

A Figura 14 mostra em amarelo o caminho utilizado pelo sistema ferroviário na simulação.



Fonte: Autor (2023).

O Quadro 17 demonstra os resultados do cenário considerando a passagem do trem.

Quadro 17 – Resultados do cenário com a passagem do trem

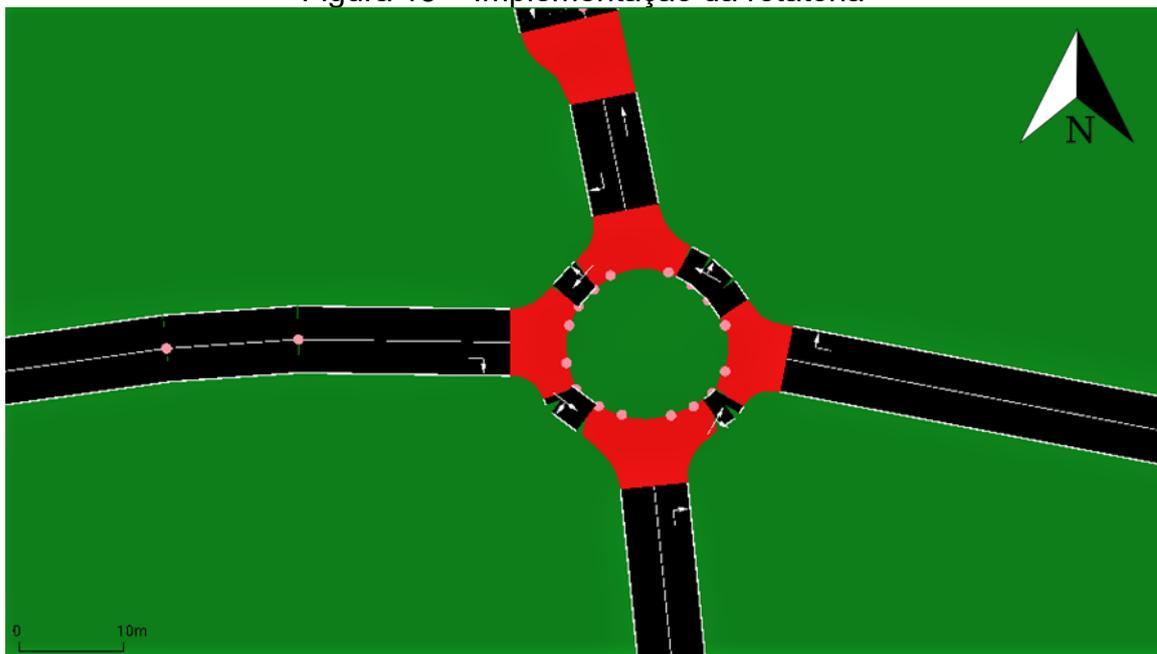
Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	288,06	324,14	306,10
Velocidade (Km/h)	21,21	19,49	20,35
Atraso (s)	188,58	223,05	205,81
Tempo parado (s)	123,50	155,22	139,36
CO ₂ (mg)	460780,47	498358,84	479569,65
CO (mg)	401,11	418,61	409,86
HC (mg)	140,08	154,62	147,35
Nox (mg)	798,12	813,05	805,58
MPx (mg)	38,19	39,01	38,60
Combustível (ml)	149277,94	161469,64	155373,79
Comprimento (m)	1242,43	1259,79	1251,11

Fonte: Autor (2023).

O segundo cenário é a implementação de uma rotatória no cruzamento entre a Rua Monsenhor Gercino, a Rua João da Costa Júnior e a Rua Fátima, que atualmente tem o funcionamento de um semáforo. O cenário tem como proposta a implementação da rotatória com quinze metros de raio interno e três metros de pista, considerando a preferência para os veículos que estão em movimento na rotatória.

A Figura 15 mostra a configuração utilizada para a confecção da rotatória.

Figura 15 – Implementação da rotatória



Fonte: Autor (2023).

O Quadro 18 demonstra os resultados do cenário considerando uma implementação de uma rotatória.

Quadro 18 – Resultados do cenário com a implementação da rotatória

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	172,10	255,88	213,99
Velocidade (Km/h)	29,46	25,37	27,41
Atraso (s)	74,88	155,72	115,30
Tempo parado (s)	24,41	77,27	50,84
CO ₂ (mg)	282678,49	397808,21	340243,35
CO (mg)	307,68	367,17	337,42
HC (mg)	87,36	125,02	106,19
Nox (mg)	509,74	654,97	582,35
MPx (mg)	26,24	32,31	29,28
Combustível (ml)	91565,87	128884,82	110225,34
Comprimento (m)	1218,12	1244,94	1231,53

Fonte: Autor (2023).

O terceiro cenário é a implementação do binário com a Rua Fátima em sentido único sul/norte e as Ruas Elpídio Lemos e Agulhas Negras em sentido único norte/sul, mantendo a configuração do tempo total de ciclo utilizado atualmente, alterando a velocidade permitida nas ruas envolvidas no binário para 60 km/h e removendo a lombada que está na Rua Agulhas Negras.

O Quadro 19 identifica os movimentos de cada estágio e o tempo de verde em segundos, considerando o resto do tempo de ciclo para as fases de amarelo e vermelho geral para o semáforo no cenário do binário.

Quadro 19 – Configuração do semáforo no cenário do binário

Estágio	Tempo de verde	
	Manhã	Tarde
Veicular Rua Monsenhor Gercino (Leste – Oeste)	26	26
Veicular Rua Monsenhor Gercino (Oeste – Leste)	26	33
Pedestre Geral	10	10
Veicular Rua João da Costa Júnior	18	16
Tempo total de ciclo	95	100

Fonte: Autor (2023).

O Quadro 20 demonstra os resultados do cenário considerando uma implementação do binário.

Quadro 20 – Resultados do cenário com a implantação do binário

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	205,32	219,68	212,50
Velocidade (Km/h)	29,83	28,36	29,09
Atraso (s)	113,07	125,86	119,47
Tempo parado (s)	72,31	80,66	76,48
CO ₂ (mg)	342064,04	346882,23	344473,13
CO (mg)	336,67	344,33	340,50
HC (mg)	106,31	108,74	107,53
Nox (mg)	589,6	607,36	598,48
MPx (mg)	28,38	30,66	29,52
Combustível (ml)	110797,29	112374,58	111585,93
Comprimento (m)	1191,12	1218,02	1204,57

Fonte: Autor (2023).

Os cenários que propõem a alteração das tecnologias dos veículos utilizam como resultados as informações das emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, material particulado e o uso de combustível. O motivo da escolha de observar somente as emissões é que a alteração das tecnologias não influencia no funcionamento do fluxo de veículos, ocasionando os mesmos resultados de tráfego encontrados para o cenário atual.

O quarto cenário é a atualização dos automóveis, das motos, dos caminhões e dos ônibus que circulam na região de estudo, que estão classificados como tecnologia responsável pelas emissões de poluentes da norma EURO 1 para veículos com a regulamentação da norma EURO 2.

O Quadro 21 demonstra a proporção de veículos de cada regulamentação.

Quadro 21 – Distribuição das normas EURO no quarto cenário

Veículo	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5
Automóveis	73%	27%	0%	0%
Motos	55%	25%	20%	0%
Caminhões	48%	20%	0%	32%
Ônibus	33%	29%	0%	38%

Fonte: Autor (2023).

O Quadro 22 demonstra os resultados do cenário considerando a atualização da frota de Joinville da norma EURO 1 para a norma EURO 2.

Quadro 22 – Resultado da atualização da frota para EURO 2

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
CO2 (mg)	329131,09	432108,11	380619,60
CO (mg)	289,63	318,51	304,07
HC (mg)	29,69	35,60	32,65
Nox (mg)	493,17	580,24	536,70
MPx (mg)	26,44	30,09	28,27
Combustível (ml)	106617,97	140001,99	123309,98
Comprimento (m)	1228,62	1260,49	1244,55

Fonte: Autor (2023).

O quinto cenário é a atualização dos veículos que circulam na região de estudo, que estão classificados como tecnologia responsável pelas emissões de poluentes da norma EURO 1 e EURO 2 para veículos com a regulamentação da norma EURO 3.

O Quadro 23 demonstra a proporção de veículos de cada regulamentação.

Quadro 23 – Distribuição das normas EURO no quinto cenário

Veículo	Euro 3	Euro 4	Euro 5
Automóveis	100%	0%	0%
Motos	80%	20%	0%
Caminhões	68%	0%	32%
Ônibus	62%	0%	38%

Fonte: Autor (2023).

O Quadro 24 demonstra os resultados do cenário considerando a atualização da frota de Joinville da norma EURO 1 e EURO 2 para a norma EURO 3.

Quadro 24 – Resultado da atualização da frota para EURO 3

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
CO2 (mg)	321211,18	412413,60	366812,39
CO (mg)	259,42	278,44	268,93
HC (mg)	21,81	27,33	24,57
Nox (mg)	398,11	439,63	418,87
MPx (mg)	23,58	26,25	24,92
Combustível (ml)	104055,24	133624,79	118840,01
Comprimento (m)	1228,62	1259,78	1244,20

Fonte: Autor (2023).

O sexto cenário representa a atualização de todos os veículos da frota da cidade para a norma EURO 5. O Quadro 25 demonstra os resultados do cenário considerando a atualização de toda a frota de Joinville para a norma EURO 5.

Quadro 25 – Resultado da atualização da frota para EURO 5

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
CO ₂ (mg)	301759,80	390212,90	345986,35
CO (mg)	198,44	209,72	204,08
HC (mg)	5,46	5,74	5,60
Nox (mg)	361,75	396,63	379,19
MPx (mg)	22,00	25,31	23,66
Combustível (ml)	97761,31	126440,45	112100,88
Comprimento (m)	1228,92	1259,73	1244,32

Fonte: Autor (2023).

Os próximos cenários correspondem a combinação entre os cenários que implementam mudanças no funcionamento da rede viária atual da região com a melhor opção de tecnologia veicular para as emissões de poluentes que está sendo considerada para o estudo, buscando identificar a melhor combinação para o futuro da cidade.

O sétimo cenário é a combinação da passagem do trem com a utilização da regulamentação das emissões necessárias para respeitar a norma EURO 5. O Quadro 26 demonstra o resultado da combinação da passagem do trem com os veículos utilizando as normas EURO 5.

Quadro 26 – Resultado da combinação do trem e a norma EURO 5

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	293,16	312,68	302,92
Velocidade (Km/h)	21,01	19,86	20,44
Atraso (s)	193,70	211,51	202,61
Tempo parado (s)	127,68	145,52	136,60
CO ₂ (mg)	422008,48	436141,44	429074,96
CO (mg)	224,62	215,46	220,04
HC (mg)	7,17	6,34	6,75
Nox (mg)	487,02	436,20	461,61
MPx (mg)	28,85	28,50	28,68
Combustível (ml)	136730,20	141326,50	139028,35
Comprimento (m)	1241,37	1259,72	1250,55

Fonte: Autor (2023).

O oitavo cenário é a combinação da rotatória com a utilização da regulamentação das emissões necessárias para respeitar a norma EURO 5. O Quadro 27 demonstra o resultado da combinação do cenário da implementação da rotatória com os veículos utilizando as normas EURO 5.

Quadro 27 – Resultado da combinação da rotatória e a norma EURO 5

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	172,09	254,20	213,14
Velocidade (Km/h)	29,39	25,45	27,42
Atraso (s)	74,82	153,87	114,35
Tempo parado (s)	24,32	75,38	49,85
CO2 (mg)	256400,75	357632,22	307016,49
CO (mg)	190,02	203,09	196,55
HC (mg)	4,76	5,57	5,17
Nox (mg)	318,41	388,18	353,30
MPx (mg)	19,42	24,45	21,94
Combustível (ml)	83061,61	115877,45	99469,53
Comprimento (m)	1218,44	1245,44	1231,94

Fonte: Autor (2023).

O nono cenário é a combinação do binário com a utilização da regulamentação das emissões necessárias para respeitar a norma EURO 5. O Quadro 28 demonstra o resultado da combinação do cenário da implementação do binário com os veículos utilizando as normas EURO 5.

Quadro 28 – Resultado da combinação do binário e a norma EURO 5

Variável (Média)	Manhã	Tarde	Média dos períodos
Tempo de viagem (s)	206,05	216,94	211,49
Velocidade (Km/h)	29,79	28,50	29,15
Atraso (s)	113,59	123,19	118,39
Tempo parado (s)	72,75	78,51	75,63
CO2 (mg)	308679,41	309686,07	309182,74
CO (mg)	204,80	196,96	200,88
HC (mg)	5,49	5,35	5,42
Nox (mg)	403,20	358,26	380,73
MPx (mg)	21,69	23,49	22,59
Combustível (ml)	99994,30	100333,25	100163,78
Comprimento (m)	1192,19	1216,29	1204,24

Fonte: Autor (2023).

O detalhamento dos dados utilizados e das configurações do cenário atual e dos cenários propostos permitiu a obtenção dos resultados dos indicadores a serem comparados e analisados no próximo capítulo.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão evidenciados as análises e comparações realizadas no estudo, com o intuito de identificar os impactos dos cenários propostos para o fluxo do tráfego e para as emissões de poluentes provenientes dos veículos. Iniciando com uma identificação dos respectivos cenários e suas alterações, como demonstrado no Quadro 29.

Quadro 29 – Apresentação dos cenários e suas alterações

Cenário	Alterações
Atual	Representação da situação atual
1	Passagem do trem de carga
2	Implementação da rotatória
3	Implementação do binário
4	Cenário atual com atualização da frota para EURO 2
5	Cenário atual com atualização da frota para EURO 3
6	Cenário atual com atualização da frota para EURO 5
7	Combinação do cenário 1 e 6
8	Combinação do cenário 2 e 6
9	Combinação do cenário 3 e 6

Fonte: Autor (2023).

As análises dos resultados dos cenários propostos seguem como base a comparação em relação a representação da situação atual da região com a devida calibração apresentada no trabalho. Essas comparações seguiram como estrutura a separação em categorias, com uma divisão em indicadores dos fluxos de veículos, indicadores das emissões de poluentes e o consumo de combustível dos veículos.

5.1. COMPARAÇÃO DOS INDICADORES DOS FLUXOS DE VEÍCULOS

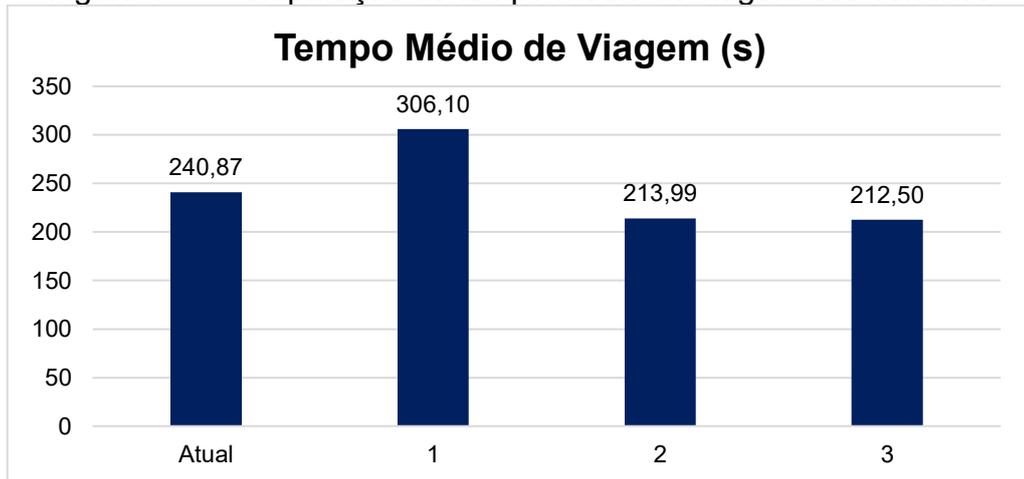
Os indicadores escolhidos para o estudo relacionados com o fluxo de veículos são o tempo de viagem, a velocidade, o atraso, o tempo parado e o comprimento percorrido pelos veículos para todas as viagens finalizadas durante a simulação do período da manhã e da tarde, utilizando como métrica o valor médio dos resultados.

Os cenários 4, 5 e 6 não entraram na análise do fluxo de veículos por se tratar de alterações nas tecnologias das emissões, que por sua vez, não apresentam impacto no desempenho do tráfego da região.

Os cenários 7, 8 e 9 são equivalentes aos resultados de tráfego do cenário 1, 2 e 3, portanto, apresentam as mesmas observações.

A Figura 16 apresenta a comparação do tempo médio de viagem em segundos do cenário atual e dos cenários propostos.

Figura 16 – Comparação do tempo médio de viagem dos cenários

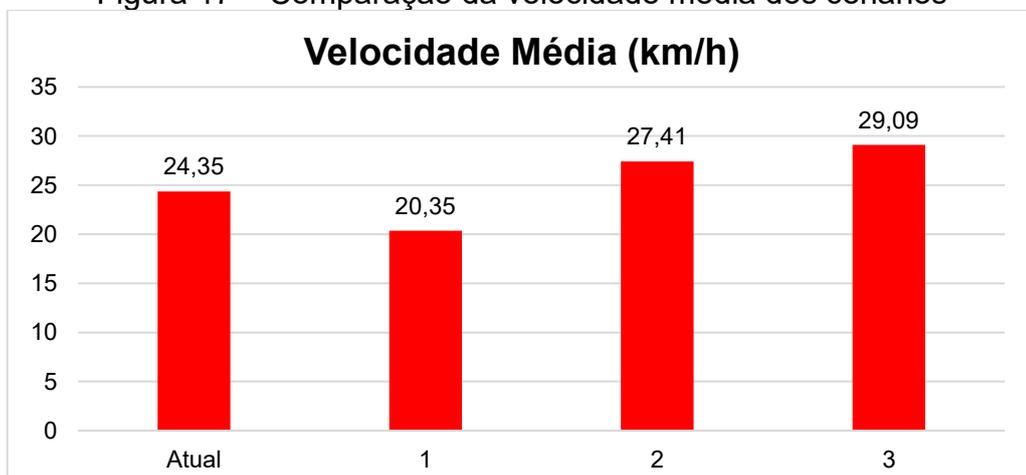


Fonte: Autor (2023).

A comparação do tempo médio de viagem apresentou que a passagem do trem de carga durante o horário de pico causa um aumento de 27,08% no tempo necessário para realizar um deslocamento na região, que a implementação da rotatória diminuiu o tempo das movimentações em 11,16% e que a melhor opção é a utilização do binário que reduz o tempo das viagens em 11,78%.

A Figura 17 apresenta a comparação da velocidade média em quilômetros por hora do cenário atual e dos cenários propostos.

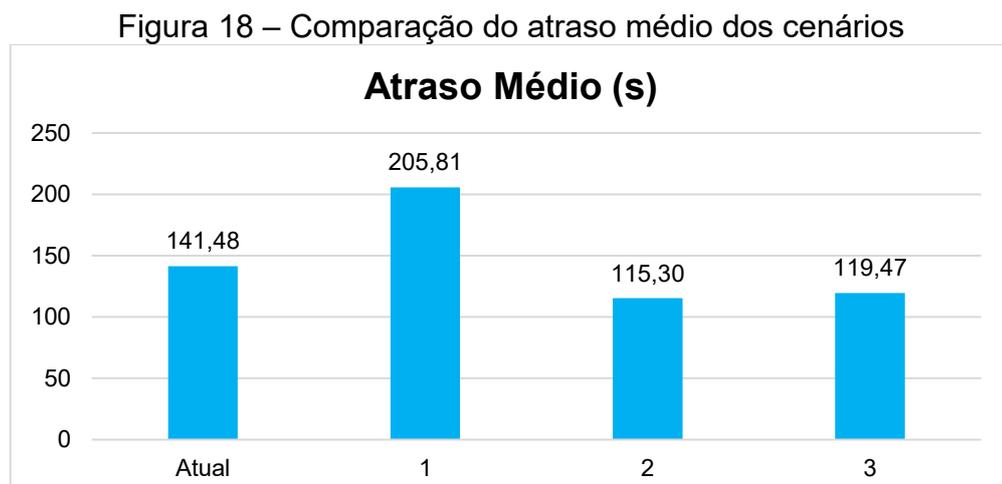
Figura 17 – Comparação da velocidade média dos cenários



Fonte: Autor (2023).

A velocidade média encontrada nos cenários propostos demonstrou que a passagem do trem causa uma diminuição de 16,42% na velocidade dos veículos da região, que a aplicação da rotatória aumentou a velocidade em 12,59% e que a melhor opção é a implantação do binário que é capaz de aumentar a velocidade em 19,49%.

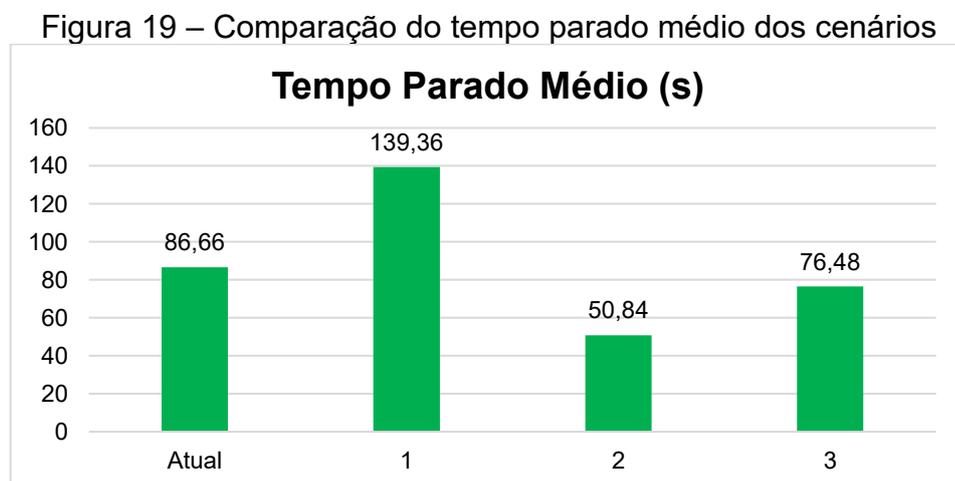
A Figura 18 apresenta a comparação do atraso médio em segundos do cenário atual e dos cenários propostos.



Fonte: Autor (2023).

O atraso médio nos cenários propostos possibilitou observar que a passagem do trem causa um aumento de 45,47%, que a utilização da rotatória mostrou a maior redução do atraso com uma melhora de 18,51% e que a implementação do binário reduz o atraso em 15,51%.

A Figura 19 apresenta a comparação do tempo parado médio em segundos do cenário atual e dos cenários propostos.

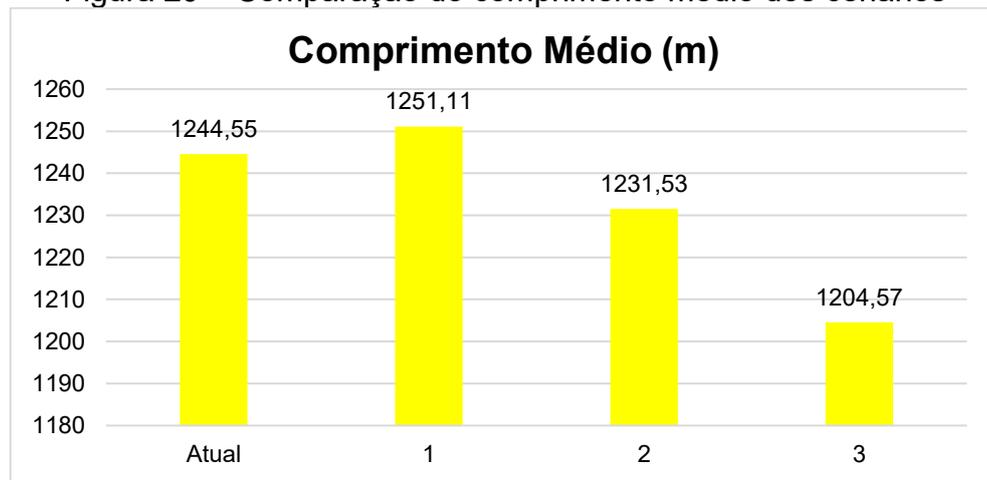


Fonte: Autor (2023).

O tempo parado médio dos cenários propostos demonstrou que a passagem do trem ocasiona um aumento de 60,80%, que a implementação da rotatória mostrou a maior diminuição do tempo parado com uma melhora de 41,34% e que a utilização do binário reduz o tempo parado em 11,75%.

A Figura 20 apresenta a comparação do comprimento médio das rotas do cenário atual e dos cenários propostos.

Figura 20 – Comparação do comprimento médio dos cenários



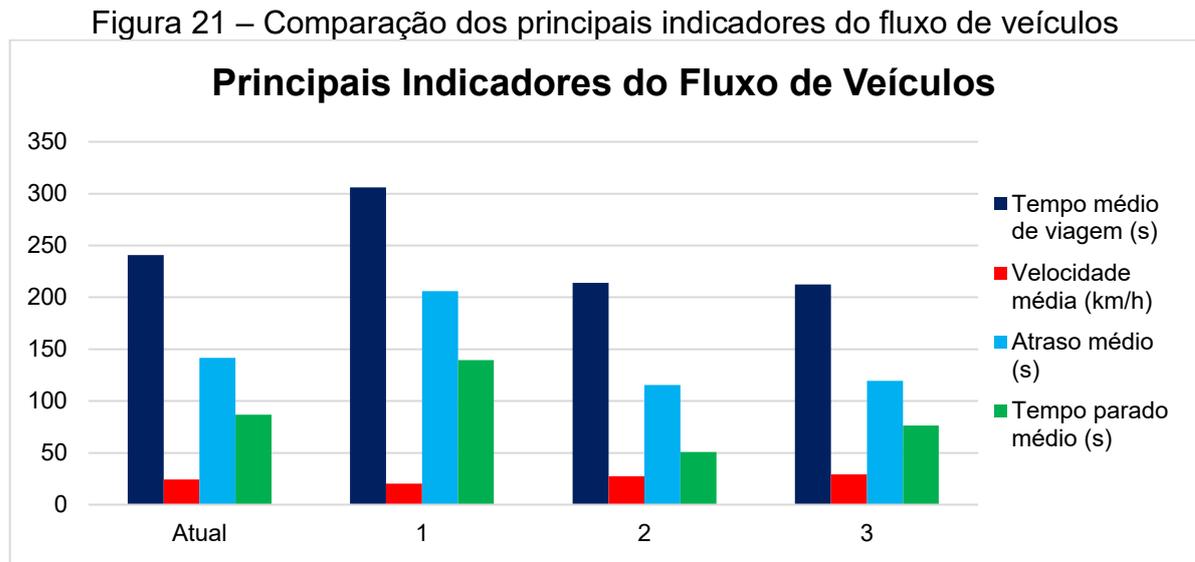
Fonte: Autor (2023).

A comparação do comprimento médio das rotas mostrou que na passagem do trem faz os veículos buscarem novas rotas para compensar o bloqueio causado pela operação do trem de carga, causando um aumento no comprimento médio das viagens em 0,53%.

A utilização de um sistema de binário viabilizara uma otimização no tempo de viagem e na velocidade, causando um aumento na distância dos deslocamentos realizados na região, entretanto o resultado da simulação demonstrou que a aplicação da infraestrutura proporcionou uma diminuição no comprimento das rotas (TEIXEIRA et al., 2015).

A redução do comprimento na implementação da rotatória e do binário vem da modificação da configuração do cruzamento com a presença do sistema semafórico, proporcionando a liberação dos movimentos para a esquerda da Rua Monsenhor Gercino para a Rua Fátima e para a Rua João da Costa Júnior, atualmente bloqueado. Essa alteração remove a necessidade dos motoristas em realizar movimentos para conseguir chegar em uma rua que permita acessar o seu destino, diminuindo a distância percorrida pelos veículos na região.

A diferença na redução observada entre a rotatória e o binário está na distância necessária para realizar os movimentos na rotatória, proporcionando no pior dos casos um aumento de 38,16 metros nas rotas. A Figura 21 apresenta a comparação dos principais indicadores relacionados ao fluxo de veículos do cenário atual e dos cenários propostos.



Os resultados obtidos para os indicadores de fluxo possibilitaram identificar que a passagem do trem de carga tem um impacto negativo médio de 30,06% para a operação do trânsito em uma região urbana. O cenário com a implementação da rotatória e o cenário com a utilização do binário apresentaram resultados aproximados para o tempo médio de viagem, a velocidade média e o atraso médio.

A diferença perceptível entre a rotatória e o binário está no indicador do tempo parado médio, apresentando um ganho de 11,75% para o binário e um ganho de 41,34% para a implementação da rotatória. O motivo da diferença é a substituição do semáforo por uma rotatória, que está presente no principal cruzamento analisado da região, removendo a necessidade de parada dos veículos, ocasionando uma redução nos congestionamentos e diminuindo o tempo parado (BITKINA et al., 2019).

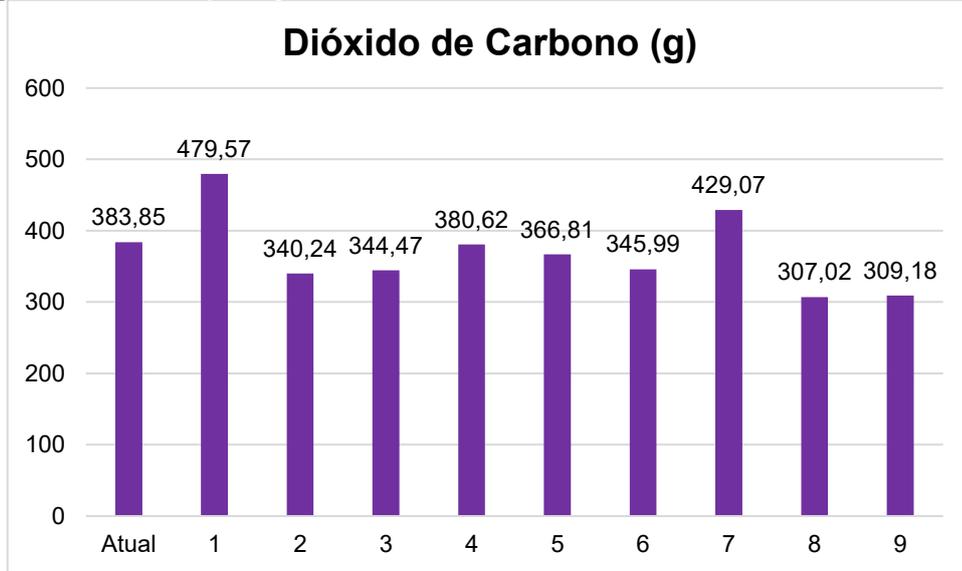
5.2. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES

Os indicadores disponibilizados pelo software de simulação relacionados com as emissões de poluentes são a quantidade de dióxido de carbono, de monóxido de carbono, de hidrocarbonetos, de óxidos de nitrogênio e de material particulado em

gramas, provenientes dos veículos para todas as viagens finalizadas durante a simulação do período da manhã e da tarde, utilizando como métrica o valor médio dos resultados.

A Figura 22 apresenta a comparação da média da emissão de dióxido de carbono proveniente dos veículos do cenário atual e dos cenários propostos.

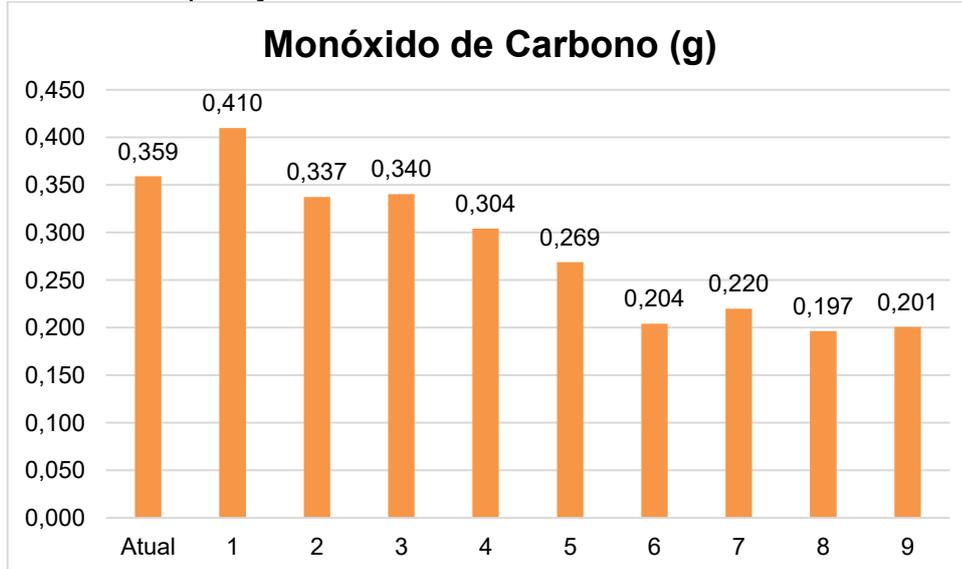
Figura 22 – Comparação da emissão de dióxido de carbono dos cenários



Fonte: Autor (2023).

A Figura 23 apresenta a comparação da média da emissão de monóxido de carbono proveniente dos veículos do cenário atual e dos cenários propostos.

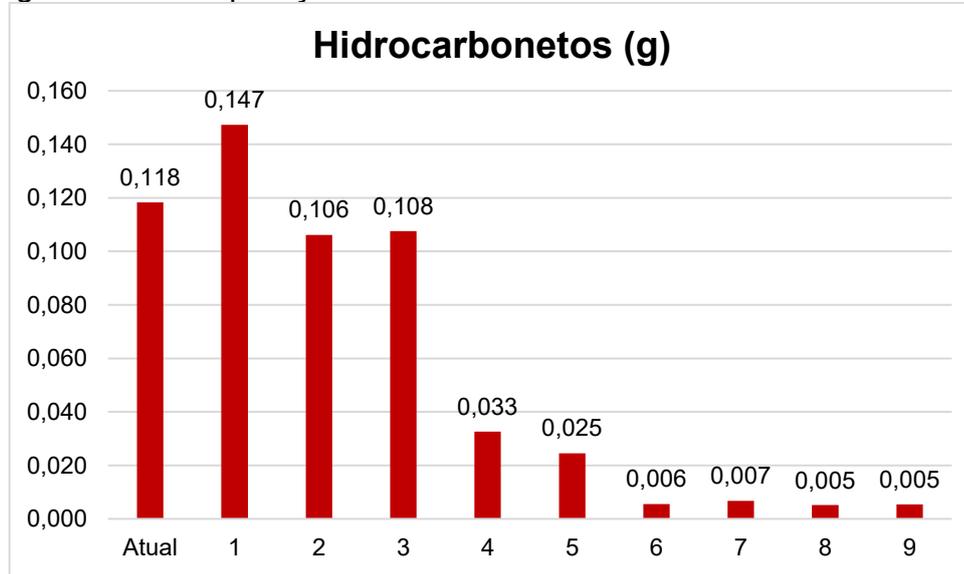
Figura 23 – Comparação da emissão de monóxido de carbono dos cenários



Fonte: Autor (2023).

A Figura 24 apresenta a comparação da média da emissão de hidrocarboneto proveniente dos veículos do cenário atual e dos cenários propostos.

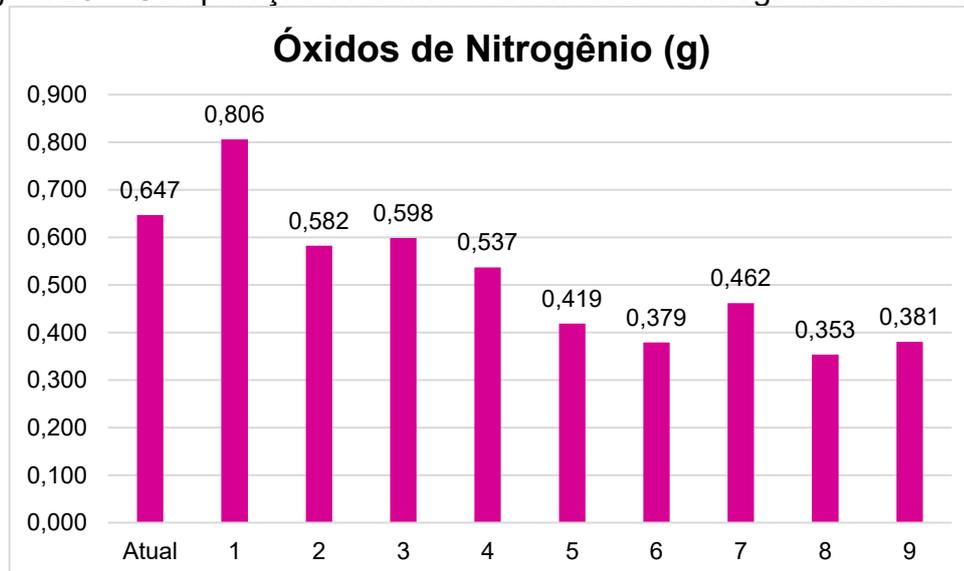
Figura 24 – Comparação da emissão de hidrocarbonetos dos cenários



Fonte: Autor (2023).

A Figura 25 apresenta a comparação da média da emissão de óxidos de nitrogênio proveniente dos veículos do cenário atual e dos cenários propostos.

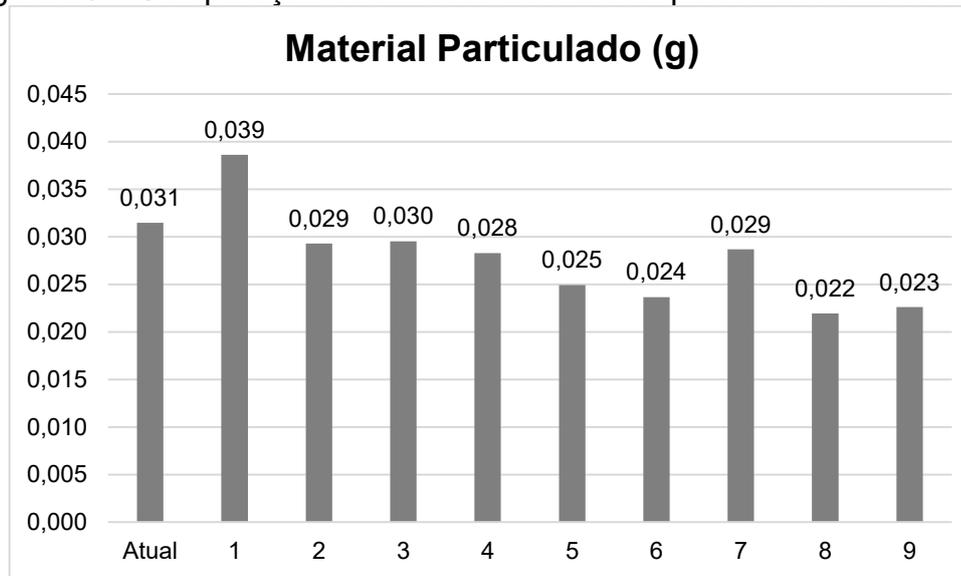
Figura 25 – Comparação da emissão de óxidos de nitrogênio dos cenários



Fonte: Autor (2023).

A Figura 26 apresenta a comparação da média da emissão de material particulado proveniente dos veículos do cenário atual e dos cenários propostos.

Figura 26 – Comparação da emissão de material particulado dos cenários



Fonte: Autor (2023).

As análises das emissões de poluentes resultado da simulação seguem como consideração a calibração do fluxo de veículos, portanto, estruturando uma precisão nas proporções entre os cenários e não na quantidade de poluentes encontrado. As comparações dos resultados para as emissões de poluentes provenientes dos veículos, permitiu observar que cada tipo de poluente tem um comportamento diferente em relação a passagem do trem de carga, as implementações de alterações viárias e as atualizações das tecnologias da frota.

Os resultados da passagem do trem de carga durante os horários de pico, demonstrou um impacto negativo na quantidade de poluentes propagados na região em todos os indicadores, com um aumento médio de 21,54% nas emissões de poluentes. Essa passagem aumenta a exposição e a concentração de poluentes em uma região com uma frequência constante de deslocamentos de crianças e de usuários do pronto atendimento (TOLEDO; NARDOCCI, 2011).

O impacto negativo provocado pela passagem do trem e o benefício das atualizações das tecnologias observado pelos resultados, incentivou a elaboração do cenário 7, considerando o funcionamento do trem e a utilização das normas EURO 5 na frota de veículos da cidade, buscando mitigar os danos do trem para a região.

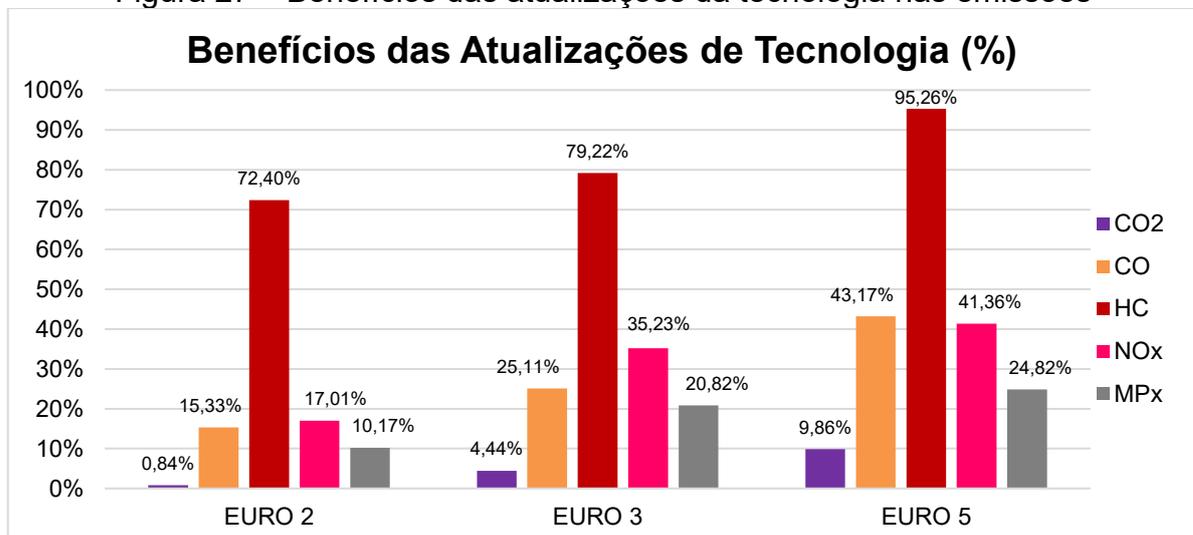
A atualização da tecnologia demonstrou que é capaz de compensar e diminuir o impacto na quantidade de monóxido de carbono, hidrocarboneto, óxidos de nitrogênio e material particulado, representando os poluentes tóxicos para o ser humano, entretanto, para compensar a emissão de dióxido de carbono não é

suficiente somente a atualização da tecnologia da frota de veículos, necessitando buscar alternativas para reduzir o impacto da operação sistema ferroviário nas emissões do poluente responsável pelo efeito estufa (TERRENOIRE et al., 2019).

A atualização das tecnologias responsáveis pelas emissões de poluentes dos veículos representadas no cenário 4,5 e 6, demonstraram que a regulamentação e o controle da poluição veicular têm influência direta nas emissões (CETESB, 2022).

A Figura 27 apresenta os benefícios das atualizações da tecnologia para cada cenário e para cada poluente em comparação com a situação atual da região.

Figura 27 – Benefícios das atualizações da tecnologia nas emissões



Fonte: Autor (2023).

A comparação entre as atualizações das normas EURO aplicadas na frota da cidade, apresentam uma tendência em reduzir a poluição dos veículos, entretanto vale ressaltar que do cenário 5 para o cenário 6 aconteceu um salto da norma EURO 3 para a norma EURO 5, formando uma descontinuidade na tendência da redução.

O dióxido de carbono nos cenários com alteração de regulamentação demonstrou uma redução inicial de 0,84%, seguindo para uma redução de 4,44% e finalizando com uma redução de 9,88%. Esse poluente é um produto formado pela queima completa do combustível, causando uma relação em que aumentar a eficiência dos motores, acaba diminuiu os poluentes tóxicos e aumentando ou deixando de reduzir na mesma quantidade a emissão de dióxido de carbono, fazendo ser o poluente com a menor redução observada (TUCKI et al., 2019).

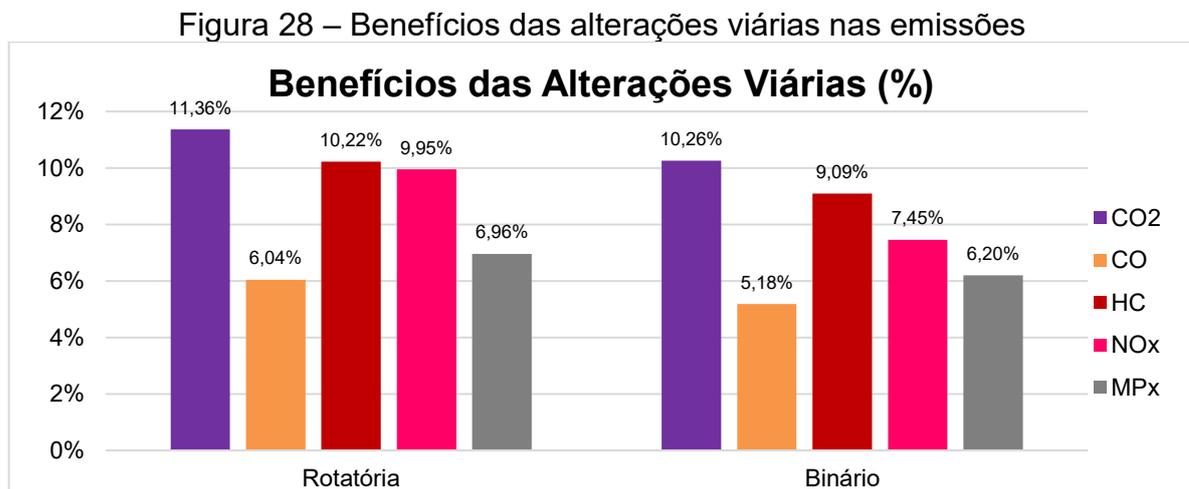
No caso do monóxido de carbono os cenários demonstraram uma redução inicial de 15,33%, seguindo para uma redução de 25,11% e finalizando com uma

redução de 43,71%, mostrando uma redução constante de aproximadamente 9% para cada atualização na regulamentação dos poluentes veiculares, considerando que a normativa EURO 4 segue a tendência encontrada para esse poluente.

Os hidrocarbonetos demonstraram uma redução inicial de 72,40%, seguindo para uma redução de 79,22% e finalizando com uma redução de 95,26%, revelando que as emissões do poluente estão ligadas diretamente com a evolução tecnológica (WALLINGTON et al., 2022).

Os óxidos de nitrogênio demonstraram uma redução inicial de 17,01%, seguindo para uma redução de 35,23% e finalizando com uma redução de 41,36%. O material particulado demonstrou uma redução inicial de 10,17%, seguindo para uma redução de 20,82% e finalizando com uma redução de 24,82%. Esses dois poluentes apresentaram uma grande redução com a implementação da EURO 2 e da EURO 3, entretanto é possível observar que com as normas EURO 5 a tendência é a estabilização das emissões.

As alterações viárias representados pelo cenário 2 e 3, demonstraram que a otimização dos indicadores de tráfego tem efeito nas emissões de poluentes dos veículos automotores. A Figura 28 apresenta os benefícios das alterações viárias para cada cenário e para cada poluente em comparação com a situação atual da região.



Fonte: Autor (2023).

A implementação da rotatória apresentou resultados positivos para todos os indicadores que representam as emissões de poluentes dos veículos, contribuindo para a região com uma redução de 11,36% para o dióxido de carbono, de 6,04% para o monóxido de carbono, de 10,22% para os hidrocarbonetos, de 9,95% para os óxidos de nitrogênio e de 6,96% para o material particulado.

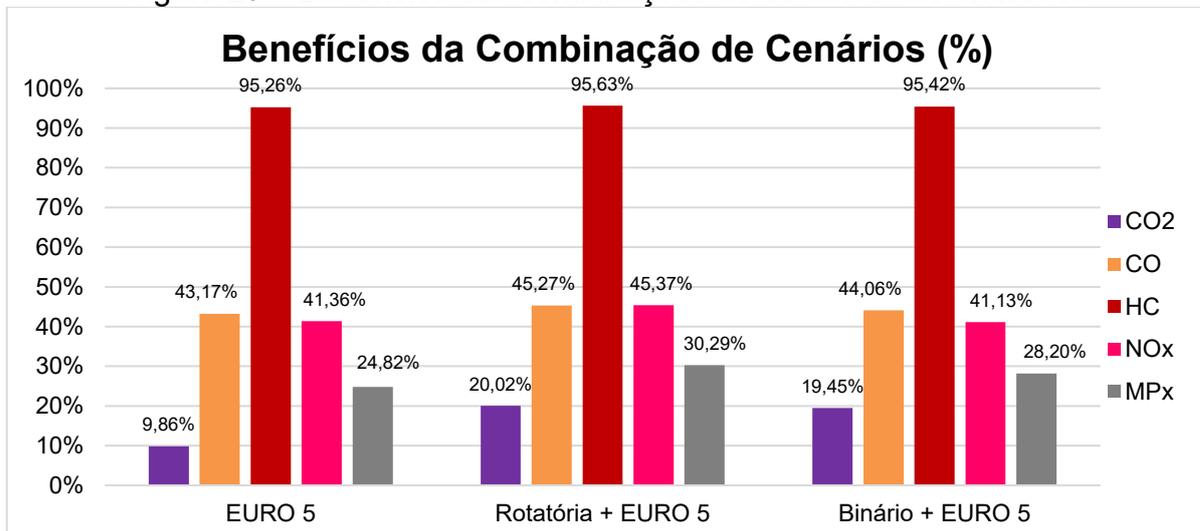
A utilização do binário apresentou resultados positivos para todos os indicadores, contribuindo para a região com uma redução de 10,28% para o dióxido de carbono, de 5,18% para o monóxido de carbono, de 9,09% para os hidrocarbonetos, de 7,45% para os óxidos de nitrogênio e de 6,20% para o material particulado.

A diferença observada nos resultados das emissões entre a implementação da rotatória e a utilização do binário é motivada pelo tempo parado, mostrando que as paradas necessárias no semáforo no cenário atual e no binário aumenta a quantidade das emissões de poluente proveniente dos veículos automotores.

As reduções encontradas para as alterações viárias e para as atualizações das tecnologias dos veículos com as normas EURO, estabeleceu a possibilidade de encontrar o melhor cenário possível, portanto, surgiu o cenário 8 e o cenário 9, considerando a aplicação da rotatória e do binário combinado com a tecnologia necessária para seguir a regulamentação da EURO 5.

A Figura 29 apresenta os benefícios da aplicação da norma EURO 5 e sua combinação com as alterações viárias para cada cenário e para cada poluente em comparação com a situação atual da região.

Figura 29 – Benefícios das combinações de cenários nas emissões



Fonte: Autor (2023).

As reduções encontradas para a aplicação da norma EURO 5 e a sua combinação com a rotatória e com o binário, demonstrou que a mitigação da emissão de poluentes dos veículos para a atmosfera está relacionada principalmente com a atualização da tecnologia presente na frota da cidade, entretanto é possível observar

que para o dióxido de carbono a combinação dos cenários apresentou um ganho maior com a aplicação das alterações viárias.

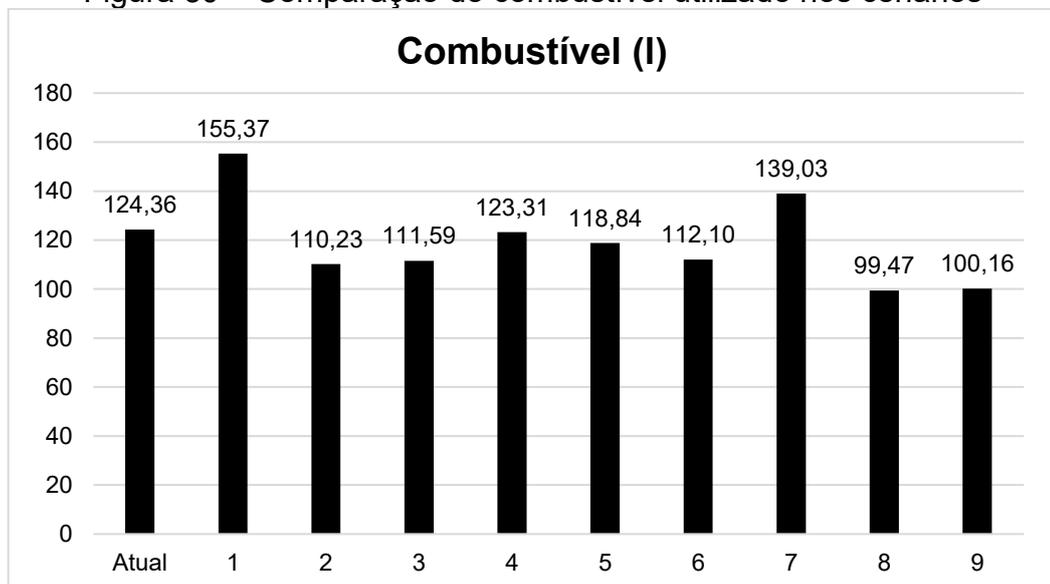
O melhor cenário encontrado é a implementação da rotatória combinada com as tecnologias da EURO 5, contribuindo para a região com uma redução de 20,02% para o dióxido de carbono, de 45,27% para o monóxido de carbono, de 95,63% para os hidrocarbonetos, de 45,37% para os óxidos de nitrogênio e de 30,29% para o material particulado.

No Brasil as normas reguladoras das emissões são estipuladas pelo PROCONVE e PROMOT, possibilitando observar que até o ano de 2023, somente os caminhões e ônibus tinham uma regulamentação equivalente com o sistema EURO 5, causando uma falta de automóveis e motos no mercado para atender as exigências da atualização da frota proposta para a região.

5.3. COMPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO PELOS VEÍCULOS

O indicador escolhido para representar a eficiência dos veículos nos deslocamentos é a quantidade de combustível utilizado pelos veículos para conseguir completar todas as viagens durante a simulação do período da manhã e da tarde, utilizando como métrica o valor médio dos resultados. A Figura 30 apresenta a comparação do combustível médio utilizado para realizar o deslocamento dos veículos da região do cenário atual e dos cenários propostos.

Figura 30 – Comparação do combustível utilizado nos cenários



Fonte: Autor (2023).

O valor encontrado para o combustível demonstrou que a passagem do trem aumenta o consumo em 24,94% e a atualização da tecnologia não consegue compensar o impacto negativo do trem, mantendo o aumento em 11,78%.

O resultado encontrado para o consumo de combustível tem o comportamento e as proporções idênticas com os resultados das emissões de dióxido de carbono para todos os cenários propostos, mostrando um resultado esperado, causado pela queima completa do combustível, responsável pelas emissões de dióxido de carbono (MICKŪNAITIS; PIKŪNAS; MACKOIT, 2007).

5.4. COMPARAÇÃO DO IMPACTO DAS ALTERAÇÕES VIÁRIAS NA REGIÃO

As análises dos indicadores apresentaram que a implementação das alterações viárias tem um impacto positivo para o tráfego e para as emissões de poluentes. Esses cenários propõem modificações na infraestrutura consolidada, portanto, ocasionando desvantagens para a aplicação das propostas na região.

O Quadro 30 apresenta as vantagens e desvantagens da implementação das alterações viárias na região.

Quadro 30 – Vantagens e desvantagens na implementação das alterações viárias

Alterações Viárias	Vantagens	Desvantagens
Rotatória	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento de 12,59% na velocidade ● Redução de 11,16% no tempo de viagem ● Redução de 18,51% no atraso ● Redução de 41,34% no tempo parado ● Redução de 11,36% no dióxido de carbono ● Redução de 6,04% no monóxido de carbono ● Redução de 10,22% nos hidrocarbonetos ● Redução de 9,95% nos óxidos de nitrogênio ● Redução de 6,96% no material particulado 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alterações na sinalização ● Remoção do semáforo ● Construção da rotatória ● Interferências no trilho ● Desapropriação
Binário	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento de 19,49% na velocidade ● Redução de 11,78% no tempo de viagem ● Redução de 15,56% no atraso ● Redução de 11,75% no tempo parado ● Redução de 10,26% no dióxido de carbono ● Redução de 5,18% no monóxido de carbono ● Redução de 9,09% nos hidrocarbonetos ● Redução de 7,45% nos óxidos de nitrogênio ● Redução de 6,20% no material particulado 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alterações na sinalização ● Remoção da lombada ● Configuração do semáforo

Fonte: Autor (2023).

A decisão do poder público em realizar uma obra para a implementação de uma rotatória ou de um binário na região, precisa considerar as vantagens e as desvantagens para a população. Uma das variáveis de escolha é a comparação entre o custo da implementação e o benefício econômico ocasionado pelas alterações realizadas na região.

As vantagens das alterações viárias nas emissões de poluentes têm um benefício na redução de custo na área da saúde, entretanto a estimativa do valor é uma variável extremamente complexa de ser adquirida. Essa situação, faz necessário considerar somente o custo com base nos indicadores de tráfego, portanto, utilizou-se do tempo de viagem economizado em um ano pelas alterações viárias e do valor mínimo pago pela hora trabalhada no Brasil em 2023, para a estimativa do benefício econômico.

As desvantagens da implementação das alterações viárias estão relacionadas com questões que são definidas na elaboração de projetos viários e de sinalização, portanto, realizou-se a estimativa seguindo como consideração uma faixa de valores para o custo. O Quadro 31 apresenta as estimativas dos custos para a implementação das alterações viárias.

Quadro 31 – Estimativa dos custos das alterações viárias

Alterações Viárias	Estimativa do Custo	
	Vantagens	Desvantagens
Rotatória	Ganho de R\$ 71.282,00 reais por ano	Custo de R\$50.000,00 a R\$100.000,00 reais
Binário	Ganho de R\$ 75.226,00 reais por ano	Custo de R\$10.000,00 a R\$25.000,00 reais

Fonte: Autor (2023).

6. CONCLUSÃO

A microssimulação de tráfego é uma ferramenta capaz de viabilizar a realização de estudos envolvendo alterações na infraestrutura, na operação do sistema ferroviário e na atualização das tecnologias responsáveis pelas emissões de poluentes dos veículos. Essa ferramenta tem a necessidade de passar pelo processo de calibração para diminuir a diferença entre a representação da simulação com a realidade observada de uma região urbana.

O processo de calibração do cenário atual utilizou o tempo médio de viagem na região, possibilitando alcançar um erro médio estimado para a representação da realidade de 1,61% para os movimentos na rota com maior número de conflitos no entorno do terminal do Itaum. Esse resultado é motivado pelo detalhamento realizado na configuração da infraestrutura e principalmente pela configuração do modelo de car-following, responsável por representar o comportamento dos motoristas.

A elaboração de uma microssimulação calibrada para a situação observada na realidade, possibilita a realização de análises com base em uma representação fundamentada. Essa confiabilidade possibilita observar o comportamento do tráfego de uma região urbana e realizar propostas de melhorias com a implementação de alterações viárias e atualizações na tecnologia dos veículos.

O pacote de microssimulação utilizado mostrou ser capaz de realizar o levantamento dos principais indicadores de fluxo de tráfego e quantificar as emissões de poluentes provenientes dos veículos automotores. Essas estimativas das emissões são resultadas de uma modelagem matemática para cada configuração de veículo e para cada norma regulamentadora.

A elaboração dos cenários possibilitou observar que as alterações viárias e as atualizações das tecnologias reduzem as emissões dos poluentes. Esses resultados possibilitaram identificar que o benefício proporcionado pelas alterações viárias no fluxo tem impacto maior na emissão de dióxido de carbono e as atualizações dos veículos tem impacto maior nas emissões de monóxido de carbono, de hidrocarbonetos, de óxidos de nitrogênio e de material particulado.

O melhor cenário encontrado para a região é a implementação da rotatória com a atualização da frota da cidade para a tecnologia necessária para respeitar os limites estabelecidos pela norma EURO 5. Esse cenário possibilita melhorias de

20,90% no fluxo de veículos e de 47,31% nas emissões de poluentes, entretanto existe a necessidade de um estudo da viabilidade econômica para a implementação da rotatória e para a atualização da frota da cidade.

O cenário apresentou como resultado para os indicadores de fluxo uma redução de 11,16% no tempo médio de viagem, de 18,51% no atraso médio, de 41,34% no tempo parado médio e um aumento de 12,59% na velocidade dos veículos na região. Nas emissões de poluentes foi encontrado como resultado uma redução de 20,02% para o dióxido de carbono, de 45,27% para o monóxido de carbono, de 95,63% para os hidrocarbonetos, de 45,37% para os óxidos de nitrogênio e de 30,29% para o material particulado.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho passou por limitações causadas pela falta de disponibilidade em adquirir dados atualizados dos fluxos na região, das tecnologias dos veículos e do padrão de comportamento dos motoristas para a realização da microsimulação de tráfego e da calibração. Essa situação, apresenta uma gama de possibilidades de aperfeiçoamentos para serem realizados.

As sugestões propostas para os trabalhos futuros são:

- A atualização dos dados dos fluxos de veículos na região;
- A realização da calibração na estimativa das emissões de poluentes;
- O levantamento do comportamento do transporte público e dos motoristas nos sistemas de redução de velocidade;
- A adição da análise do impacto das alterações viárias na segurança da região;
- A consideração da atualização da frota da cidade para a norma EURO 6 e para veículos elétricos;
- A calibração da situação da região considerando a passagem do trem de carga;
- A realização da análise do impacto do trem na aplicação da rotatória e do binário;
- A aplicação da metodologia em outras regiões;

- A identificação do impacto da passagem do trem de carga em toda a cidade;
- A elaboração de um projeto viário e de sinalização para os cenários propostos;
- O estudo da viabilidade econômica da implementação da rotatória e da atualização da frota para as tecnologias da EURO 5.

REFERÊNCIAS

- ALEKO, D. R.; DJAHEL, S. An efficient adaptive traffic light control system for urban road traffic congestion reduction in smart cities. **Information**, v. 11, n. 2, 2020.
- ALGHAMDI, T. et al. A comparative study on traffic modeling techniques for predicting and simulating traffic behavior. **Future Internet**, v. 14, 2022.
- AMANCIO, E. C. et al. Impacto de lombadas e travessias elevadas na velocidade de veículos de passeio baseado em dados naturalísticos. **TRANSPORTES**, v. 31, n. 2, 2023.
- ARHIN, S. et al. Optimization of transit total bus stop time models. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. v. 3, n. 2, p. 146-153, 2016.
- ASTARITA, V. et al. Comparison of three methods for dynamic network loading. **Transportation Research Record**, n. 1771, p. 179-190, 2001.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of traffic simulation**. New York: Springer-Verlag New York, 2010.
- BEHRISCH, M.; ERDMANN, J.; KRAJZEWICZ, D. Adding intermodality to the microscopic simulation package SUMO. **MESM 2010**, 2010.
- BETHONICO, F. C. **Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- BITKINA, O. V. et al. Identifying traffic context using driving stress: a longitudinal preliminary case study. **Sensors**. v. 19, n. 9, 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986**. Brasília, 1986.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 2, de 11 de fevereiro de 1993**. Brasília, 1993.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 297, de 26 de fevereiro de 2002**. Brasília, 2002.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 415 de 24 de setembro de 2009**. Brasília, 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018**. Brasília, 2018b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018**. Brasília, 2018a.

BROCKFELD, E.; WAGNER, P. Testing and benchmarking of microscopic traffic flow models. **Conference on Transport Research**. Istanbul, Turkey, 2004.

BUBERGER, J. et al. Total CO₂ - equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 159, 2022.

BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ANDRÉASSON, I. **Hybrid microscopic-mesoscopic traffic simulation**. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2005.

CAPPIELLO, A. **Modeling traffic flow emissions**. 2002. Thesis (Master of Science in Transportation) - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2002.

CASCETTA, E. **Transportation system analysis**. 2th. ed. Heidelberg, London: Springer Optimization and Applications, 2009.

CAVALCANTE, A. P. H. **A arquitetura da cidade e os transportes: o caso dos congestionamentos em Fortaleza, Ceará**. 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2009.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissão veicular no estado de São Paulo**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CHAVES, C. F. **Avaliação do desempenho de medidas de acalmia de tráfego através de micro simulação de tráfego**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação). Instituto Politécnico de Viseu. Portugal. 2017.

DIAS, H. L. F. **Análise da modelagem integrada da emissão de poluentes atmosféricos provenientes de veículos transportadores de carga em área urbana**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

DIAS, H. L. F. et al. Analysis of emission models integrated with traffic models for freight transportation study in urban áreas. **International Journal Environmental Technology and Management**, v. 20, p .60-77, 2017.

DIAS, H. L. F. **Methodology for air pollution impact assessment of low emission zones in urban areas of brazil - The case study of Fortaleza**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Curso de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de projeto de interseções**. Rio de Janeiro, 2005.

DOWLING, R.; SKABARDONIS, A.; ALEXIADIS, V.; Traffic analysis toolbox volume III: guidelines for applying traffic microsimulation software. **Federal Highway Administration**, Washington DC, 2004.

ERDMANN, J. **SUMO's lane-changing model**. German Aerospace Center, Berlin, Germany, 2014.

FELIPE, A. S. et al. A importância do planejamento urbano para o desenvolvimento sustentável: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**. v. 9, n. 2, p. 171-191, 2020.

FERNANDES, J. A. et al. A simulação em probabilidades e estatística: potencialidades e limitações. **Quadrante**. v. 18, n. 1, p. 161-183, 2009.

FILHO, M. A. V. **Estudo da implantação de um binário em uma região da cidade de Joinville utilizando o software de simulação SUMO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes e Logística) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

GEISS, O. et al. Exposure to particulate matter in vehicle cabins of private cars. **Aerosol and Air Quality Research**. v.10, p. 581-588, 2010.

GRENNFELT, P. et al. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. **Ambio - A Journal of Environment and Society**, v. 49, p. 849-864, 2020.

HBEFA - HANDBOOK EMISSION FACTORS FOR ROAD TRANSPORT. **HBEFA 3.3**. 2017

HOLLANDER, Y.; LIU, R. The principles of calibrating traffic microsimulation models. **Transportation**, v. 35, n.3, p.347-362, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Frota de veículos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/pesquisa/22/28120?tipo=ranking>. Acesso em: 21 fev. 2023.

IMMERS, L. H.; STADA, J. E. **Traffic demand modelling**. Heverlee, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 1998.

JANSEN, K. L. et al. Associations between health effects and particulate matter and black carbon in subjects with respiratory disease. **Environmental Health Perspectives**. v. 112, n. 12, 2005.

KANAGARAJ, V. et al. Evaluation of different vehicle following models under mixed traffic conditions. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 104, p. 309-401, 2013

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

KRAJZEWICZ, D. et al. **Second Generation of Pollutant Emission Models for SUMO**. German Aerospace Center, Berlin, Germany, 2014.

KRAUSS, S. Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics. **Hauptabteilung Mobilität und Systemtechnik des DLR Köln**, 1998.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**. v. 11, 2019.

LOPES, T. F. A. et al. Estimativa das emissões veiculares na região metropolitana de Fortaleza, CE, ano-base 2010. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 23, n. 5, p. 1013-1025, 2018.

LOPEZ, P. A. et al. Microscopic traffic simulation using SUMO. **IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)**, 2018.

LORENTE, A. et al. Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI. **Scientific Reports**. 2019.

MANICA, F. **Polos geradores de viagens: caracterização dos percentuais das categorias de viagens geradas por um empreendimento comercial na cidade de Porto Alegre**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MENEZES, E. W.; CATALUÑA, R. Amostragem do material particulado e fração orgânica volátil das emissões em motor ciclo diesel sem a utilização de túnel de diluição. **Química Nova**, v. 31, n. 8, 2008.

MICKŪNAITIS, V.; PIKŪNAS, A.; MACKOIT, I. Reducing fuel consumption and CO₂ emission in motor cars. **Transport**. v.22, n.3, p. 160-163, 2007.

NASCIMENTO, A. R. P. **Monóxido de carbono e material particulado na atmosfera do Distrito Federal**: mapeamento espaço-temporal e processos de geração/atenuação. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Ambientais), Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

NICOLUSSI, F. H. et al. Poluição do ar e doenças respiratórias alérgicas em escolares. **Revista de Saúde Pública**. v. 48, n. 2, p. 326-330, 2014.

OGA, S.; CAMARGO, M. M. A.; BATISTUZZO, J. A. O. **Fundamentos de toxicologia**. 5ª ed. São Paulo: Atheneu Editora, p. 848, 2021.

OICA. **World vehicles in use (by country/region and type 2015-2020)**. 2023. Disponível em: <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>. Acesso em: 09 jun. 2023.

- OLIVEIRA, M. P. B. **Estudo da dispersão atmosférica e agressividade do meio em Maringá - PR por meio do modelo de dispersão aermod**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling transport**. 5. ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2011.
- OTKOVIĆ, I. I. et al. Calibration of the microsimulation traffic model using different neural network applications. **Future Transportation**, v. 3, n. 1, p. 150-168, 2023.
- PRATA, D. F. R. F. et al. Impactos causados pelo incremento da frota de veículos na cidade de Itaperuna/RJ. **Cadernos do Desenvolvimento Fluminense**. v. 17, p. 105-115, 2019.
- SOUZA, A. et al. Estudo da associação entre óxidos de nitrogênio e concentração de ozônio com parâmetros meteorológicos. **Geosul**, Florianópolis, v. 33, n. 68, p.164-183, 2018.
- SOUZA, M. C. R. et al. A influência dos compostos orgânicos voláteis nas mudanças climáticas: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, 2022.
- STORANI, F. et al. Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. **European Transport Research Review**. v.13, 2021.
- TAFFAREL, V. S. **Mobilidade urbana: análise dos fatores que causam o contínuo crescimento do uso do automóvel nas cidades brasileiras**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- TEIXEIRA, M. J. L. et al. O impacto sobre o tráfego urbano devido implantação de sistema binário de avenidas na cidade de Fortaleza/CE. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, **Anais[...]** Ouro Preto, 9 a 13 de novembro de 2015.
- TERRENOIRE, E. et al. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. **Environment Research Letters**. 2019.
- TOLEDO, G. I. F. M.; NARDOCCI, A.C. Poluição veicular e saúde da população: uma revisão sobre o município de São Paulo (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.14, n.3, 2011.
- TUCKI, K. et al. The development of electromobility in poland and eu states as a tool for management of CO₂ emissions. **Energies**. v. 12, n. 15, 2019.
- UNIÃO EUROPEIA. **Council Directive 91/441/EEC**. Bruxelas, 1991.
- VILARINHO, C. A. T. **Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Portugal, 2008.

WALLINGTON, T.J et al. Vehicle emissions and urban air quality: 60 years of progress. **Atmosphere**. v.13, 2022.

WEAVER, L. K. et al. Hyperbaric oxygen for acute carbon monoxide poisoning. **New England Journal of Medicine**, v. 347, n. 14, p. 1057-1067, 2002.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution: effects on your body**. Geneva: WHO, 2021a.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Urban health initiative: a model process for catalysing change**. Geneva: WHO, 2021b.

YANG, L. et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 18, n. 4, 2021.