

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

RODRIGO CASTRO CAMPOS

IMPACTO DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS NOS TEMPOS DE ENTREGA E
NAS EMISSÕES DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA: UM ESTUDO DE
MICROSSIMULAÇÃO COM SUMO NA REGIÃO CENTRAL DE JOINVILLE/SC

Joinville

2025

RODRIGO CASTRO CAMPOS

IMPACTO DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS NOS TEMPOS DE ENTREGA E
NAS EMISSÕES DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA: UM ESTUDO DE
MICROSSIMULAÇÃO COM SUMO NA REGIÃO CENTRAL DE JOINVILLE/SC

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

Orientadora: Dra. Francielly Hedler Staudt

Joinville

2025

RODRIGO CASTRO CAMPOS

IMPACTO DE ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS NOS TEMPOS DE ENTREGA E
NAS EMISSÕES DA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA: UM ESTUDO DE
MICROSSIMULAÇÃO COM SUMO NA REGIÃO CENTRAL DE JOINVILLE/SC

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

Joinville (SC), 27 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Dra. Francielly Hedler Staudt
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias
Professor do Centro Tecnológico de Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Maria Alejandra Maldonado Bonilla
Doutora em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos aqueles que estiveram comigo e me ajudaram a chegar
aonde eu cheguei.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus pais, Juliana e Regis por todo o apoio, carinho e puxões de orelha, foi o que me fez chegar aonde estou agora.

Quero agradecer aos meus avós, Dirceu, Gilberto, Mércia e Odiléa por sempre acreditarem em mim e me incentivarem.

E por último, mas não menos importante, ao meu irmãozinho Arthur, que me proporcionou vários momentos de descontração e alegria.

RESUMO

A logística de última milha representa o trecho final da cadeia de distribuição, responsável por conectar os centros de consolidação aos consumidores. Esse segmento é reconhecido como um dos mais onerosos e poluentes do sistema logístico urbano, devido ao alto número de deslocamentos e à ineficiência operacional decorrente de congestionamentos e restrições de estacionamento. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar alternativas para a redução de poluentes na logística de última milha, por meio de simulações comparativas entre diferentes modais e condições de tráfego. A pesquisa foi conduzida em ambiente de modelagem e simulação utilizando o software SUMO (Simulation of Urban Mobility), considerando o deslocamento de quatro modais — carro Euro 4, carro Euro 6, ciclista e pedestre — sob diferentes cenários operacionais, abrangendo situações com e sem fluxo veicular, entropico, pico, pico aleatório e pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado. A partir dos resultados, foram extraídos indicadores operacionais e ambientais, incluindo tempo de viagem, tempo perdido, consumo de combustível e emissões de CO₂, CO, HC, NOx e PMx. Os resultados demonstram diferenças expressivas entre os modais. Em média, o veículo Euro 6 apresentou reduções de 7,3% em CO₂, 66,1% em CO, 32,8% em HC, 58,4% em NOx e 7,0% em PMx em relação ao Euro 4, evidenciando ganhos ambientais robustos mesmo sob variações de tráfego. O modal ciclista mostrou-se operacionalmente competitivo, com tempo médio apenas 12% superior ao do automóvel e emissões diretas nulas, enquanto o pedestre, embora limpo, apresentou tempo de operação 84% maior, limitando sua aplicabilidade em rotas extensas. No conjunto, os resultados confirmam que a modernização tecnológica (Euro 6) e a diversificação modal (ciclista e pedestre) são estratégias efetivas para reduzir poluentes e melhorar a eficiência das entregas em áreas urbanas densas.

Palavras-chave: logística urbana; última milha; emissões; simulação.

ABSTRACT

Last-mile logistics represents the final stage of the distribution chain, connecting consolidation centers to consumers. This segment is recognized as one of the most costly and polluting components of urban logistics, due to the high number of short-distance trips, frequent stops, and operational inefficiencies caused by congestion and limited parking availability. In this context, this study analyzes alternatives for reducing pollutants in last-mile logistics through comparative simulations involving different transport modes and traffic conditions. The research was conducted using the SUMO (Simulation of Urban Mobility) software, modeling four modes — Euro 4 car, Euro 6 car, cyclist, and pedestrian — under various operational scenarios, including no traffic flow, off-peak, peak, random peak, and random peak with increased parking time. Operational and environmental indicators were extracted, including travel time, time lost, fuel consumption, and emissions of CO₂, CO, HC, NO_x, and PM_x. The results reveal significant differences across the modes. On average, the Euro 6 vehicle achieved reductions of 7.3% in CO₂, 66.1% in CO, 32.8% in HC, 58.4% in NO_x, and 7.0% in PM_x compared to the Euro 4 model, demonstrating robust environmental benefits even under varying traffic conditions. The cyclist mode showed competitive operational performance, with average travel times only 12% higher than those of the car and zero direct emissions, while the pedestrian mode, despite being environmentally clean, recorded travel times 84% longer, limiting its applicability on extended routes. Overall, the findings indicate that fleet modernization (Euro 6) and modal diversification (cyclist and pedestrian) are effective strategies for reducing pollutants and improving delivery efficiency in dense urban areas.

Keywords: urban logistics; last mile; emissions; simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bicicleta de Carga.....	26
Figura 2 - Triciclo de carga.....	27
Figura 3 - Estrutura comparativa entre o modelo de distribuição tradicional e o modelo com ELUs.....	31
Figura 4 - Fluxograma geral da metodologia.....	47
Figura 5 - Esquema de Entrega Atual da Empresa.....	51
Figura 6 - Mapa da região central de Joinville (SC).....	52
Figura 7 - Volume de Entregas Mensal.....	53
Figura 8 - Distribuição espacial dos pontos de entrega da área simulada.....	55
Figura 9 - Cruzamentos e Semáforos com Dados Fornecidos Pela Prefeitura.....	56
Figura 10 - Movimentos Contabilizados.....	57
Figura 11 - Dado base de Programação Semafórica de um cruzamento da rede.....	59
Figura 12 - Detectores Inseridos em Vias Monitoradas.....	60
Figura 13 - Rede Gerada.....	61
Figura 14 - Elementos de tráfego do SUMO.....	62
Figura 15 - Parâmetros iniciais de configuração do fluxo laranja.....	64
Figura 16 - Identificação das vias viáveis para geração de veículos aleatórios.....	65
Figura 17 - Cálculo dos anéis e setores utilizados na distribuição dos fluxos aleatórios.....	65
Figura 18 - Seleção balanceada de origens para o fluxo laranja.....	66
Figura 19 - Seleção de destinos dentro de um raio definido.....	66
Figura 20 - Criação do veículo aleatório e inserção na simulação.....	67
Figura 21 - Áreas de Atuação dos Fluxos Brancos e Laranjas.....	67
Figura 22 - Mapeamento das Áreas de Estacionamento Para Faixas e Edges.....	68
Figura 23 - Configuração da Preferência Periférica Para o Fluxo Rosa.....	68
Figura 24 - Função Responsável Pela Criação dos Veículos do Fluxo Rosa.....	69
Figura 25 - Inserção Periódica de Veículos do Fluxo Rosa no Laço Principal da Simulação.....	70
Figura 26 - Fluxos da Simulação.....	71
Figura 27 - Veículo de Entrega e Entregador Aguardando no ELU.....	71
Figura 28 - Parâmetros do vType Utilizado Para o Veículo de Entrega.....	72

Figura 29 - Tempo de <i>Warm-up</i>	74
Figura 30 - Rota do Modal Carro.....	78
Figura 31 - Rota Norte do Modal Ciclista e Pedestre	79
Figura 32 - Rota Sul do Modal Ciclista e Pedestre.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas Euro e PROCONVE.....	21
Tabela 2 - Resultados Códigos Representativos	54
Tabela 3 - Contagem de Veículos Para Cada Rota	58
Tabela 4 - Fluxos Existentes na Simulação.....	63
Tabela 5 - Métricas dos Modais Para Cada Cenário.....	76
Tabela 6 - Resultados Modal Euro 4	81
Tabela 7 - Resultados Modal Euro 6	82
Tabela 8 - Resultados Modal Bicicleta	84
Tabela 9 - Resultados Modal Pedestre	85
Tabela 10 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário Sem Fluxo.....	86
Tabela 11 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário de Pico.....	87
Tabela 12 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário de Pico Aleatório com Tempo de Estacionamento Aumentado	88
Tabela 13 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário Sem Fluxo	89
Tabela 14 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário de Pico	89
Tabela 15 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário de Pico Aleatório com Tempo de Estacionamento Aumentado	90
Tabela 16 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Sem Fluxo.....	99
Tabela 17 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Entrepico.....	99
Tabela 18 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico.....	100
Tabela 19 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico Aleatório.....	100
Tabela 20 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico Aleatório com Estacionamento Aumentado	100
Tabela 21 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Sem Fluxo.....	101
Tabela 22 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Entrepico.....	101
Tabela 23 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico.....	102
Tabela 24 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico Aleatório.....	102
Tabela 25 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico Aleatório com Estacionamento Aumentado	102
Tabela 26 - Resultados Modal Ciclista Cenário Sem Fluxo	103
Tabela 27 - Resultados Modal Ciclista Cenário Pico.....	103

Tabela 28 - Resultados Modal Ciclista Cenário Pico Aleatório.....	104
Tabela 29 - Resultados Modal Pedestre Cenário Sem Fluxo.....	104
Tabela 30 - Resultados Modal Pedestre Cenário Pico.....	105
Tabela 31 - Resultados Modal Pedestre Cenário Pico Aleatório.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Centro Aeroespacial Alemão)

ELU - Espaço Logístico Urbano

EURO - Padrões europeus de emissões veiculares

HBEFA - Handbook of Emission Factors for Road Transport

HC - Hidrocarbonetos

IEA - International Energy Agency

LE - Local de Entrega

Lx - Fase brasileira equivalente ao padrão Euro

MPx - Material Particulado (quando não especificado)

NMHC - Hidrocarbonetos Não Metano

NO - Óxido Nítrico

NO₂ - Dióxido de Nitrogênio

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

PALE - Parking Area do Local de Entrega

PHEM - Passenger car and Heavy duty Emission Model

PM ou PM_x - Material Particulado

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Similares

SINDIPEÇAS - Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

SUMO - Simulation of Urban Mobility

TraCI - Traffic Control Interface

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
1.2. JUSTIFICATIVA	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA	17
2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS E REGULAMENTAÇÃO DE EMISSÕES	19
2.3. MODAIS ATIVOS APLICADOS À ÚLTIMA MILHA	24
2.3.1 Bicicletas de Carga	25
2.3.2 Entregas a Pé	28
2.4. ESPAÇO LOGÍSTICO URBANO (ELU)	29
2.5. SIMULAÇÃO E MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	31
2.6. O SOFTWARE SUMO	34
2.6.1. Estrutura e Funcionamento do Software SUMO	35
2.6.2. Etapas de Construção da Simulação no SUMO	38
3. METODOLOGIA	46
4. ELABORAÇÃO DA SIMULAÇÃO	48
4.1. ÁREA DE ESTUDO	48
4.2. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS	50
4.2.1. Dados de Entregas Urbanas	50
4.2.2. Dados de Fluxo Veicular e Tempo Semafórico	53
4.3. SIMULAÇÃO BASE E CENÁRIOS AVALIADOS	57
4.3.1. Criação da Rede Viária e Elementos de Simulação	59
4.3.2. Criação dos Fluxos de Tráfego	61
4.3.2.1. Definição dos Fluxos de Tráfego Geral	62
4.3.2.2. Definição do Fluxo de Veículos que usam estacionamento	66
4.3.2.3. Definição do Veículo de Entrega	69
4.3.3. Cenários Simulados e Outputs Analisados	72
4.3.4. Definição das Rotas de Deslocamento	75
5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	79
5.1. CARRO EURO 4	79
5.2. CARRO EURO 6	80
5.3. BICICLETA	81
5.4. PEDESTRE	82
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
6.1. COMPARAÇÃO OPERACIONAL	84
6.2. COMPARAÇÃO AMBIENTAL	86
6.3. SÍNTESE COMPARATIVA	89
7. CONCLUSÃO	90

8. REFERÊNCIAS	93
-----------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A logística de última milha representa o estágio final da distribuição de mercadorias até o consumidor e é considerada uma das etapas mais complexas e onerosas da cadeia de suprimentos (Gevaers; Van de Voorde e Vanelslander, 2011). Segundo , essa fase concentra grande parte dos custos e dos impactos ambientais do transporte urbano, devido à multiplicidade de paradas, curtos deslocamentos e elevada exposição às condições de tráfego (Dablanc, 2007). A intensificação do comércio eletrônico e o aumento das exigências por entregas rápidas e flexíveis têm ampliado significativamente a demanda por operações de última milha nas últimas décadas (Crainic; Montreuil; Ricciardi, 2021).

O aumento do número de veículos de entrega em circulação resulta em maiores níveis de congestionamento, consumo energético e emissão de poluentes atmosféricos, contribuindo para o agravamento da poluição urbana e das emissões de gases de efeito estufa (Dablanc, 2013; Mckinnon, 2010; Rodrigues, 2013). De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2020), o setor de transporte é responsável por cerca de 24% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia, e as atividades de distribuição urbana — em especial a última milha — representam parcela significativa desse total.

Além dos impactos ambientais, a última milha enfrenta desafios operacionais e econômicos importantes, como a falta de áreas adequadas para estacionamento e carga e descarga, a baixa eficiência de rotas e o aumento dos custos de transporte, conforme discutido por Dablanc (2007). A escassez de vagas próximas aos destinos de entrega leva a paradas irregulares, maior tempo de busca e incremento das emissões devido ao funcionamento contínuo dos motores (Browne; Allen; Leonardi, 2011). Tais fatores tornam o ambiente urbano um contexto particularmente crítico para o desempenho das operações logísticas.

Nesse cenário, a busca por soluções sustentáveis e operacionais eficientes na última milha se torna uma necessidade estratégica. A literatura recente destaca o potencial de tecnologias veiculares menos poluentes, incentivos à mobilidade ativa (como o uso de bicicletas e pedestres em trechos curtos) e otimização de rotas e tempos de parada como medidas efetivas para mitigar as emissões urbanas (Melo; Baptista, 2017).

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar alternativas para a redução de poluentes na logística de última milha por meio de simulações computacionais em diferentes cenários de tráfego urbano. Para isso, utilizou-se o software SUMO (Simulation of Urban Mobility), permitindo modelar e comparar o desempenho de quatro modais distintos - carro Euro 4, carro Euro 6 (menos poluente), ciclista e pedestre - sob condições controladas de fluxo e operação. Os resultados obtidos permitem quantificar o impacto do tráfego e das tecnologias veiculares sobre as emissões e o desempenho das entregas, contribuindo para a discussão sobre estratégias sustentáveis na mobilidade urbana.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar o impacto de modais alternativos nos tempos de entrega e na redução de poluentes em operações de e-commerce realizadas em centros urbanos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar a literatura na área de logística de última milha para auxiliar na definição dos principais parâmetros a serem analisados no estudo;
- Avaliar a utilização de veículos euro 4 e 6, bicicletas de carga e pedestres na logística de última milha;
- Verificar o impacto dos estacionamentos nas operações de última milha realizadas por veículos;
- Desenvolver simulações considerando os diferentes modos e interferências utilizando microsimulação de tráfego;
- Comparar as vantagens e desvantagens de cada alternativa proposta, incluindo aspectos de emissões, consumo e tempos de entrega.

1.2. JUSTIFICATIVA

O crescimento acelerado do comércio eletrônico e a consequente expansão das entregas urbanas intensificaram os desafios logísticos nas cidades brasileiras, especialmente no que se refere à eficiência operacional e à sustentabilidade ambiental (Rodrigue; Dablanc, 2013). A etapa da última milha, responsável pelo trecho final entre o centro de distribuição e o consumidor, representa uma das fases mais onerosas e poluentes da cadeia logística, concentrando altos níveis de consumo energético, emissões e congestionamentos urbanos (Rodrigue; Dablanc, 2013).

Nesse contexto, torna-se essencial investigar alternativas capazes de reduzir os impactos ambientais sem comprometer o desempenho operacional das entregas. Soluções como o uso de veículos de padrão Euro 6, bicicletas de carga e entregas a pé vêm sendo amplamente discutidas na literatura internacional e aplicadas experimentalmente em centros urbanos, demonstrando potencial para diminuir emissões e melhorar a fluidez do tráfego (Gruber; Kihm; Lenz, 2014).

A escolha pela microssimulação de tráfego como ferramenta metodológica justifica-se pela sua capacidade de representar o comportamento individual de veículos, pedestres e ciclistas em condições controladas, permitindo avaliar de forma detalhada o efeito de diferentes cenários sobre o tempo de entrega, o consumo e as emissões. O uso do software Simulation of Urban Mobility (SUMO), aliado à interface TraCI (Traffic Control Interface) e à programação em Python, oferece flexibilidade e precisão na análise de múltiplos modais e configurações operacionais, aproximando a pesquisa da realidade das cidades contemporâneas (Krajzewicz et al., 2012; Lopez et al., 2018).

Além de contribuir para as discussões científicas na área de logística urbana sustentável, este estudo apresenta relevância prática, ao oferecer subsídios para a formulação de políticas públicas, planejamento de zonas de entrega e adoção de tecnologias veiculares mais limpas. Os resultados esperados podem auxiliar gestores públicos, operadores logísticos e pesquisadores na avaliação comparativa de estratégias que conciliem eficiência operacional e mitigação de impactos ambientais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A logística de última milha tem sido apontada como um dos elos mais onerosos e complexos da distribuição urbana, ao concentrar custos operacionais, tempos de viagem e externalidades ambientais em cenários de alta densidade e restrições de circulação (Gevaers; Van de Voorde; Vanelslander, 2011). A expansão do comércio eletrônico intensificou a frequência de entregas, elevando o volume de veículos leves em áreas centrais, com efeitos diretos sobre congestionamento, consumo de combustível e emissões atmosféricas (McKinnon, 2010; Rodrigue, 2013).

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos conceituais e técnicos que sustentam o desenvolvimento da pesquisa. São abordados, inicialmente, os princípios da logística urbana, seguidos da discussão sobre impactos ambientais e regulamentações de emissões. Na sequência, exploram-se alternativas sustentáveis aplicadas às entregas urbanas, o papel dos Espaços Logísticos Urbanos (ELUs) e, por fim, os métodos de simulação e microssimulação de tráfego, com ênfase na utilização do software SUMO como ferramenta de análise.

2.1. LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA

A logística de última milha envolve o transporte do produto desde um centro de consolidação até o consumidor final — geralmente em áreas densamente povoadas, com grande competição pelo espaço viário e elevada variabilidade de tempo e demanda (Gevaers, Van de Voorde e Vanelslander 2011, p. 28).

Segundo Rodrigue e Dablanc (2013) o aumento do número de entregas diárias, impulsionado pelo crescimento do comércio eletrônico, tem agravado a saturação viária e a ocupação de vagas em regiões centrais, tornando a operação logística um dos principais geradores de congestionamento e emissões urbanas.

Além dos custos diretos de transporte, há também custos indiretos associados ao tempo gasto na busca por estacionamento e nas restrições de circulação impostas por legislações locais. Allen, Browne e Cherrett (2012) observam que o espaço urbano raramente foi planejado para acomodar um volume tão alto de entregas fracionadas, o que resulta em interrupções do fluxo viário, aumento do tempo parado em marcha lenta e consumo energético elevado. Conforme McKinnon (2010), “a multiplicação de

veículos leves de entrega nas zonas centrais intensifica o congestionamento e as emissões de gases de efeito estufa”.

Do ponto de vista operacional, a última milha representa o trecho de maior variabilidade dentro do sistema logístico. Fatores como densidade populacional, condições de pavimento, horários de pico e infraestrutura de carga e descarga interferem diretamente no desempenho das entregas (Oliveira, 2016). Essas restrições tornam o planejamento de rotas mais complexo e reforçam a necessidade de métodos quantitativos para avaliar cenários alternativos e minimizar os impactos negativos (Golden; Wasil; Kelly, 2002).

Em muitos casos, a busca por eficiência colide com a sustentabilidade. Gevaers et al. (2011) apontam que a pressão por rapidez, característica do comércio eletrônico, leva a uma redução na consolidação de cargas e à utilização de veículos subutilizados, ampliando o número de viagens e as emissões associadas. Por outro lado, a literatura recente tem destacado soluções que conciliam desempenho e responsabilidade ambiental, como a utilização de modais não motorizados, pontos de entrega centralizados e veículos de baixa emissão (Melo; Baptista, 2017).

A importância estratégica da última milha não se limita à eficiência empresarial. Ela também reflete na qualidade de vida urbana e na sustentabilidade ambiental. Rodrigue e Dablanc (2013) argumentam que o planejamento dessa etapa deve integrar-se às políticas públicas de mobilidade, já que o espaço viário é um bem coletivo. Em linha semelhante, McKinnon (2010) defende que a mitigação de externalidades negativas requer soluções sistêmicas, nas quais logística e planejamento urbano atuem de forma coordenada. Dessa forma, compreender os fatores que compõem a última milha é essencial para projetar cidades mais inteligentes, reduzir custos e promover práticas logísticas de baixo impacto (Oliveira et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se relevante compreender de que maneira as operações de transporte urbano contribuem para as emissões de poluentes e para o aumento do consumo energético, elementos centrais na avaliação da sustentabilidade logística.

2.2. IMPACTOS AMBIENTAIS E REGULAMENTAÇÃO DE EMISSÕES

O crescimento do transporte urbano de mercadorias tem contribuído de forma significativa para a deterioração da qualidade do ar e para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Dablanc, 2007). O transporte urbano de mercadorias é responsável por aproximadamente 25% das emissões de CO₂ relacionadas ao transporte e por cerca de 30% do consumo de energia em áreas metropolitanas, evidenciando sua relevância nos impactos ambientais das cidades ERTRAC (2022). As atividades de entrega na última milha, por envolverem múltiplas paradas, trajetos curtos e operação em baixa velocidade, apresentam consumo de combustível elevado quando comparado a viagens interurbanas (Costa et al., 2019).

Com a expansão do e-commerce, aumentou a presença de veículos leves realizando entregas frequentes em ambientes urbanos densos. Holguín-Veras, Amaya-Leal e Wang (2015) destacam que esses veículos operam sob ciclos intensos de aceleração e frenagem, intensificando a emissão de poluentes como CO, NOx e PM. Tais emissões estão associadas a impactos diretos sobre a saúde pública, como doenças cardiorrespiratórias, especialmente em áreas densamente povoadas (Rodríguez, 2013; WHO, 2021). No contexto brasileiro, a circulação em vias estreitas, a escassez de vagas e os longos períodos em marcha lenta elevam ainda mais esses efeitos, ampliando a concentração de CO₂ e hidrocarbonetos em corredores urbanos de baixa dispersão (Costa et al., 2019; Oliveira, 2016).

A regulamentação das emissões surge, portanto, como ferramenta essencial de mitigação. Desde a década de 1990, a União Europeia estabeleceu padrões de controle progressivo conhecidos como normas Euro, que fixam limites máximos de emissão para automóveis e veículos comerciais leves. Segundo a ICCT (2016), a evolução dos padrões Euro tornou os motores de combustão interna significativamente mais limpos, sem comprometer sua eficiência energética.

O Euro 6, vigente desde 2014 na União Europeia, representa um dos estágios mais avançados da regulamentação, estabelecendo limites bastante rigorosos para NOx e material particulado em comparação às primeiras gerações da norma. Para cumprir esses limites, os veículos passaram a incorporar tecnologias como catalisadores de três vias mais eficientes, filtros de partículas (DPF), sistemas otimizados de recirculação de gases de escape (EGR) e sensores de oxigênio de

banda larga, capazes de ajustar a mistura ar–combustível com maior precisão (ICCT, 2016).

No Brasil, a equivalência técnica com os padrões europeus é garantida pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), instituído pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 1986. Suas fases L (L5, L6, L7 e L8) foram estruturadas para refletir níveis de exigência comparáveis ao Euro 4, Euro 5 e Euro 6, garantindo compatibilidade entre a produção industrial nacional e as tecnologias automotivas globais (CONAMA, 2022). Assim, as fases L7 e L8 correspondem funcionalmente ao Euro 6 e Euro 6d. A Tabela 1 sintetiza essa equivalência e apresenta os limites máximos de emissão definidos em cada fase, permitindo visualizar a convergência entre os dois sistemas regulatórios.

Tabela 1 - Normas Euro e PROCONVE

Fase PROCONVE (veículos leves)	Início de vigência no Brasil	Norma Euro de referência aproximada	Principais poluentes controlados	Características e avanços principais
L5	2009-2013	Entre Euro 3 e Euro 4	CO, HC, NOx, aldeídos, MP	Consolida a adoção de limites mais restritivos para veículos leves, com redução relevante de CO e HC em relação às fases anteriores e introdução de controle mais rigoroso de material particulado em motores diesel leves.
L6	2014-2021	Aproximada de Euro 5	CO, NMHC, NOx, MP, emissões evaporativas	Aproxima o padrão brasileiro ao Euro 5, com redução adicional de NOx e MP, limites específicos para hidrocarbonetos não metano (NMHC) e fortalecimento dos requisitos de durabilidade dos sistemas de controle de emissões.

L7	2022-2025	Aproximada de Euro 6 / 6d	CO, NMHC, NOx, MP, PN, emissões evaporativas	Harmoniza o Brasil com o patamar Euro 6 para veículos leves, com forte redução de NOx e MP, introdução de ensaios em condições reais de uso (RDE) e limites para número de partículas (PN), além de controles mais rígidos de emissões evaporativas.
L8 (em implementação)	A partir de 2025 (média de frota)	Aperfeiçoamento do Euro 6d	Mesmos poluentes da L7, com metas mais restritivas	Fase voltada ao cumprimento por média de frota, com metas mais exigentes de CO ₂ e poluentes locais, incentivando tecnologias de motorização mais limpas (incluindo híbridos e eletrificados) e estratégias de gestão de emissões ao longo do ciclo de vida.

Fonte: ICCT (2016), Proconve (2022)

A análise da Tabela 1 evidencia a convergência regulatória entre o PROCONVE e as normas europeias, permitindo que o Brasil acompanhe a evolução tecnológica internacional no controle das emissões veiculares. Embora os limites nacionais não reproduzam exatamente os mesmos ciclos de ensaio do Euro, as fases L6 e, sobretudo, L7 aproximam o desempenho ambiental dos veículos leves brasileiros do patamar estabelecido pelo Euro 6 em termos de controle de NOx, material particulado e emissões evaporativas.

Segundo a CETESB (2023), a transição tecnológica ocorrida entre a fase L5 (equivalente ao Euro 4) e a fase L7 (equivalente ao Euro 6) resultou, na prática, em reduções médias expressivas, com queda aproximada de 84% nas emissões de NOx, 90% no material particulado, 50% em CO e cerca de 15% em CO₂. Esses valores são obtidos a partir de medições nacionais e demonstram que os avanços regulatórios

produziram benefícios ambientais significativos mesmo em condições urbanas severas de circulação, típicas das operações de última milha.

Grande parte desse desempenho decorre do conjunto de tecnologias exigidas nas fases mais recentes do PROCONVE, como catalisadores de três vias mais eficientes, sistemas otimizados de recirculação de gases de escape (EGR), filtros de partículas (DPF) e sensores de oxigênio de banda larga. Tais dispositivos permitem manter o desempenho energético dos motores a combustão mesmo em cenários de tráfego intenso, caracterizados por paradas frequentes, curtas acelerações e longos períodos em marcha lenta. Estudos internacionais também apontam essa tendência: veículos equivalentes ao Euro 6 apresentam comportamento mais estável e emissões inferiores às de modelos Euro 3 e Euro 4 em rotas urbanas curtas e congestionadas (EEA, 2021).

No contexto brasileiro, a modernização tecnológica ainda convive com desafios estruturais. Embora veículos equivalentes ao Euro 6/L7 representem um avanço substancial na redução de poluentes, sua adoção plena depende da renovação da frota, que permanece relativamente antiga em muitas operações urbanas. Como observa Maxner (2022), a idade média elevada dos veículos de entrega limita a efetividade das políticas ambientais, retardando a substituição de modelos com desempenho inferior por tecnologias mais limpas. Esse quadro reforça a importância de programas de inspeção e manutenção, incentivos à renovação e políticas de apoio à descarbonização gradual do transporte urbano.

Levantamentos nacionais sobre a distribuição da frota por padrão de emissão indicam que a idade média dos automóveis brasileiros é de aproximadamente 11 anos e 1 mês, enquanto a frota total apresenta média de 10 anos e 10 meses (SINDIPEÇAS, 2024). Esses valores correspondem majoritariamente a veículos fabricados entre 2010 e 2014, enquadrados no PROCONVE L5, equivalente ao padrão Euro 4. Estudos apontam ainda que frotas utilizadas em operações de entrega urbana tendem a operar com veículos usados, com substituição mais lenta e maior permanência de padrões tecnológicos anteriores (ICCT, 2016).

Além da dimensão tecnológica, a eficiência ambiental das entregas urbanas depende também do dimensionamento adequado da frota e das práticas operacionais. Estudos como o de Oliveira (2016) demonstram que veículos compactos equipados com controles equivalentes ao Euro 6/L7 tendem a ser mais eficientes em entregas curtas, apresentando menor consumo de combustível e maior agilidade em áreas

centrais congestionadas quando comparados a veículos maiores ou enquadrados em fases regulatórias anteriores. Isso reforça o papel dos veículos motorizados de baixo impacto como alternativa intermediária para as operações de última milha, sobretudo em locais onde a adoção de bicicletas de carga ou de entregas a pé enfrenta limitações logísticas.

Portanto, a regulamentação de emissões, a modernização tecnológica e as estratégias operacionais são componentes complementares na mitigação dos impactos ambientais da última milha. A combinação entre uma frota mais limpa, práticas de entrega otimizadas e infraestrutura urbana adequada, como ELUs e zonas de carregamento, constitui a base para reduzir emissões sem comprometer a eficiência das operações, especialmente em áreas densas como os centros metropolitanos.

2.3. MODAIS ATIVOS APLICADOS À ÚLTIMA MILHA

Os modais ativos referem-se aos meios de transporte que dependem predominantemente da força humana para locomoção, como bicicletas, triciclos de carga e entregadores a pé. Diferentemente dos modais motorizados, eles operam sem consumo direto de combustíveis fósseis e não geram emissões locais, sendo reconhecidos como alternativas de baixo impacto ambiental e alta eficiência energética em áreas urbanas densas (MÂKAHLEH; TAAMNEH; DISSANAYAKE, 2025).

No contexto da logística de última milha, os modais ativos têm ganhado relevância devido à capacidade de acessar vias estreitas, driblar congestionamentos e operar com maior previsibilidade em regiões centrais. Segundo Kiba-Janiak e Witkowski (2019), a incorporação de meios não motorizados em redes urbanas reduz custos operacionais, emissões e conflitos viários, especialmente quando integrada a sistemas logísticos baseados em transbordo ou microconsolidação. Gruber e Lenz (2014) reforçam que bicicletas de carga e entregas a pé ampliam a eficiência operacional em percursos curtos, tornando-se alternativas competitivas em ambientes de alta densidade e grande número de destinos próximos.

A adoção de modais ativos é frequentemente vinculada a modelos específicos de redes logísticas urbanas, que permitem sua integração de forma estratégica. Entre as principais configurações, destacam-se:

- ELUs como pontos de transbordo: caminhões leves ou médios abastecem um Espaço Logístico Urbano, de onde bicicletas e entregadores a pé realizam as entregas finais, reduzindo a circulação de veículos motorizados em áreas sensíveis (OLIVEIRA, 2014; ERTRAC, 2014).
- ELU para lockers e armários inteligentes: modais ativos percorrem pequenos raios a partir do ELU para abastecer unidades de self-service pickup, reduzindo a necessidade de paradas múltiplas e melhorando a confiabilidade da distribuição (MOROZ; POLKOWSKI, 2016).
- Microhubs de bairro: estruturas menores distribuídas pela cidade permitem operações segmentadas, em que bicicletas assumem entregas em “ilhas urbanas” fora de zonas de acesso direto de caminhões (DALLA CHIARA; GOODCHILD, 2025).
- Operações porta a porta para curta distância: entregadores a pé realizam microentregas em regiões altamente adensadas, como centros históricos, áreas de pedestres e distritos comerciais com restrições à circulação motorizada (ALLEN; BROWNE; CHERRETT, 2012).

Esses arranjos demonstram que os modais ativos não atuam isoladamente, mas compõem redes logísticas híbridas, nas quais a combinação entre caminhões, veículos leves e meios não motorizados permite reduzir externalidades negativas sem comprometer a eficiência operacional.

As subseções seguintes aprofundam o uso dos principais modais ativos aplicáveis à última milha, bicicletas de carga e entregas a pé, destacando suas características, limitações e potencial de integração com estruturas logísticas urbanas como ELUs e microhubs.

2.3.1 Bicicletas de Carga

As bicicletas de carga (cargo bikes) representam uma alternativa promissora para a descarbonização da última milha, devido à sua capacidade de operar em áreas de acesso restrito, reduzir emissões e manter níveis competitivos de eficiência em entregas de pequeno porte (Gruber; Lenz, 2014; Conway et al., 2019). Segundo Gruber, Kihm e Lenz (2014), elas consistem em “veículos de duas ou três rodas projetados para o transporte de cargas leves, capazes de substituir automóveis em distâncias curtas e médias com alta eficiência energética”. A bicicleta de carga está representada na Figura 1, enquanto o triciclo de carga está na Figura 2.

Figura 1 - Bicicleta de Carga



Fonte: TurboSquid (2025)

Figura 2 - Triciclo de carga



Fonte: TurboSquid (2025)

O uso de bicicletas nas entregas urbanas vem crescendo de forma expressiva em cidades europeias como Berlim, Paris e Copenhague, onde as políticas públicas de restrição veicular e incentivo ao transporte ativo criaram condições favoráveis para sua adoção (Oliveira et al., 2020; Gruber; Kihm; Lenz, 2014).

De acordo com Conway et al. (2011), para distâncias de até 4 km, as bicicletas de carga podem reduzir o tempo total de percurso em cerca de 25% em comparação a vans, além de gerar emissões diretas nulas. Esses resultados tornam-se ainda mais significativos quando as operações são integradas a microcentros logísticos ou Espaços Logísticos Urbanos (ELUs), que funcionam como pontos de consolidação para redistribuição das entregas (Conway et al., 2011).

Oliveira et al. (2020) ressalta que a efetividade das cargo bikes depende de uma estrutura de apoio bem planejada, com rotas seguras, locais de carga e descarga e infraestrutura de abrigo. Em contextos latino-americanos, a ausência de ciclovias contínuas e o tráfego motorizado intenso ainda limitam a expansão desse modelo. Em

idades médias brasileiras, o uso de bicicletas de carga em rotas curtas pode reduzir em até 80% o consumo energético total por entrega, reforçando sua viabilidade prática (Rodrigues et al., 2023).

Do ponto de vista econômico, Gruber e Lenz (2016) identificaram que o custo operacional de uma bicicleta de carga é até 70% menor que o de um automóvel leve, considerando manutenção, energia e ocupação do espaço urbano. Esses fatores tornam as cargo bikes particularmente adequadas para entregas de alto volume e baixo peso, como pacotes de e-commerce e alimentos — tipologia presente em boa parte das operações de última milha simuladas neste estudo.

Apesar da eficiência operacional observada, a aplicação das bicicletas de carga enfrenta desafios em cidades com relevo acidentado, onde o esforço físico necessário para vencer desníveis limita a autonomia dos condutores e o desempenho das entregas, conforme apontam (Melo e Baptista, 2017). A topografia urbana é um dos principais fatores que condicionam a viabilidade das operações ciclológicas, podendo comprometer a produtividade em áreas com variações acentuadas de altitude (Melo e Baptista, 2017). Nesses casos, as bicicletas de carga assistidas eletricamente (e-cargo bikes) representam uma alternativa promissora, pois combinam baixa emissão de poluentes com maior capacidade de vencer aclives e ampliar o alcance das rotas (Gruber; Kihm; Lenz, 2014; Oliveira et al., 2020). Gruber, Kihm e Lenz (2014) destacam que o uso de assistência elétrica reduz o esforço físico do condutor sem comprometer a eficiência energética do modal, enquanto Oliveira et al. (2020) observam que, mesmo considerando o consumo adicional de energia, as e-cargo bikes mantêm desempenho ambiental superior ao de veículos motorizados em rotas urbanas curtas.

2.3.2 Entregas a Pé

O transporte a pé representa uma das alternativas mais sustentáveis na logística de última milha, caracterizando-se pela ausência de emissões diretas e pelo baixo consumo energético associado ao deslocamento humano (Makahleh et al., 2025; Dalla Chiara et al., 2025). Browne, Allen e Leonardi (2011) destacam que as entregas a pé são particularmente eficazes em áreas compactas e de alta densidade populacional, onde as distâncias médias entre clientes são curtas e as restrições de circulação veicular são frequentes.

Conway et al. (2011) destacam que o desempenho desse modal é potencializado quando integrado a sistemas de entrega multimodal, em que o transporte motorizado é responsável apenas pela movimentação até um ponto fixo (como um container ou micro-hub) e o restante do percurso é realizado a pé. Essa abordagem reduz o tráfego motorizado nas vias secundárias, melhora a fluidez viária e elimina emissões no trecho final.

Embora o alcance operacional do pedestre seja limitado, sua aplicabilidade é elevada em zonas centrais consolidadas, caracterizadas por alta densidade de vias e curtas distâncias entre pontos de entrega, que favorecem deslocamentos sequenciais sem dependência de veículos motorizados (Makahleh et al., 2025; Dalla Chiara et al., 2025). Gruber e Lenz (2016) demonstraram que, em áreas com elevada conectividade e alta concentração de destinos próximos, as entregas a pé podem reduzir o consumo energético total da operação em até 40%, desde que o trajeto seja bem planejado.

Além dos ganhos ambientais, o modal pedestre traz benefícios sociais e urbanos, como a redução do ruído, o aumento da segurança viária e a valorização do espaço público (Makahleh et al., 2025; Dalla Chiara et al., 2025). Segundo Dalla Chiara et al. (2025), “as entregas a pé contribuem não apenas para a redução das emissões e do congestionamento, mas também para restabelecer a dimensão humana da logística urbana, promovendo a convivência social e a qualidade dos espaços públicos”.

A efetividade desse modal, contudo, depende de condições urbanas adequadas e de infraestrutura de apoio, que incluam áreas de descanso, vestiários e pontos de consolidação que assegurem boas condições de trabalho e eficiência operacional (Dalla Chiara et al., 2025; Oliveira et al., 2020). Esses espaços, denominados Espaços Logísticos Urbanos (ELUs), são abordados na próxima seção como elemento central de suporte às operações sustentáveis de última milha.

2.4. ESPAÇO LOGÍSTICO URBANO (ELU)

Além da tecnologia embarcada, a gestão operacional tem papel determinante: Gevaers, Van de Voorde e Vanelslender (2011) demonstram que a simples otimização de rotas e a redução do tempo de marcha lenta podem diminuir as emissões de CO₂ em até 20% por entrega, mesmo utilizando veículos convencionais. Oliveira (2016) afirma que os Espaços Logísticos Urbanos (ELUs) surgem como uma estratégia

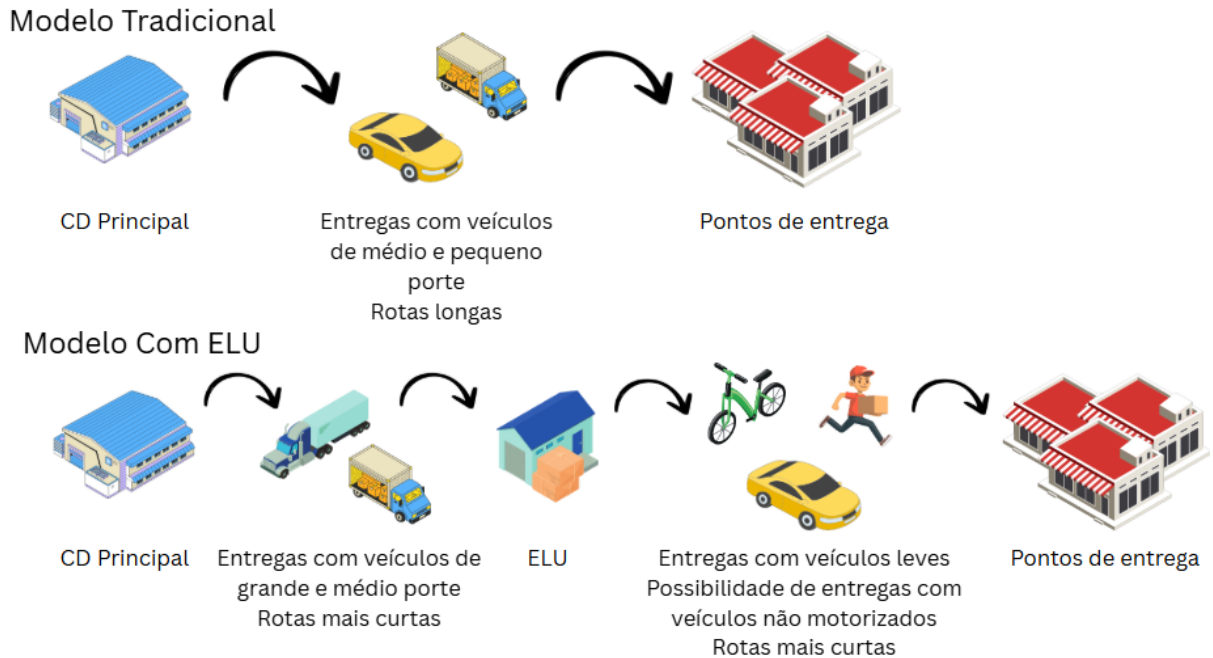
capaz de reduzir os impactos ambientais e operacionais associados à logística de última milha, promovendo maior eficiência na distribuição urbana de mercadorias.

Segundo Oliveira (2016), os ELUs têm como principal função “otimizar o processo de entrega nas áreas urbanas, atuando como hubs intermediários que possibilitam a racionalização dos deslocamentos, reduzindo o tempo de circulação e o consumo energético nas vias urbanas. Oliveira (2016) reforça que a localização estratégica desses espaços é determinante para seu desempenho, sendo necessário que estejam próximos aos polos de demanda e bem conectados às vias arteriais da cidade, de modo a garantir eficiência operacional e sustentabilidade ambiental.

O conceito de ELU está intimamente ligado à ideia de microconsolidação urbana, na qual grandes cargas são fracionadas em pequenos volumes antes de seguir para o destino final. Em cidades europeias como Paris e Londres, essa prática vem sendo aplicada desde a década de 2000, resultando na redução do tráfego de veículos pesados e das emissões urbanas (Boudoin, 2009; APUR, 2016; Lamas-Fernandez et al., 2023). De acordo com Lamas-Fernandez et al. (2023), experiências com sistemas de microconsolidação em Londres demonstraram reduções significativas no número de veículos em circulação nas áreas centrais, com reflexos positivos na qualidade do ar e na utilização do espaço urbano.

No contexto brasileiro, a implementação dos Espaços Logísticos Urbanos (ELUs) ainda é incipiente, mas vem ganhando relevância à medida que as cidades enfrentam problemas crescentes de mobilidade e poluição. Oliveira (2016) aponta que as principais barreiras estão relacionadas à falta de planejamento urbano integrado e à escassez de áreas disponíveis para implantação de hubs logísticos. Em geral, os modelos de entrega sem ELUs seguem uma estrutura descentralizada, em que os veículos de carga partem diretamente dos centros de distribuição periféricos até os pontos de entrega, resultando em maior tempo de percurso e tráfego de veículos pesados nas vias centrais. Já as operações que utilizam ELUs adotam um modelo de microconsolidação, no qual as cargas são fracionadas em volumes menores e transferidas para veículos leves, bicicletas de carga ou entregadores a pé, otimizando os deslocamentos finais. Costa e Soares (2019) destacam que, em simulações aplicadas a cidades como São Paulo e Curitiba, a criação de centros de consolidação urbana poderia reduzir em até 30% o número de viagens de carga, além de diminuir o tempo total de operação e o consumo de combustível. A Figura 3 mostra a estrutura comparativa entre o modelo tradicional e o modelo com ELUs.

Figura 3 - Estrutura comparativa entre o modelo de distribuição tradicional e o modelo com ELUs



Fonte: Adaptado de Oliveira (2014)

Os benefícios ambientais dos ELUs são amplamente reconhecidos. Segundo Gruber, Kihm e Lenz (2014), a redistribuição de cargas a partir de micro-hubs urbanos permite substituir até metade das entregas motorizadas por bicicletas de carga, o que “resulta em uma expressiva redução das emissões de CO₂ e melhora significativa da qualidade do ar”. Além disso, esses espaços podem ser utilizados como pontos de recarga para frotas elétricas, ampliando o potencial de descarbonização do transporte urbano (Melo; Baptista, 2017).

Desse modo, os Espaços Logísticos Urbanos configuram-se como elementos fundamentais para o avanço da mobilidade sustentável e para o equilíbrio entre eficiência e impacto ambiental na última milha. Ao centralizar o ponto de partida e retorno das rotas, o ELU possibilita a integração entre diferentes modais e a redução das distâncias percorridas por veículos motorizados, contribuindo para um sistema de distribuição mais limpo e racional.

A seção seguinte aborda a microssimulação de tráfego e o funcionamento do software SUMO, ferramenta utilizada para avaliar os impactos operacionais e ambientais deste trabalho.

2.5. SIMULAÇÃO E MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A simulação de tráfego é amplamente utilizada na engenharia de transportes para representar e analisar o comportamento dos sistemas viários em diferentes condições operacionais. Segundo Barceló (2010), trata-se de uma ferramenta capaz de modelar o comportamento dinâmico dos fluxos de tráfego, considerando as variáveis que afetam a operação e o desempenho das redes viárias. Bethonico (2016) acrescenta que a simulação permite avaliar cenários complexos e identificar gargalos antes da implementação real das intervenções, reduzindo custos e riscos associados ao planejamento urbano.

No contexto da logística urbana, a simulação é essencial para compreender como o fluxo de veículos, pedestres e ciclistas se comporta em áreas densamente ocupadas, onde restrições de tráfego, tempo de parada e disponibilidade de vagas afetam diretamente a eficiência das entregas. De acordo com Behrisch et al. (2011) e Lopez et al. (2018), o uso de simulações computacionais possibilita quantificar indicadores de desempenho, como tempo de viagem, emissões e atrasos, servindo como base para a tomada de decisão em projetos voltados à mobilidade sustentável.

A modelagem do tráfego pode ser realizada em três níveis: macroscópico, mesoscópico e microscópico, cada um com diferentes graus de detalhamento. A abordagem macroscópica considera o fluxo de forma agregada, utilizando variáveis médias como densidade, volume e velocidade (Barceló, 2010). A mesoscópica combina elementos das duas extremidades, agrupando veículos em entidades representativas, mas mantendo algumas interações individuais (Burghout; Koutsopoulos; Andréasson, 2005). Já a microscópica, ou microssimulação, representa cada veículo de forma individual, permitindo definir parâmetros como aceleração, tempo de reação e mudança de faixa (Astarita et al., 2012).

A escolha entre essas abordagens depende do objetivo e da escala do estudo. Como explicam Fernandes et al. (2009), a microssimulação exige maior capacidade computacional e calibração detalhada, mas oferece o mais alto nível de realismo, sendo ideal para análises de mobilidade urbana de curta escala. Nesse contexto, o presente trabalho adota a simulação microscópica para representar o ambiente urbano de entrega de mercadorias e avaliar, com base em parâmetros reais, o desempenho dos diferentes modais, incluindo automóvel, bicicleta e pedestre, em cenários representativos da última milha.

De acordo com Astarita et al. (2012), a microssimulação busca reproduzir o movimento de cada veículo em intervalos discretos de tempo, considerando variáveis dinâmicas do fluxo, como aceleração, frenagem e mudança de faixa. Essa abordagem permite capturar fenômenos de curta escala que os modelos agregados não conseguem representar, como o impacto de manobras de estacionamento, cruzamentos semaforizados e interferências de pedestres sobre o tráfego motorizado.

Essa granularidade torna a microssimulação especialmente útil para avaliar estratégias de mobilidade em áreas urbanas densas, onde a heterogeneidade dos deslocamentos influencia diretamente o desempenho do sistema (Barceló, 2010).

A estrutura da microssimulação baseia-se em submodelos matemáticos que descrevem o comportamento dos agentes. Entre os principais modelos comportamentais, destacam-se o car-following, responsável por representar a distância segura entre veículos em movimento; o lane-changing, que define a decisão de troca de faixa com base nas condições de tráfego; e o gap-acceptance, que determina o momento em que um veículo aceita ou rejeita uma brecha para entrar em uma via (Barceló, 2010; Krajzewicz et al., 2012). Cada submodelo utiliza parâmetros calibráveis, como tempo de reação, aceleração máxima e imperfeição de condução, ajustando-se ao contexto estudado. Krauss (1998) desenvolveu um dos modelos de car-following mais amplamente utilizados em ferramentas de simulação, baseado na premissa de que os motoristas buscam a maior velocidade possível sem comprometer a segurança do fluxo. O modelo define a velocidade segura do veículo seguidor conforme a Equação (1):

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

Em que τ representa o tempo de reação (s), b a desaceleração máxima (m/s^2), $v_{leader}(t-1)$ a velocidade do veículo líder no instante anterior (m/s) e $g_{leader}(t-1)$ a distância entre os veículos no mesmo instante. Essa formulação é amplamente empregada em simuladores microscópicos, incluindo o SUMO, por combinar realismo e estabilidade numérica (Barceló, 2010; Krauss, 1998).

A principal vantagem da microssimulação é a capacidade de analisar o desempenho do sistema a partir de medidas como tempos de viagem, formações de filas e emissões instantâneas de poluentes. De acordo com Krajzewicz et al. (2014),

os resultados obtidos por esse tipo de modelagem “proporcionam uma visão detalhada das condições operacionais, permitindo quantificar de forma precisa o impacto de alterações viárias ou tecnológicas”. Essa precisão é particularmente importante para estudos voltados à sustentabilidade urbana, em que pequenas variações de fluxo e parada influenciam diretamente o consumo energético e as emissões de CO₂.

Por outro lado, a microssimulação requer um conjunto significativo de dados para sua calibração, bem como maior capacidade computacional para processar as interações em tempo discreto. Fernandes et al. (2009) destacam que o nível de detalhamento exigido é proporcional à complexidade da rede e ao objetivo do estudo, devendo-se equilibrar o realismo da modelagem com a viabilidade operacional. Ainda assim, a flexibilidade dessa abordagem permite representar múltiplos modais de forma integrada, o que a torna adequada para pesquisas sobre logística urbana e entregas de última milha.

No contexto deste trabalho, a microssimulação foi adotada por sua capacidade de representar o comportamento individual dos agentes logísticos e reproduzir fenômenos típicos da operação urbana, como tempos de parada, interferência entre modais e ocupação de vagas de estacionamento. Essa abordagem possibilitou analisar, com alto nível de precisão, os impactos de diferentes estratégias de entrega sobre o tempo de percurso, o consumo de combustível e as emissões de poluentes, fornecendo base para a comparação entre os cenários propostos.

Diversos softwares podem ser utilizados para a simulação microscópica do tráfego, como VISSIM, Aimsun, TransModeler e SUMO (Simulation of Urban Mobility). Cada um apresenta particularidades em relação à interface, modelagem de comportamento e capacidade de integração com outras ferramentas. Neste trabalho, optou-se pelo uso do SUMO, por se tratar de um software livre, amplamente documentado e validado em estudos acadêmicos, cujo funcionamento é detalhado no tópico seguinte.

2.6. O SOFTWARE SUMO

O Simulation of Urban Mobility (SUMO) é um software de código aberto desenvolvido pelo Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), o Centro Aeroespacial Alemão, com o objetivo de oferecer uma plataforma de simulação

microscópica de tráfego flexível e amplamente aplicável a estudos de transporte urbano. Criado originalmente em 2001, o SUMO consolidou-se como uma das ferramentas mais utilizadas em pesquisas acadêmicas, por permitir representar com elevado nível de detalhe a dinâmica de veículos, pedestres, ciclistas e sistemas de transporte público dentro de uma rede viária complexa (Krajzewicz et al., 2014).

Segundo Behrisch, Erdmann e Krajzewicz (2010), “o SUMO foi concebido para oferecer uma modelagem aberta, modular e transparente, capaz de representar tanto situações isoladas de tráfego quanto sistemas urbanos inteiros”. Essa característica o torna ideal para estudos que envolvem avaliação de políticas públicas de mobilidade, simulação de tecnologias veiculares, gestão de fluxos urbanos e, como neste trabalho, análises ambientais relacionadas às emissões da logística de última milha.

A principal vantagem do SUMO está na combinação entre precisão microscópica e adaptabilidade computacional. O modelo é baseado em intervalos discretos de tempo (geralmente de 1 segundo), o que permite capturar o comportamento individual dos agentes e suas interações em nível de faixa, cruzamento e parada. Além disso, o software oferece suporte a diferentes modelos de direção (car-following), ultrapassagem (lane-changing), aceitação de brechas (gap-acceptance) e emissão de poluentes, com base em bancos de dados como o Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) e o Passenger Car and Heavy Duty Emission Model (PHEM) (Krajzewicz et al., 2014).

Outro aspecto relevante é o fato de o SUMO ser multiplataforma e extensível, permitindo integração com linguagens de programação, como Python e C++, e ferramentas complementares, como o TraCI. Essa capacidade de integração permite modelagens mais avançadas, que exigem controle dinâmico do tráfego ou inserção de eventos aleatórios em tempo real (Behrisch et al., 2011; Krajzewicz et al., 2012).

Essa versatilidade justifica sua ampla adoção em universidades, centros de pesquisa e instituições públicas de planejamento urbano (Lopez et al., 2018). No presente trabalho, o SUMO foi escolhido por reunir as características necessárias para a análise comparativa entre modais de transporte urbano - veículo Euro 4, veículo Euro 6, bicicleta e pedestre - e por possibilitar a medição de parâmetros ambientais, operacionais e temporais.

2.6.1. Estrutura e Funcionamento do Software SUMO

O SUMO é composto por um conjunto de módulos integrados que permitem criar, executar e analisar simulações de tráfego em diferentes níveis de complexidade. Sua estrutura é baseada em arquivos de entrada e saída em formato XML, o que garante portabilidade e fácil manipulação por outras ferramentas (Behrisch et al., 2011; DLR, 2025). Essa arquitetura modular permite que cada aspecto da simulação (rede, rotas, agentes, configurações e resultados), seja tratado de forma independente e customizável.

Segundo Lopez et al. (2018), a estrutura típica de uma simulação no SUMO é organizada em três blocos fundamentais:

1. a rede viária, que define o ambiente físico da simulação;
2. os agentes e fluxos de tráfego, que representam o comportamento e os percursos dos veículos e pedestres; e
3. o arquivo de configuração, que integra todos os elementos e controla a execução do experimento.

A rede viária é representada por meio do arquivo `net.xml`, que descreve todos os elementos geométricos e operacionais das vias, como cruzamentos, sentidos de tráfego, limites de velocidade e número de faixas. Essa rede pode ser criada manualmente, utilizando o editor gráfico `netedit`, ou gerada automaticamente a partir de dados geográficos extraídos de plataformas como o OpenStreetMap (OSM). Em ambos os casos, a malha viária é convertida para um formato compatível com o SUMO por meio do comando `netconvert`, que processa informações topológicas e converte os elementos de georreferenciamento em entidades simuláveis (Behrisch et al., 2010).

As rotas e os fluxos são definidos em arquivos separados, geralmente nomeados como `rou.xml` (do inglês `route`). Neles são descritos os tipos de veículos (`vType`), os itinerários de deslocamento e as taxas de inserção no sistema. Esses parâmetros permitem representar desde um único agente (como no caso de rotas de entrega individualizadas) até cenários com milhares de veículos circulando simultaneamente. Para complementar, arquivos adicionais (`add.xml`) podem incluir elementos como semáforos, sensores, `parking areas` (áreas de estacionamento), pontos de ônibus e estações de transporte público (Behrisch et al., 2011; DLR, 2025).

O arquivo de configuração principal, com extensão `sumocfg`, integra todos os componentes anteriores. É nesse arquivo que se definem os parâmetros globais da simulação, como tempo total de execução, intervalos de coleta de dados e modelos de emissão utilizados. O `sumocfg` atua, portanto, como um “guia” que indica ao simulador quais arquivos devem ser carregados e quais módulos adicionais serão ativados durante a execução, conforme descrito na documentação oficial do DLR (2025).

O funcionamento interno do SUMO baseia-se em uma lógica microscópica e temporalmente discreta, em que cada agente é atualizado em passos fixos de tempo (geralmente de 1 segundo). Durante cada iteração, o simulador recalcula a posição, a velocidade e a aceleração de cada veículo, considerando o comportamento dos motoristas, as condições de tráfego e as restrições da via (Krajzewicz et al., 2014). Essa abordagem permite capturar fenômenos como formação de filas, mudanças de faixa, tempo de espera em semáforos e variações de velocidade média com elevada precisão.

Além da representação comportamental, o SUMO inclui módulos ambientais que estimam as emissões de poluentes e o consumo de combustível. Tais cálculos baseiam-se em modelos consolidados, como o HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) e o PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model), permitindo a obtenção de indicadores como CO_2 , CO, HC, NO_x , PM_x e combustível consumido (Cappiello, 2002; Krajzewicz et al., 2014). Esses módulos foram essenciais no presente trabalho, pois possibilitaram a quantificação e a comparação direta das emissões entre os diferentes modais e cenários de tráfego simulados.

O software também disponibiliza diversos arquivos de saída (outputs), os quais contêm informações detalhadas sobre o comportamento dos agentes e os indicadores de desempenho. Entre os principais, destacam-se:

- `tripinfo.xml`: armazena o tempo total de viagem, distância percorrida, `timeLoss` (tempo perdido), velocidade média e tempo de parada de cada veículo ou pedestre;
- `emission.xml`: reúne as emissões instantâneas e acumuladas por tipo de poluente;

Embora o SUMO seja suficientemente robusto para simular cenários complexos de tráfego, no seu funcionamento padrão os eventos e fluxos são previamente definidos antes da execução da simulação. Para estudos que demandam dinamismo operacional, como a inserção de fluxos aleatórios ou o controle adaptativo de estacionamento, torna-se necessária a integração com ferramentas externas. Nesse contexto, o uso da biblioteca TraCI (uma interface Python nativa do SUMO) permite controlar e modificar a simulação em tempo real, viabilizando experimentos mais realistas e interativos (Lopez et al., 2018).

Assim, a estrutura modular e a flexibilidade de integração do SUMO com o TraCI foram determinantes para sua adoção no presente trabalho, no qual o simulador foi utilizado em conjunto com scripts em Python para gerar fluxos aleatórios, controlar comportamentos de estacionamento e representar com fidelidade o ambiente urbano do centro de Joinville.

2.6.2. Etapas de Construção da Simulação no SUMO

A elaboração de uma simulação no Simulation of Urban Mobility (SUMO) segue uma sequência metodológica que combina modelagem espacial, definição de agentes, configuração de fluxos e calibração de parâmetros operacionais. Nas próximas seções serão apresentadas em mais detalhes cada uma destas etapas.

2.6.2.1. Modelagem da rede viária e do ambiente urbano

A modelagem da rede viária é a etapa fundamental em qualquer processo de microsimulação, pois define a estrutura espacial onde os agentes irão se deslocar. No Simulation of Urban Mobility (SUMO), as redes são formadas por nós (nodes) e conexões (edges), que representam, respectivamente, interseções e segmentos viários. Cada elemento pode conter informações detalhadas, como limite de velocidade, número de faixas, sentidos de circulação, inclinações, tipos de via e permissões de tráfego por categoria de agente (passenger, bus, bicycle, pedestrian etc.) (Behrisch; Erdmann; Krajzewicz, 2010; DLR, 2025).

Segundo Behrisch, Erdmann e Krajzewicz (2010), “a precisão geométrica e topológica da rede influencia diretamente a validade dos resultados simulados, uma vez que pequenas incoerências estruturais podem alterar significativamente o

comportamento do tráfego e a geração de emissões”. Assim, a construção de uma rede confiável exige o tratamento cuidadoso de dados espaciais e a calibração dos atributos físicos de cada via.

A geração das redes no SUMO pode ocorrer a partir de fontes geográficas abertas, como o OpenStreetMap (OSM), ou ser elaborada manualmente no editor visual netedit. O primeiro método é amplamente adotado em pesquisas urbanas por permitir a importação direta de mapas reais, otimizando o tempo de modelagem e assegurando compatibilidade com coordenadas geográficas. Após a conversão, o arquivo resultante (.net.xml) pode ser ajustado para incluir faixas de pedestres, semáforos, estacionamentos e vias bidirecionais, utilizando o aplicativo Netedit.

De acordo com Barceló (2010), o processo de modelagem deve buscar o equilíbrio entre realismo geométrico e desempenho computacional, visto que redes excessivamente detalhadas aumentam o tempo de processamento e podem inviabilizar simulações complexas. A partir dessa base, o pesquisador define os elementos complementares, como áreas de estacionamento, faixas exclusivas, ciclovias e calçadas, que caracterizam o ambiente urbano e influenciam a interação entre diferentes modais. Após a construção da rede viária e a configuração de suas conexões, interseções e áreas de estacionamento, o passo seguinte em uma microsimulação consiste na definição das rotas.

2.6.2.2. Implementação das rotas no SUMO

Após a modelagem da rede e do ambiente, a etapa seguinte da microsimulação consiste na implementação das rotas, responsáveis por definir o percurso que cada agente seguirá ao longo da rede. Essa etapa é essencial para garantir coerência entre o traçado viário e o comportamento de deslocamento dos modais, possibilitando a avaliação de desempenho operacional, consumo energético e emissões ao longo de trajetos definidos.

No SUMO, as rotas são normalmente especificadas no arquivo .rou.xml ou geradas automaticamente por ferramentas como o DUAROUTER (Dynamic User Assignment Router), que calcula o caminho ótimo entre dois pontos com base na topologia da rede, restrições de sentido, velocidades máximas e parâmetros de custo definidos pelo usuário (Krajzewicz et al., 2012). O DUAROUTER utiliza algoritmos

clássicos de otimização de rotas, como Dijkstra e A* (A-estrela), permitindo o cálculo de trajetos mínimos em distância, tempo ou custo energético.

De acordo com Barceló (2010), a modelagem das rotas em simulações microscópicas “deve considerar não apenas o menor caminho, mas também fatores como tempo de viagem, congestionamento e prioridade de tráfego”, de modo a representar adequadamente as decisões reais de deslocamento. Essa flexibilidade é particularmente relevante em estudos urbanos, onde a sobreposição de diferentes modais pode alterar a fluidez e a competitividade entre rotas alternativas.

As rotas também podem ser configuradas de forma dinâmica, por meio da interface TraCI, que permite reatribuir trajetos durante a execução da simulação com base em condições instantâneas, como congestionamentos, bloqueios viários ou ausência de vagas de estacionamento (DLR, 2025; Krajzewicz et al., 2012). Segundo Krajzewicz et al. (2012, p. 132), “usando o TraCI, o usuário pode adaptar a simulação em tempo real, alterando rotas de veículos, programas semaforicos ou outros parâmetros durante a execução”, o que confere à simulação capacidade de resposta imediata e aproxima o comportamento dos agentes da variabilidade observada no tráfego real.

A partir dessas configurações — rotas estática e ajustes dinâmicos via TraCI, o SUMO possibilita construir cenários de simulação em que o desempenho dos modais pode ser avaliado sob diferentes condições de tráfego. O próximo passo é a definição dos agentes e dos fluxos de tráfego.

2.6.2.3. Definição dos agentes e dos fluxos de tráfego

Os agentes da simulação são responsáveis por representar os diferentes modais e comportamentos presentes no ambiente urbano. No SUMO, eles são descritos no arquivo de rotas (route file – .rou.xml), onde são definidos parâmetros como aceleração, desaceleração, velocidade máxima, modelo de seguimento (car-following), comprimento, tempo de reação e classe de emissão veicular (Krajzewicz et al., 2012). Cada agente é associado a um tipo de veículo (vType), que agrupa suas propriedades físicas e comportamentais. Essa estrutura permite a inclusão de diversos perfis de mobilidade, abrangendo automóveis leves, caminhões, bicicletas e pedestres, todos interagindo dentro de uma mesma malha viária.

A representação individual de cada agente torna possível capturar fenômenos como filas, variações de velocidade e tempos de espera em interseções Barceló (2010).

Os fluxos de tráfego, por sua vez, determinam a frequência, a origem, o destino e o horário de inserção dos agentes na rede. Tradicionalmente, esses fluxos são definidos no mesmo arquivo .rou.xml, por meio da descrição de rotas fixas ou aleatórias e da taxa de geração de veículos (Krajzewicz et al., 2012).

Entretanto, em aplicações que exigem a geração de fluxos dinâmicos, é possível complementar a definição dos fluxos utilizando a interface TraCI (Traffic Control Interface). Essa ferramenta permite controlar a simulação em tempo real através de linguagens como Python, possibilitando a inserção, remoção e redirecionamento de agentes conforme eventos específicos, como destacado por Lopez et al. (2018), que apontam a flexibilidade do TraCI para o controle dinâmico e interativo da simulação. Tal integração oferece flexibilidade para representar variações temporais de tráfego, condições estocásticas e padrões de saturação não determinísticos, reproduzindo de forma mais realista as flutuações do ambiente urbano (Behrisch et al., 2011; Krajzewicz et al., 2012).

Além disso, o TraCI permite substituir abordagens puramente aleatórias, como as obtidas com o randomTrips.py, garantindo maior controle sobre parâmetros como densidade, tipo de veículo e frequência de inserção (DLR, 2025; Behrisch et al., 2011). Lopez et al. (2018) ressaltam que o uso de fluxos calibrados e controlados externamente “proporciona maior realismo às análises e melhora a representatividade dos efeitos de congestionamento e emissões nas áreas urbanas”.

Assim, a combinação entre arquivos estáticos (.rou.xml) e controle dinâmico via TraCI constitui uma abordagem híbrida de modelagem, utilizada no presente trabalho. Essa integração une a reprodutibilidade dos parâmetros fixos à flexibilidade de adaptação comportamental, permitindo representar com maior fidelidade as interações entre diferentes modais e as variações temporais típicas do tráfego urbano.

2.6.2.4. Modelagem e funcionamento do estacionamento

A modelagem do estacionamento constitui um elemento essencial nas simulações voltadas à logística de última milha, em que as operações de parada, carga e descarga influenciam diretamente o tempo de viagem, o congestionamento e

o consumo de combustível. No contexto da microssimulação, o estacionamento é representado por áreas específicas da rede, denominadas área de estacionamento, que possuem número limitado de vagas, tempos de ocupação configuráveis e regras de acesso definidas (Krajzewicz et al., 2012).

Essas áreas podem estar localizadas em diferentes pontos da malha viária, simulando tanto vagas públicas quanto zonas reservadas para operações logísticas. Segundo Lopez et al. (2018), a representação explícita das áreas de estacionamento “permite capturar o impacto espacial e temporal das manobras de parada e saída dos veículos”, tornando a simulação mais próxima da realidade operacional observada nas cidades.

No SUMO, cada área de estacionamento é declarada no arquivo de rede (.net.xml) ou em arquivos auxiliares (.add.xml), vinculada a um segmento de via (edge). O parâmetro *capacity* define o número máximo de vagas disponíveis, enquanto o *lane* indica a faixa de estacionamento e o *startPos* e *endPos* delimitam o espaço físico que a área ocupa na via, conforme descrito na documentação do DLR (2025). Essa estrutura possibilita o controle preciso do uso do espaço viário, permitindo representar desde bolsões de estacionamento até zonas de carga rápida.

Os veículos que possuem paradas programadas (*stops*) em uma área de estacionamento interrompem temporariamente o percurso e ocupam uma vaga durante o período especificado. Caso todas as vagas estejam ocupadas, o comportamento padrão do SUMO é direcionar o agente a aguardar em fila ou prosseguir conforme a definição de sua rota (DLR, 2025). Essa dinâmica reproduz a competição por espaço nas áreas urbanas, sendo particularmente relevante para a modelagem de entregas de curta duração (Oliveira, 2016).

A representação do estacionamento “é indispensável para compreender os efeitos locais de saturação, tanto sobre a fluidez viária quanto sobre os tempos de viagem” (Barceló, 2010). Estudos de microssimulação, como o de Oliveira (2016), evidenciam a influência significativa do tempo de estacionamento sobre a eficiência operacional. Em análises internacionais, Allen, Browne e Cherrett (2012) apontam que as atividades de procura por vagas e descarga podem representar até um terço do tempo total de entrega em áreas comerciais densas. Por esse motivo, a configuração das áreas de estacionamento é uma variável crítica na avaliação de estratégias logísticas sustentáveis.

A flexibilidade do SUMO também permite combinar a modelagem estática das área de estacionamento com o controle dinâmico via TraCI, de modo a reproduzir situações mais complexas, como vagas temporariamente bloqueadas, ocupações aleatórias ou alterações no número de vagas disponíveis durante o dia. Por meio do TraCI, é possível “modificar objetos da simulação, como semáforos, rotas ou áreas de estacionamento, durante a execução, possibilitando reações realistas às mudanças nas condições urbanas” (DLR, 2025).

Além disso, a utilização de scripts complementares em Python amplia as possibilidades analíticas, permitindo monitorar a taxa de ocupação, o tempo médio de permanência e a rotatividade de vagas (Lopez et al., 2018). Em seguida é a calibração e a validação dos resultados.

2.6.2.5. Calibração e validação dos resultados

A calibração e a validação asseguram que os resultados obtidos sejam representativos das condições reais de operação. Segundo Barceló (2010), a calibração “é o processo pelo qual os parâmetros do modelo são ajustados até que o comportamento simulado reproduza, com razoável precisão, os padrões observados empiricamente”. Essa etapa visa reduzir discrepâncias entre o sistema real e o modelo computacional, garantindo maior confiabilidade às análises realizadas.

No SUMO, o processo de calibração envolve principalmente a definição de parâmetros comportamentais dos veículos, como aceleração máxima, desaceleração, tempo de reação, distância mínima de seguimento (minGap) e headway, que influenciam diretamente o desempenho da microssimulação (KRAJZEWICZ et al., 2012). Esses parâmetros devem ser ajustados de forma iterativa até que o comportamento dos veículos simulados se aproxime do comportamento registrado nas condições reais.

Diversos métodos podem ser empregados no processo de calibração. Uma abordagem amplamente utilizada consiste em ajustar os parâmetros do modelo até minimizar a diferença entre valores simulados e observados para indicadores como tempos médios de viagem, volumes de tráfego, comprimento de filas e tempos de parada - estratégia presente no Traffic Analysis Toolbox da FHWA (DOWLING; SKABARDONIS; ALEXIADIS, 2004). Estudos mais recentes também empregam

algoritmos de busca automática, heurísticas ou modelos de aprendizado de máquina para acelerar esse processo em redes mais complexas (OTKOVIĆ et al., 2023).

No contexto brasileiro, Vilarinho (2008) propõe a calibração a partir da comparação entre tempos médios de viagem obtidos em campo e valores resultantes da simulação, utilizando como métrica a diferença percentual entre ambos. O TCC de Okonski (2023), aplicado ao contexto urbano de Joinville, segue abordagem semelhante e adota como referência um erro máximo de aproximadamente 10% para aceitar o ajuste do modelo, considerando esse valor adequado para estudos de tráfego urbano com variabilidade operacional significativa. Essa mesma ordem de grandeza (entre 5% e 15%) é frequentemente relatada na literatura como aceitável para a validação de modelos microscópicos, desde que devidamente justificada (DOWLING; SKABARDONIS; ALEXIADIS, 2004; HOLLANDER, 2016).

Após a calibração, procede-se à validação do modelo, etapa em que os resultados simulados são comparados a dados reais ou a valores de referência obtidos na literatura. Segundo Barceló (2010), a simulação “só adquire valor científico quando os resultados são medidos, comparados e interpretados de forma sistemática”. De acordo com Hollander (2016), a validação “confirma a capacidade do modelo de reproduzir o comportamento observado no mundo real dentro de margens de erro aceitáveis”. Essa verificação pode abranger métricas como volume de tráfego, tempo médio de viagem, consumo de combustível e emissões de CO₂, garantindo que o modelo não apenas funcione tecnicamente, mas também apresente coerência.

A etapa de análise dos resultados constitui o elo final do processo de microsimulação, permitindo a quantificação dos efeitos operacionais e ambientais dos cenários avaliados. Assim, a fase de coleta de dados no SUMO tem como finalidade transformar o comportamento dinâmico dos agentes em indicadores mensuráveis, capazes de sustentar a análise comparativa entre estratégias logísticas e alternativas de mobilidade.

O SUMO disponibiliza diversos arquivos de saída (output files) que registram, em formato estruturado (.xml), informações detalhadas sobre o desempenho dos veículos e pedestres. Entre os principais estão o tripinfo.xml e o emission.xml. Behrisch et al. (2011) destacam que esses arquivos “permitem análises de alta granularidade, fornecendo subsídios para a avaliação de eficiência, consumo e sustentabilidade em diferentes cenários urbanos”.

Os dados obtidos podem ser processados tanto nas ferramentas nativas do SUMO, como o sumo-gui, quanto em ambientes externos, como Python ou planilhas eletrônicas, que permitem o cálculo de estatísticas descritivas e comparações intercenários. Lopez et al. (2018) observam que “a combinação entre simulação e análise programável amplia a capacidade de interpretação dos resultados, possibilitando identificar padrões de saturação, tempos de inatividade e emissões agregadas por modal”. Essa integração entre coleta e pós-processamento é especialmente útil para pesquisas que envolvem múltiplas variáveis simultâneas, como emissões, tempo perdido e consumo de combustível.

Além de fornecer indicadores operacionais, os resultados do SUMO permitem avaliar impactos sistêmicos, como a influência do congestionamento sobre o consumo energético e a emissão de CO₂. A microsimulação “viabiliza a análise causal entre variáveis, revelando como pequenas mudanças locais podem gerar efeitos significativos na rede viária” (Barceló, 2010). Assim, a calibração e a validação dos resultados são etapas essenciais para garantir a reprodutibilidade, a transparência e a robustez científica do estudo, fornecendo base empírica para a discussão dos cenários que serão apresentados nos capítulos subsequentes.

2.6.3 Modelagem Dinâmica de Emissões

A modelagem das emissões no SUMO é realizada de forma dinâmica, ou seja, baseada no estado instantâneo do veículo a cada passo de simulação, considerando velocidade, aceleração, desaceleração e tempo parado. Essa abordagem é fundamental para operações urbanas, nas quais ciclos constantes de parada e arranque elevam significativamente poluentes como NO_x e material particulado, especialmente em condições de tráfego severo (CETESB, 2023).

Além disso, os arquivos de emissão produzidos pelo SUMO, como `emission.xml`, permitem análises de alta granularidade, possibilitando avaliar consumo, emissões e eficiência sob diferentes condições de circulação (Behrisch et al., 2011).

A integração entre simulação e pós-processamento reforça essa capacidade, ampliando a interpretação das emissões em múltiplos cenários (Lopez et al., 2018).

2.6.3.1 Fatores de Emissão HBEFA

O cálculo das emissões baseia-se nos fatores definidos pelo HBEFA – Handbook Emission Factors for Road Transport, integrado nativamente ao SUMO. O HBEFA fornece curvas específicas de emissão para diferentes padrões tecnológicos, permitindo representar o desempenho ambiental de veículos equivalentes aos padrões Euro 4 e Euro 6 utilizados neste estudo.

Essa correspondência tecnológica é consistente com as normas do PROCONVE, cujas fases L5 e L7 são equivalentes aos padrões Euro 4 e Euro 6, respectivamente (CONAMA, 2022).

Esses padrões incorporam melhorias no controle de CO, HC, NOx e material particulado, com reduções amplamente documentadas na literatura técnica (CETESB, 2023).

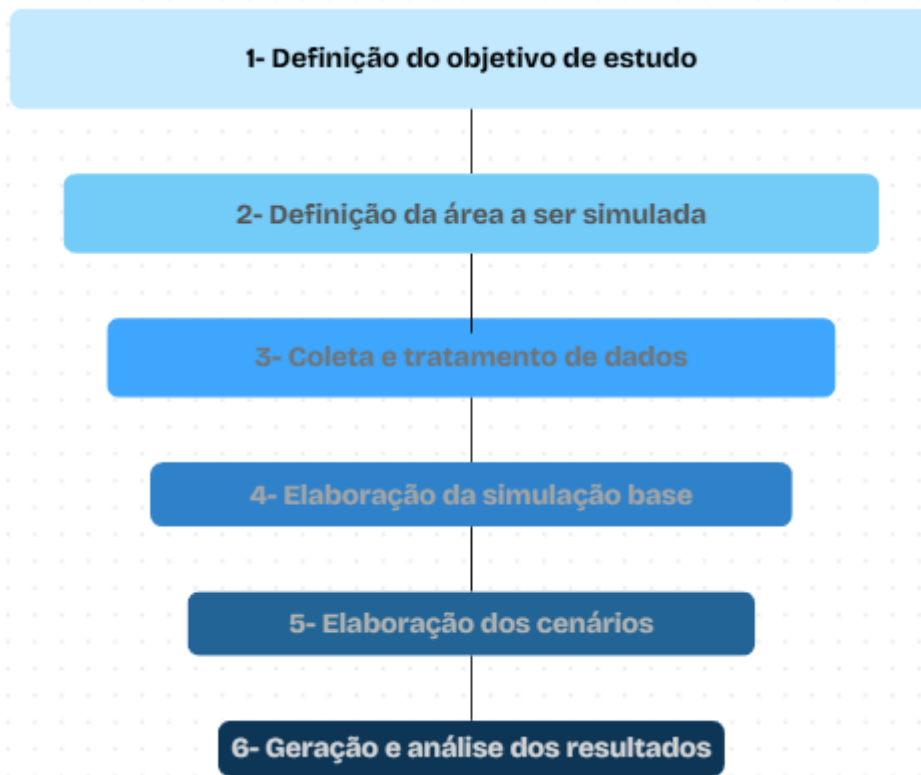
Dessa forma, a utilização dos fatores HBEFA no SUMO permite capturar emissões produzidas em regimes como marcha lenta, aceleração intensa, desaceleração e tráfego congestionado, que são característicos das operações de última milha e exercem impacto direto sobre os indicadores analisados no presente trabalho.

3. METODOLOGIA

Esse estudo adota uma abordagem quantitativa, baseada em simulações computacionais para analisar o impacto de diferentes modais de entrega na redução de poluentes da última milha. Esse tipo de método permite representar o comportamento do sistema viário em condições controladas e comparar indicadores de desempenho e emissões (Barceló, 2010; Behrisch et al., 2011).

A metodologia foi estruturada em seis etapas principais, apresentadas na Figura 4: (i) definição do objetivo de estudo; (ii) definição da área a ser simulada; (iii) coleta e tratamento de dados; (iv) elaboração da simulação base; (v) elaboração dos cenários; e (vi) geração e análise dos resultados.

Figura 4 - Fluxograma geral da metodologia



Fonte: Autor (2025)

Na primeira etapa, o objetivo do estudo foi definido a partir da identificação de lacunas da pesquisa bibliográfica com a avaliação das operações da empresa de e-commerce, foco do estudo. Observa-se uma crescente no número de trabalhos na literatura que avaliam modos alternativos em operações de logística de última milha.

Porém, poucos trabalhos abordam a análise de modelos de operação mais sustentáveis utilizando microssimulação de tráfego. Além disso, a empresa de e-commerce, para a qual foi simulada a operação, gostaria de avaliar o impacto de tempo nas entregas por modais de baixo impacto ambiental. Na reunião de alinhamento do projeto com a empresa, realizada de forma online, definiu-se a área de estudo como aquela que representa as maiores dificuldades de operação, no caso o centro da cidade de Joinville (etapa 2).

A coleta de dados, etapa 3, foi realizada com a busca de dados de diversas fontes. Obteve-se com a empresa de e-commerce os seguintes dados: número de entregas diárias de 3 meses (fornecida em planilhas eletrônicas); números de veículos que realizavam entregas por região; divisão das áreas de entrega para cada motorista; principais aspectos e dificuldades nas operações de entrega; área com maior número de interferências na operação. As informações sobre operações foram obtidas em entrevistas qualitativas realizadas de forma online com o gestor da empresa. Esses dados foram utilizados para calibrar o comportamento dos veículos de entrega na simulação.

Para a representação da microssimulação de tráfego, obtiveram-se os seguintes dados em contato por email com a Prefeitura de Joinville: (i) dados de contagem na hora de pico de cruzamentos da área simulada; (ii) dados dos planos semaforicos dos principais semáforos da região.

As seguintes ferramentas computacionais foram utilizadas nesta quarta etapa: (a) planilha excel - para tratamento dos dados das entregas e CEPs, para a definição de pares O-D e rotas dos veículos, para análise dos outputs; (b) GoogleMyMaps para a transformação dos CEPs da planilha em pontos de latitude e longitude, (c) openStreetmap - para aquisição da rede de simulação base; (d) software NetEdit - para melhorias no mapa, definição das principais rotas e fluxos de veículos; (e) TraCI - código em python para definir as rotas aleatórias e comportamento do veículo de entrega e do fluxo de veículos que utiliza vagas de estacionamento; (f) SUMO, para simular as condições mais próximas da realidade do tráfego urbano.

Na quinta etapa, foram desenvolvidos os cenários alternativos, incorporando variações nas condições de fluxo modificando o código no TraCI para avaliar seus efeitos sobre tempo de viagem, consumo e emissões.

Por fim, a etapa número seis, de geração e análise dos resultados consistiu na coleta dos indicadores produzidos pelo simulador, permitindo a comparação

quantitativa entre os cenários. Os resultados obtidos serviram de base para a discussão sobre eficiência operacional e sustentabilidade das alternativas propostas.

Os procedimentos são detalhados no próximo capítulo, *Elaboração da Simulação*.

4. ELABORAÇÃO DA SIMULAÇÃO

4.1. ÁREA DE ESTUDO

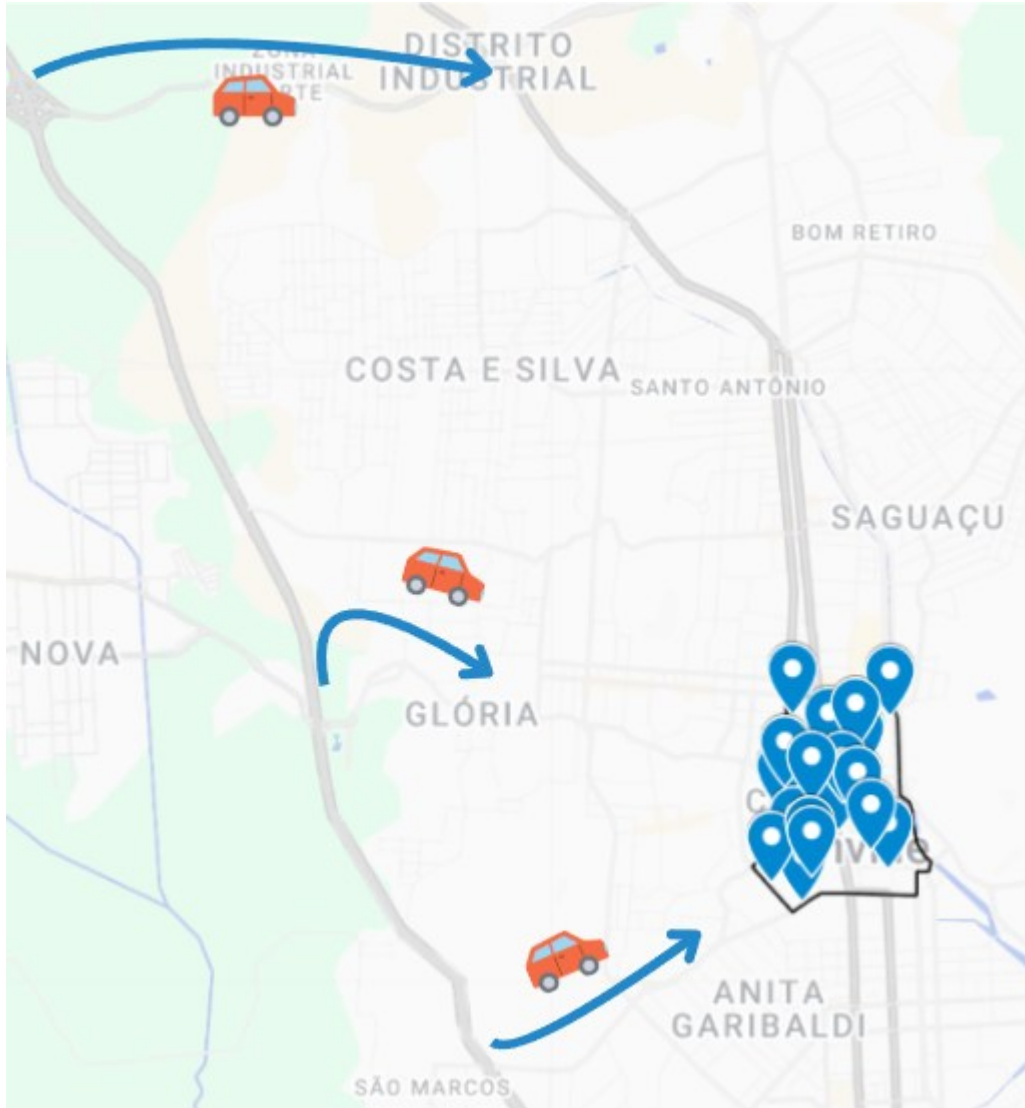
A simulação foi desenvolvida a partir da operação real de uma empresa de transporte que atua há mais de 20 anos no mercado brasileiro, com foco na entrega de produtos de e-commerce em Joinville e região. Todas as entregas são realizadas com veículos leves conduzidos pelos próprios entregadores, totalizando aproximadamente 30 motoristas circulando diariamente pela cidade. A empresa adota um modelo de remuneração por entrega, em que cada encomenda concluída gera um valor fixo para o entregador; assim, quanto maior o número de entregas realizadas no dia, maior a renda obtida. Nos últimos anos, entretanto, a operação passou a ser impactada por pressões crescentes relacionadas às legislações ambientais e às restrições de circulação em áreas urbanas, incentivando a busca por alternativas que reduzam as emissões sem comprometer o nível de serviço nem elevar os custos operacionais.

Para contextualizar essa dinâmica, a Figura 5 apresenta, de forma esquemática, o processo de acesso dos entregadores à cidade e sua dispersão pelos bairros atendidos. A base operacional localiza-se após a BR-101, o que obriga todos os motoristas a ingressar na malha urbana por meio da rodovia antes de iniciar as entregas. Esse deslocamento inicial representa um custo inevitável, em tempo, combustível e emissões, mesmo antes da primeira parada, e reflete a estrutura real de operação da empresa. A Figura 5 também evidencia a divisão das rotas por setores, que distribui entregadores entre áreas industriais, residenciais e comerciais, incluindo regiões como o Distrito Industrial, Glória, Anita Garibaldi e Centro.

Entre todas as áreas atendidas, o centro de Joinville concentra o maior volume de entregas, ao mesmo tempo em que apresenta condições particularmente desafiadoras: vias estreitas, elevado fluxo de veículos, circulação intensa de pedestres e escassez de vagas de estacionamento. Esses fatores tornam essa região o ponto mais sensível da operação e, portanto, o recorte ideal para avaliar alternativas sustentáveis em cenários densos e complexos.

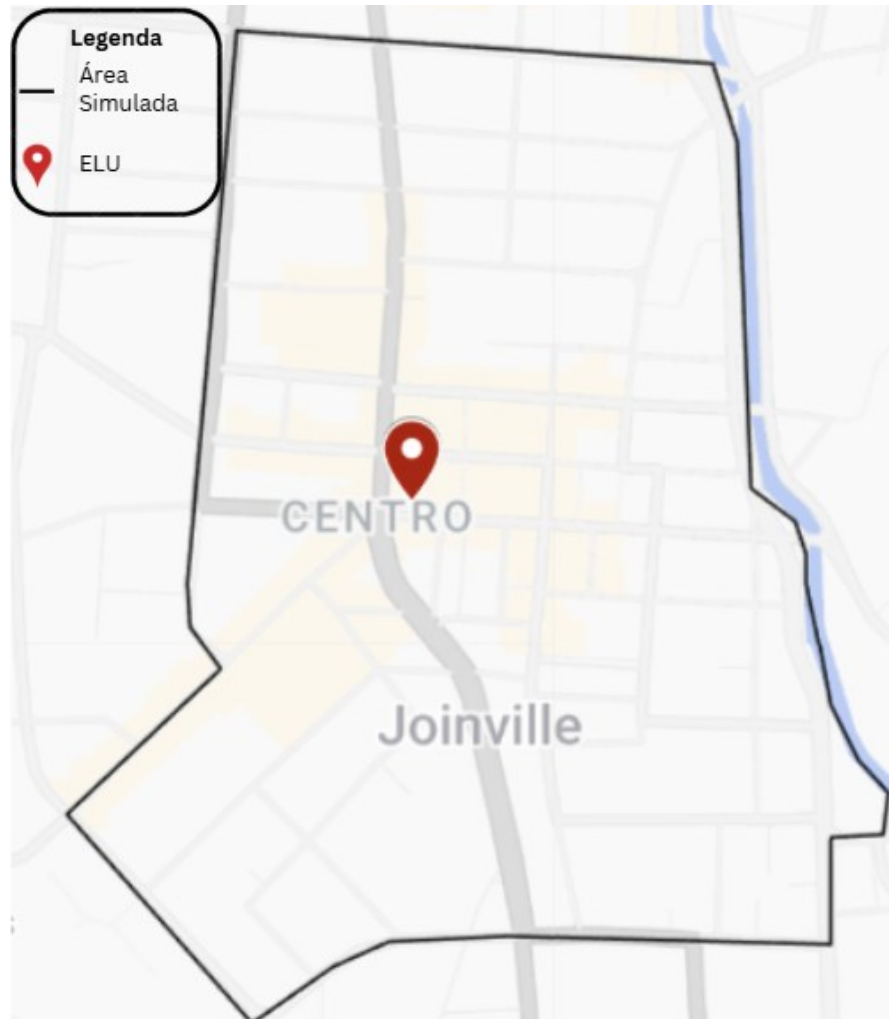
A Figura 6 delimita a área selecionada para a simulação e indica o local proposto para a implementação de um ELU.

Figura 5 - Esquema de Entrega Atual da Empresa



Fonte: Adaptado da empresa (2025)

Figura 6 - Mapa da região central de Joinville (SC)



Fonte: GoogleMyMaps (2025)

4.2. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

4.2.1. Dados de Entregas Urbanas

Para a construção da simulação proposta, foi fundamental a utilização de dados reais de operações logísticas urbanas, com foco nas entregas realizadas na região central de Joinville (SC). Os dados foram gentilmente disponibilizados por uma empresa parceira do setor de entregas urbanas que atua na cidade de Joinville, permitindo a representação de um cenário realista de distribuição de última milha.

A base inicial continha 55 Códigos de Endereçamento Postal (CEPs) distintos, abrangendo áreas centrais e adjacentes. A partir dessa amostra, verificou-se um volume total de 1.096 entregas mensais como mostrado em mais detalhes na Figura

7. Considerando que as operações ocorreram apenas em dias úteis, estimou-se uma média de 55 entregas diárias, assumindo 20 dias úteis de atividade no período analisado.

Figura 7 - Volume de Entregas Mensal

Bairro	Centro																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Semana 1</th> </tr> <tr> <th>Data</th> <th>Entregas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>03/04/2023</td><td>45</td></tr> <tr><td>04/04/2023</td><td>79</td></tr> <tr><td>05/04/2023</td><td>43</td></tr> <tr><td>06/04/2023</td><td>28</td></tr> <tr><td>07/04/2023</td><td>32</td></tr> <tr><td>Total</td><td>227</td></tr> </tbody> </table>		Semana 1		Data	Entregas	03/04/2023	45	04/04/2023	79	05/04/2023	43	06/04/2023	28	07/04/2023	32	Total	227
Semana 1																	
Data	Entregas																
03/04/2023	45																
04/04/2023	79																
05/04/2023	43																
06/04/2023	28																
07/04/2023	32																
Total	227																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Semana 2</th> </tr> <tr> <th>Data</th> <th>Entregas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10/04/2023</td><td>97</td></tr> <tr><td>11/04/2023</td><td>48</td></tr> <tr><td>12/04/2023</td><td>34</td></tr> <tr><td>13/04/2023</td><td>57</td></tr> <tr><td>14/04/2023</td><td>48</td></tr> <tr><td>Total</td><td>284</td></tr> </tbody> </table>		Semana 2		Data	Entregas	10/04/2023	97	11/04/2023	48	12/04/2023	34	13/04/2023	57	14/04/2023	48	Total	284
Semana 2																	
Data	Entregas																
10/04/2023	97																
11/04/2023	48																
12/04/2023	34																
13/04/2023	57																
14/04/2023	48																
Total	284																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Semana 3</th> </tr> <tr> <th>Data</th> <th>Entregas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17/04/2023</td><td>81</td></tr> <tr><td>18/04/2023</td><td>56</td></tr> <tr><td>19/04/2023</td><td>47</td></tr> <tr><td>20/04/2023</td><td>73</td></tr> <tr><td>21/04/2023</td><td>54</td></tr> <tr><td>Total</td><td>311</td></tr> </tbody> </table>		Semana 3		Data	Entregas	17/04/2023	81	18/04/2023	56	19/04/2023	47	20/04/2023	73	21/04/2023	54	Total	311
Semana 3																	
Data	Entregas																
17/04/2023	81																
18/04/2023	56																
19/04/2023	47																
20/04/2023	73																
21/04/2023	54																
Total	311																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Semana 4</th> </tr> <tr> <th>Data</th> <th>Entregas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>24/04/2023</td><td>80</td></tr> <tr><td>25/04/2023</td><td>39</td></tr> <tr><td>26/04/2023</td><td>72</td></tr> <tr><td>27/04/2023</td><td>39</td></tr> <tr><td>28/04/2023</td><td>44</td></tr> <tr><td>Total</td><td>274</td></tr> </tbody> </table>		Semana 4		Data	Entregas	24/04/2023	80	25/04/2023	39	26/04/2023	72	27/04/2023	39	28/04/2023	44	Total	274
Semana 4																	
Data	Entregas																
24/04/2023	80																
25/04/2023	39																
26/04/2023	72																
27/04/2023	39																
28/04/2023	44																
Total	274																
Total geral	1096																
Média/dia	54,8																

Fonte: Adaptado da empresa (2024)

Com esses dados, foi realizada uma análise de representatividade por CEP, calculando-se a proporção de entregas mensais de cada código em relação ao total. Foram mantidos apenas os CEPs com proporção igual ou superior a uma entrega por dia, o que resultou em 21 códigos representativos, como mostrado na Tabela 2. Por exemplo: o CEP 12345-678 recebe 23 entregas em um mês, a proporção dele referente ao total de 1096 é de 2,10%, agora verifica-se o quanto essa proporção equivale ao número de entregas diárias de 55. O resultado é 1,15, ou seja, das 55 entregas, pelo menos 1 passa por aquele CEP. Essa filtragem permitiu concentrar a simulação nos endereços de maior relevância logística, evitando dispersão espacial e garantindo aderência ao padrão operacional local.

Tabela 2 - Resultados Códigos Representativos

CEP	Entregas Totais Mês	% de Entregas	Qtd entregas por dia
89201440	104	9,49%	5,2
89201205	64	5,84%	3,2
89201600	62	5,66%	3,1
89201010	55	5,02%	2,7
89201405	54	4,93%	2,7
89201260	46	4,20%	2,3
89201480	41	3,74%	2,0
89201400	38	3,47%	1,9
89201000	36	3,28%	1,8
89201470	36	3,28%	1,8
89201215	34	3,10%	1,7
89201100	33	3,01%	1,6
89201300	32	2,92%	1,6
89201450	31	2,83%	1,5
89201601	31	2,83%	1,5
89201270	30	2,74%	1,5
89201203	24	2,19%	1,2
89201020	23	2,10%	1,1
89201250	22	2,01%	1,1
89201420	21	1,92%	1,0
89201460	21	1,92%	1,0
89201003	19	1,73%	0,9
89201330	17	1,55%	0,8
89201490	17	1,55%	0,8
89201495	15	1,37%	0,7

Fonte: Adaptado da empresa (2024)

Na etapa seguinte, os endereços selecionados foram geocodificados por meio da plataforma Google My Maps, que utiliza a API de Geocodificação do Google Maps para converter CEPs em coordenadas geográficas (latitude e longitude). Conforme descrito na documentação da própria API, quando o CEP é informado sem um número de endereço específico, o sistema retorna o ponto central aproximado da área correspondente, garantindo representatividade espacial suficiente para aplicações urbanas (GOOGLE, 2024).

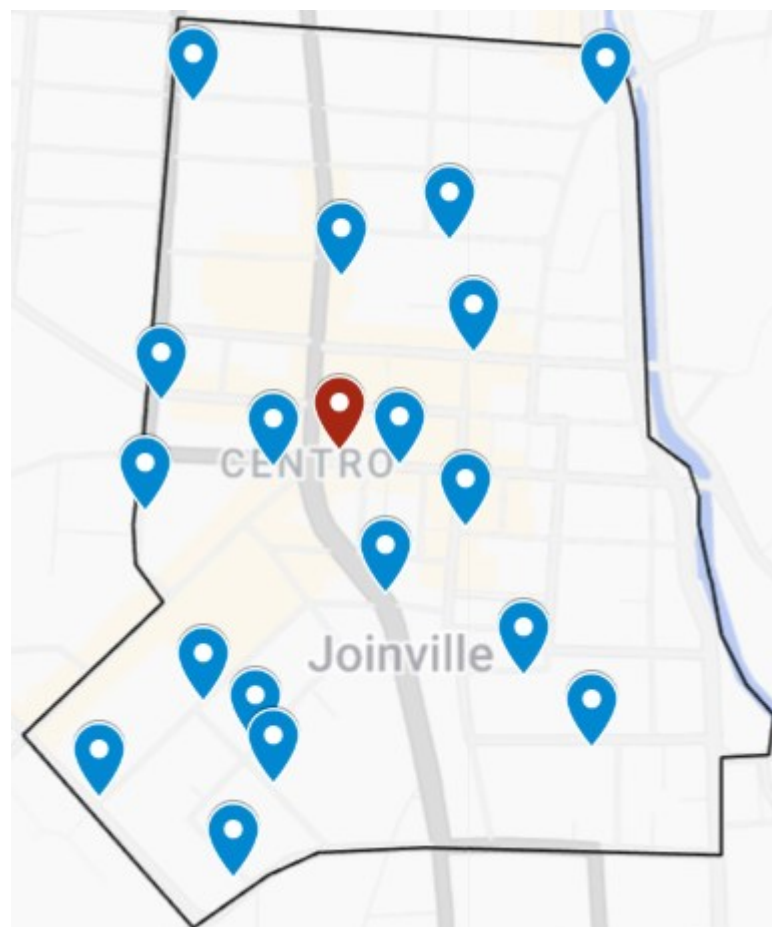
Durante o processo de verificação, constatou-se que três CEPs estavam localizados fora do perímetro central, ainda que constassem originalmente na base como pertencentes ao bairro Centro. Considerando também o baixo volume de entregas associados a esses códigos, optou-se por excluí-los da amostra final. Dessa forma, a simulação foi conduzida com 18 pontos de entrega válidos, todos localizados dentro da área central de Joinville. A Figura 8 mostra onde estão os 18 locais de entrega representados pelos marcadores azuis e o ELU pelo marcador vermelho.

A localização do Espaço Logístico Urbano (ELU) foi definida com base em critérios de centralidade e acessibilidade. Para isso, utilizaram-se as coordenadas dos pontos de entrega obtidas na etapa de geocodificação. A partir desses dados,

calculou-se o centróide da distribuição espacial das entregas, identificando-se a Rua Nove de Março como o ponto mais próximo ao centro geométrico resultante. Essa localização foi considerada a mais adequada por combinar proximidade média aos destinos, acesso facilitado às vias principais e condições operacionais compatíveis com atividades de carga e descarga, conforme critérios propostos por Oliveira (2014).

Além disso, pelo baixo número de entregas e de locais de entrega, não foi considerada a capacidade de carga de cada modal nos cenários simulados.

Figura 8 - Distribuição espacial dos pontos de entrega da área simulada



Fonte: GoogleMyMaps (2025)

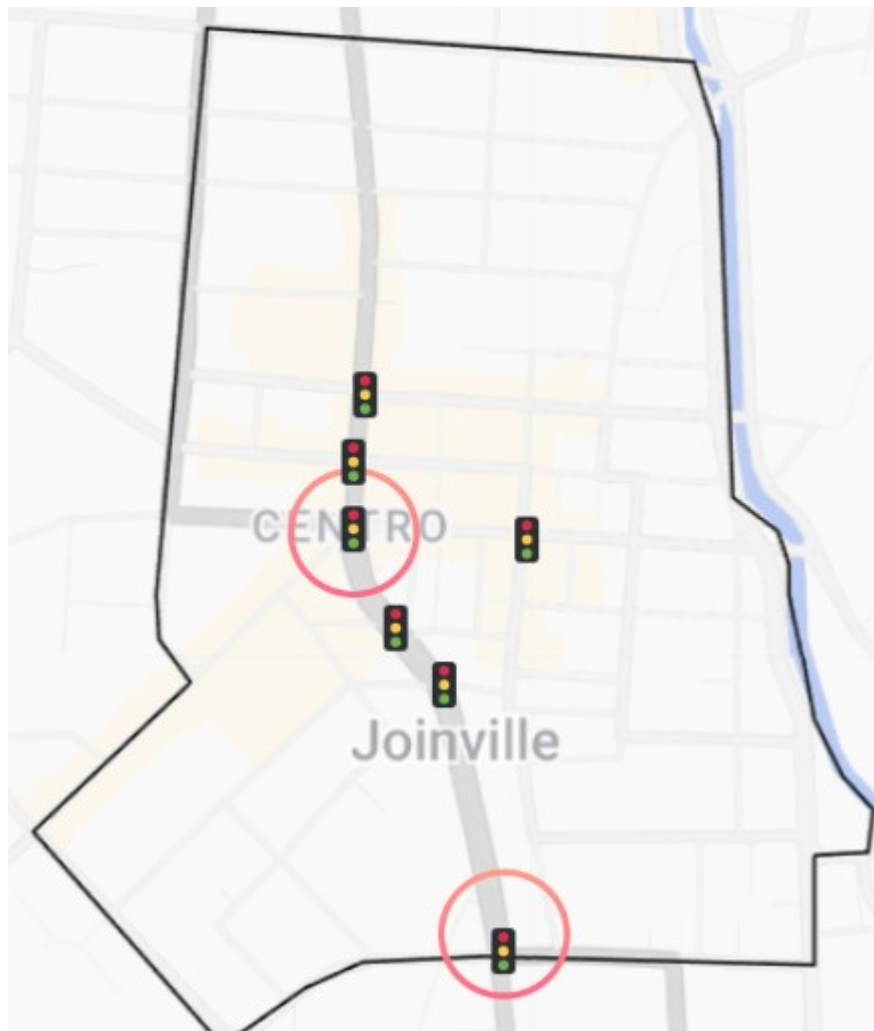
4.2.2. Dados de Fluxo Veicular e Tempo Semafórico

Além dos dados de entregas urbanas, também foram coletadas informações de fluxo veicular e tempos semaforicos, com o objetivo de reproduzir as condições reais de circulação no centro da cidade de Joinville (SC). Esses dados foram

fornechos pela Prefeitura Municipal de Joinville, a partir de registros de monitoramento de tráfego em vias estratégicas da região central.

As informações disponibilizadas incluíram contagens veiculares por hora e por movimentos durante 3 dias, realizadas durante os períodos de maior movimentação, horários de pico da manhã (entre 07h00 e 09h00) e da tarde (entre 17h e 19h). Os cruzamentos nos quais foram obtidos os dados estão ilustrados por um círculo e os semáforos cujos tempos também foram fornecidos pela prefeitura estão representados por um ícone de semáforo na Figura 9.

Figura 9 - Cruzamentos e Semáforos com Dados Fornecidos Pela Prefeitura



Fonte: Autor (2025)

No presente estudo, foi selecionado o intervalo das 17h às 19h do primeiro dia de contagem, por representar o período com maior fluxo de veículos. A Figura 10 e a tabela 3, apresentam, respectivamente, os movimentos observados e as

Tabela 3 - Contagem de Veículos Para Cada Rota

Rota	Veículos por hora	Sentido
A	13	Av. Juscelino Kubitschek - Sul → R. Nove de março - Leste
B	6	R. Min. Calógeras - Oeste - Sul → R. Nove de março - Leste
C	325	R. Min. Calógeras - Leste → R. Doutor João Colin - Norte
D	167	R. Min. Calógeras - Oeste → R. Doutor João Colin - Norte
E	56	R. Min. Calógeras - Leste → Rua Padre Carlos
F	29	R. Min. Calógeras - Oeste → Rua Eng. Niemeyer
G	98	R. Nove de março - Oeste → R. Nove de março - Leste
H	330	R. Nove de março - Oeste → Av. Juscelino Kubitschek - Sul
I	174	R. Nove de março - Oeste → R. Doutor João Colin - Norte
J	655	Av. Presidente Juscelino Kubitschek - Norte → Av. Getúlio Vargas - Sul

Fonte: Prefeitura de Joinville (2024)

Conforme indicado por CET-SP (2014) e Akishino (2011), o uso de medições locais de tráfego é essencial para a parametrização adequada de modelos de simulação, garantindo representatividade e consistência nos resultados. No entanto, os dados municipais não incluíam uma curva horária completa nem registros específicos para os períodos de entropico, o que exigiu a adoção de uma hipótese metodológica de ajuste para estimar tais volumes mantendo coerência com padrões observados nacional e internacionalmente.

Com base em referências técnicas de engenharia de tráfego, como a Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET-SP, 2014), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Traffic Monitoring Guide (TMG) da Federal Highway Administration (FHWA, 2017), foi considerada a relação típica entre volumes horários de pico e entropico em áreas urbanas. Essas fontes indicam que, em vias urbanas, o volume médio horário representa cerca de 4% do volume diário total, enquanto os valores de pico podem alcançar aproximadamente três vezes essa média, resultando em razões entropico/pico de 0,6 a 0,8.

Com base nesses parâmetros, foi adotado o fator 0,7 para representar o entropico em relação ao pico, valor intermediário amplamente utilizado em aplicações de modelagem urbana (FHWA, 2017). Em termos operacionais, isso significou aplicar uma redução de 30% nos fluxos observados nas vias centrais para a configuração do cenário de entropico. Por exemplo, se o volume no horário de pico era de 1.000 veículos/hora, o entropico é ajustado para 700 veículos/hora.

As programações de tempo semaforico também foram disponibilizadas pela prefeitura de Joinville e são correspondentes às mesmas vias que foi disponibilizado

o fluxo de veículos. A Figura 11 demonstra um exemplo de como é apresentada a programação semafórica. Nele é mostrado o cruzamento da João Colin com a Nove de Março. Para começar a análise, primeiro deve-se olhar a tabela da direita e definir um horário para encontrar o plano de programação. Encontrado o plano, na aba “duração dos estágios” irá indicar o tempo de verde de cada estágio.

Figura 11 - Dado base de Programação Semafórica de um cruzamento da rede

Cruzamento: João Colin x JK x Nove de Março	
Estágio 1:	Veicular JK + Pedestre Nove de Março (lado Apolo Calçados) + Veicular Nove de Março conversão a direita
Estágio 2: Atuado	Pedestre João Colin + Pedestre Nove de Março (lado Apolo Calçados) + Pedestre JK (loja Americanas) + Veicular Nove de Março conversão a direita
Estágio 3:	Veicular Nove de Março (sentido terminal ou João Colin) + Pedestre JK (loja Americanas) + Veicular Nove de Março conversão a direita
Estágio 4: Atuado	Veicular Corredor de ônibus Nove de Março + Pedestre Nove de Março (loja espaço Nobre)

Plano	Estrut	Defas	Operação	Duração dos Estágios	Ciclo
1	1	41	atuado c/ sinc.	:27 ;10 ;17 ;15	85
1B	1	41	atuado c/ sinc.	:27 ;10 ;17 ;15	85
2	1	0	atuado c/ sinc.	:20 ;10 ;14 ;10	70
3	3	0	atuado s/ sinc.	:14 ;10 ;12 ;14	66
4	2	2	atuado c/ sinc.	:10 ;10 ;10	42
4A	2	0	piscante	:7 ;7 ;7	33
5	1	41	atuado c/ sinc.	:29 ;10 ;19 ;16	90
5A	1	41	atuado c/ sinc.	:29 ;10 ;19 ;16	90
5B	1	41	atuado c/ sinc.	:29 ;10 ;19 ;16	90

Plano	Início	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM	Modo
1	06:30:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
1	10:00:00						X		atuado c/ sinc.
2	20:00:00						X	X	atuado c/ sinc.
2	18:00:00						X		atuado c/ sinc.
2	20:00:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
3	04:30:00	X	X	X	X	X			atuado s/ sinc.
3	20:00:00						X		atuado s/ sinc.
4	00:00:00	X	X	X	X	X	X	X	atuado c/ sinc.
5	11:30:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
5	14:30:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
5	19:30:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
5A	13:00:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.
5A	17:15:00	X	X	X	X	X			atuado c/ sinc.

Fonte: Prefeitura Municipal de Joinville (2024)

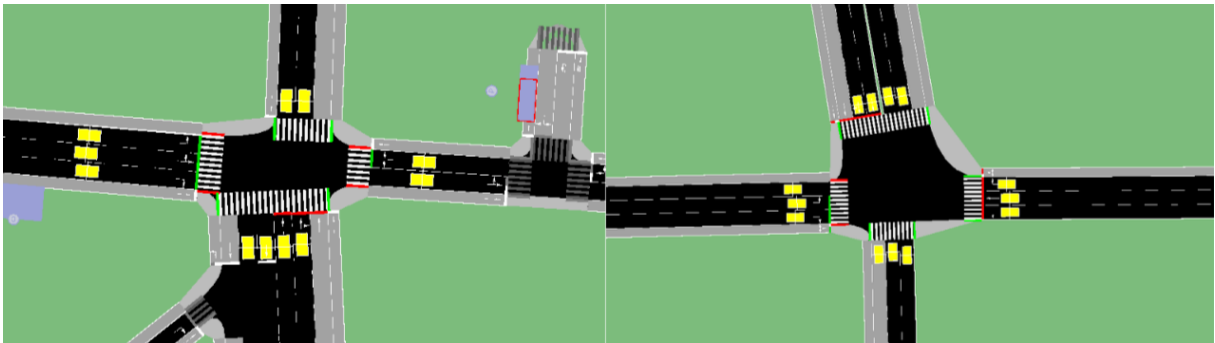
Apesar da existência da programação semafórica em todos os períodos do dia, eles não foram alterados na avaliação dos cenários de pico e entrepico. O objetivo de não realizar tal alteração está em avaliar as diferenças entre os dois cenários (pico e entrepico) exclusivamente da variação de intensidade do fluxo, e não de modificações no controle viário.

4.3. SIMULAÇÃO BASE E CENÁRIOS AVALIADOS

Todas as simulações foram realizadas no software Simulation of Urban Mobility (SUMO), utilizando como base os dados de entregas, volumes veiculares e tempos semafóricos descritos nas seções anteriores. O modelo representa a área central de Joinville (SC) e serviu de referência para a construção dos cenários operacionais avaliados no estudo.

Antes da definição dos cenários, foram realizadas etapas de calibração e validação do modelo. A calibração consistiu em comparar os volumes simulados aos volumes reais obtidos nas contagens apresentadas na Seção 4.2. Para isso, detectores foram inseridos nas vias dos cruzamentos R. Nove de Março x R. João Colin x Av. Juscelino Kubitschek, à esquerda, e R. Ministro Calógeras x Av. Juscelino Kubitschek x Av. Getúlio Vargas, à direita (Figura 12). O detector faz a contagem da quantidade de veículos que passam pela faixa onde está inserido, e no fim da simulação, gera um output com o valor total de passagens. Os valores simulados foram ajustados iterativamente até que se aproximassem das contagens reais, adotando-se como aceitável uma diferença em torno de 10%, compatível com a variabilidade natural do tráfego urbano e com estudos aplicados ao contexto de Joinville (Okonski, 2023).

Figura 12 - Detectores Inseridos em Vias Monitoradas



Fonte: Autor (2025)

A validação incluiu também uma inspeção visual da rede no sumo-gui, assegurando que não houvesse erros de conectividade, comportamentos inconsistentes ou manobras impossíveis. Essa verificação permitiu confirmar o funcionamento dos estágios semafóricos e a fluidez dos trajetos, bem como o deslocamento correto dos modais ativos. Em complemento, realizou-se uma checagem do funcionamento geral dos elementos operacionais adicionados ao modelo, garantindo que estivessem devidamente acessíveis e integrados às rotas dos agentes.

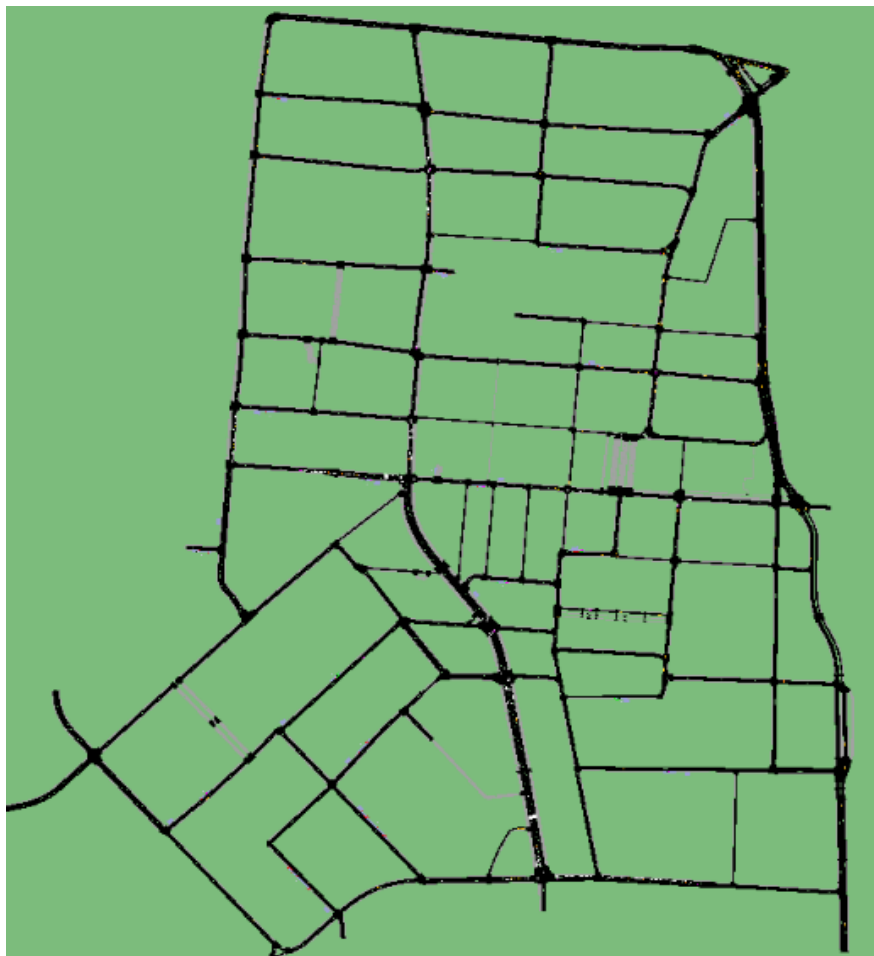
Com o modelo validado, foram definidos 18 cenários de simulação, reunidos em cinco grupos principais: sem fluxo, entropico, pico, pico aleatório e pico aleatório com tempo de estacionamento ampliado. Cada grupo foi executado para os modais

avaliados (carro Euro 4, carro Euro 6, ciclista e pedestre), permitindo analisar o efeito combinado das condições de tráfego e das características operacionais de cada tipo de agente.

4.3.1. Criação da Rede Viária e Elementos de Simulação

A rede viária utilizada na simulação foi construída a partir de dados abertos do OpenStreetMap (OSM), abrangendo a região central de Joinville (SC). O arquivo original em formato .osm foi processado no SUMO por meio da ferramenta Netconvert, que converte dados cartográficos em uma estrutura de rede compatível com o ambiente de simulação, representado na Figura 13, gerando o arquivo principal .net.xml.

Figura 13 - Rede Gerada

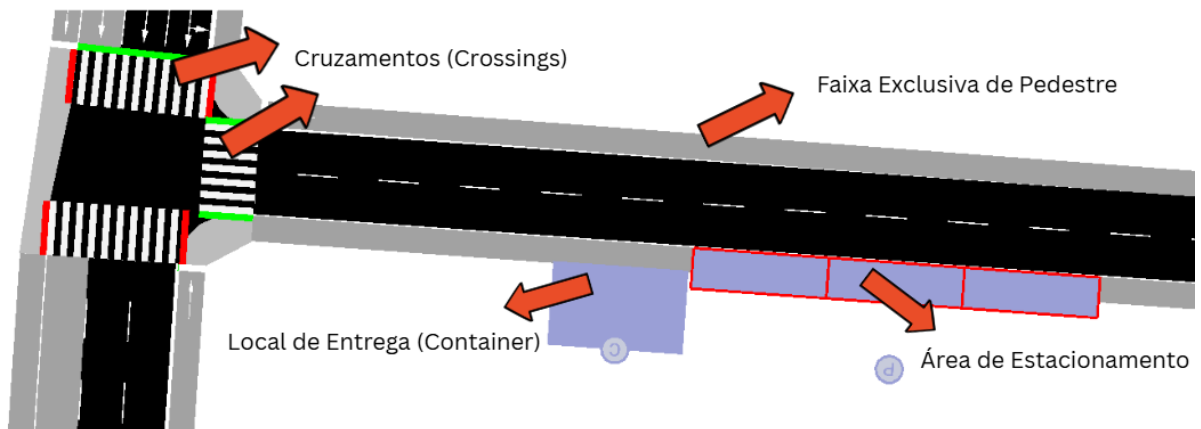


Fonte: Autor (2025)

Após a importação inicial, a rede passou por ajustes manuais com o objetivo de adequá-la às condições operacionais reais e às necessidades do estudo. Foram realizadas correções de conectividade, ajustes de sentido viário e duplicação de alguns trechos para garantir o fluxo bidirecional. Além disso, foram inseridas faixas exclusivas para pedestres e cruzamentos, permitindo o deslocamento contínuo entre os lados opostos das vias.

Também foram incorporados elementos logísticos complementares, como áreas de estacionamento destinadas às paradas do veículo de entrega e do fluxo de veículos que ocupará o estacionamento. Por fim, os locais de entrega (containers) que representaram os locais de destino das encomendas também foram incluídos. Todos esses elementos foram ilustrados na Figura 14. Esses componentes foram definidos em arquivos adicionais .add.xml e vinculados à configuração principal da simulação por meio do atributo “additional-files” no arquivo .sumocfg (DLR, 2023).

Figura 14 - Elementos de tráfego do SUMO



Fonte: Autor (2025)

4.3.2. Criação dos Fluxos de Tráfego

A construção do modelo demandou a definição dos diferentes fluxos de tráfego que compõem a rede simulada, uma vez que a presença e a intensidade desses fluxos influenciam diretamente o comportamento dos agentes e o nível de saturação viária observado nos cenários. Para representar de forma adequada as condições da área central de Joinville, foram combinados fluxos derivados de dados empíricos, fluxos complementares destinados a completar a malha e fluxos

estocásticos que reproduzem a imprevisibilidade operacional típica do ambiente urbano.

A Tabela 4 resume os três tipos de fluxos utilizados na simulação, destacando sua função dentro do modelo, a forma de identificação visual no SUMO e a nomenclatura adotada ao longo do capítulo. Essa organização permite compreender o papel estrutural de cada fluxo antes da descrição detalhada de sua configuração nas subseções seguintes.

Tabela 4 - Fluxos Existentes na Simulação

Tipo de Fluxo	Característica	Identificação Visual na Simulação	Nomenclatura Utilizada
Fluxo de Pico e Fluxo de Entrepico	Fluxo de veículos baseado nos dados reais da prefeitura, correspondendo às principais vias da área central	Cor Branca	Fluxo Branco
Fluxo aleatório periférico	Fluxo de veículos distribuídos em vias periféricas, cuja função é preencher a rede e gerar densidade de tráfego	Cor Laranja	Fluxo Laranja
Fluxo aleatório de estacionamento	Fluxo de veículos que estacionam aleatoriamente em áreas de estacionamento, criando interferências pontuais e variações no tempo de percurso	Cor Rosa	Fluxo Rosa

Fonte: Autor (2025)

4.3.2.1. Definição dos Fluxos de Tráfego Geral

A definição dos fluxos de tráfego geral envolveu dois componentes: o fluxo branco, derivado diretamente das contagens reais apresentadas na Seção 4.2, e o fluxo laranja, composto por deslocamentos aleatórios gerados via TraCI. O fluxo branco já havia sido apresentado previamente, portanto, nesta etapa, o foco recai sobre a construção do fluxo laranja, responsável por complementar a movimentação da malha viária com trajetos distribuídos de forma espacialmente coerente, garantindo densidade adicional sem comprometer a calibração realizada.

A geração do fluxo laranja foi estruturada por meio de um script Python integrado ao SUMO. O primeiro conjunto de parâmetros relevantes está reunido no

bloco destacado na Figura 15, que controla a intensidade, o padrão de distribuição e a frequência de criação dos veículos aleatórios. Esses parâmetros podem ser ajustados conforme a necessidade: BG_SPAWN_EVERY_STEPS define o intervalo de tempo entre tentativas de criação; BG_SPAWN_PROB regula a probabilidade de surgimento de um novo veículo em cada iteração; e BG_MAX_ACTIVE limita a quantidade simultânea de veículos ativos para evitar saturação artificial da rede. O parâmetro BG_MAX_DIST_M impõe o teto de distância para cada viagem gerada, prevenindo a criação de rotas demasiadamente longas ou incoerentes com a escala urbana utilizada. Conforme a figura 15, para a simulação elaborada definiu-se um intervalo de 4 segundos para inserção de um veículo aleatório na simulação, com probabilidade de 45% de sucesso. O código permite 100 carros ativos na rede, cada rota criada aleatoriamente deve ser menor do que 2.500 metros e são 250 tentativas para encontrar uma combinação válida para origem e destino.

Figura 15 - Parâmetros iniciais de configuração do fluxo laranja

```
BG_ENABLED = True
BG_SPAWN_EVERY_STEPS = 4
BG_SPAWN_PROB = 0.45
BG_MAX_ACTIVE = 100
BG_MAX_DIST_M = 2500.0
BG_MAX_ATTEMPTS = 250
BG_COLOR = (255, 128, 0)
BG_TYPE = "car"
```

Fonte: Autor (2025)

Após a definição desses parâmetros, o script identifica todas as vias elegíveis para receber veículos aleatórios. Essa filtragem exclui segmentos artificiais, trechos internos e as vias essenciais usadas pelo fluxo branco. O trecho apresentado na Figura 16 mostra como as edges são filtradas com base em permissões de tráfego e restrições impostas pelo estudo. Essa etapa garante que os veículos aleatórios circulem apenas em áreas desejadas, evitando interferências indevidas nas vias que reproduzem o comportamento real das contagens.

Figura 16 - Identificação das vias viáveis para geração de veículos aleatórios

```
edges_viaveis =
[
  e.getID() for e in net.getEdges()
  if not e.isSpecial() and e.allows("passenger") and e.getID() not in avoided
]
```

Fonte: Autor (2025)

Em seguida, o script classifica essas vias em setores e anéis concêntricos considerando a distância de cada segmento ao centro geométrico da rede. Isso permite distribuir veículos em regiões periféricas e intermediárias de forma equilibrada, evitando concentrações artificiais. A Figura 17 apresenta o trecho responsável por calcular o ponto médio de cada edge, sua distância ao centro e a normalização desses valores. Essa organização é importante para controlar o comportamento espacial do fluxo laranja.

Figura 17 - Cálculo dos anéis e setores utilizados na distribuição dos fluxos aleatórios

```
(bb_min, bb_max) = net.getBBoxXY()
xmin, ymin = bb_min
xmax, ymax = bb_max
cx, cy = (xmin + xmax) / 2.0, (ymin + ymax) / 2.0

edge_mid, edge_dist = {}, {}
for eid in edges_viaveis_bg:
    try:
        e = net.getEdge(eid)
        x1, y1 = e.getFromNode().getCoord()
        x2, y2 = e.getToNode().getCoord()
        mx, my = (x1 + x2) / 2.0, (y1 + y2) / 2.0
        edge_mid[eid] = (mx, my)
        edge_dist[eid] = hypot(mx - cx, my - cy)
    except Exception:
        edge_mid[eid] = (cx, cy)
        edge_dist[eid] = 0.0

dmax = max(edge_dist.values()) if edge_dist else 1.0
if not dmax:
    dmax = 1.0
edge_norm = {eid: edge_dist[eid] / dmax for eid in edges_viaveis_bg}
```

Fonte: Autor (2025)

Com base nessa estrutura espacial, o algoritmo escolhe dinamicamente as origens e destinos dos veículos aleatórios. A Figura 18 apresenta a função utilizada para selecionar uma origem priorizando cobertura uniforme entre os setores, enquanto a Figura 19 mostra o processo de escolha do destino, obedecendo limites mínimos e máximos de raio. Essa lógica assegura a criação de viagens compatíveis com o padrão urbano, geralmente curtas ou médias, sem interferir no miolo da rede.

Figura 18 - Seleção balanceada de origens para o fluxo laranja

```
def pick_origin_coverage():
    global sector_rr
    for _ in range(SECTORS):
        s = sector_rr % SECTORS
        sector_rr += 1
        pool = edges_by_sector_all.get(s, [])
        if pool:
            k = max(1, len(pool) // 10)
            pool_sorted = sorted(pool, key=lambda e: edge_score[e])
            return random.choice(pool_sorted[:k])
    return random.choice(edges_viaveis_bg)
```

Fonte: Autor (2025)

Figura 19 - Seleção de destinos dentro de um raio definido

```
radius = random.uniform(DEST_RADIUS_MIN, DEST_RADIUS_MAX)
candidatos = [e for e in edges_within_radius(origem, radius)
              if e != origem and e in edges_viaveis_bg and not is_blocked_edge(e)]
```

Fonte: Autor (2025)

Uma vez definida a origem e o destino, o algoritmo verifica se a rota encontrada é compatível com as restrições impostas (comprimento máximo, ausência de edges bloqueadas e conectividade válida). Somente então o veículo é inserido na simulação, conforme o trecho apresentado na Figura 20. Cada agente criado recebe cor laranja e parâmetros operacionais aleatórios, contribuindo para a diversidade do tráfego.

Figura 20 - Criação do veículo aleatório e inserção na simulação

```
traci.route.add(vid, rota)
traci.vehicle.add(vid, routeID=vid, typeID=BG_TYPE)
traci.vehicle.setColor(vid, BG_COLOR)
traci.vehicle.setDepartLane(vid, "random")
traci.vehicle.setDepartPos(vid, "random_free")
traci.vehicle.setDepartSpeed(vid, "random")
```

Fonte: Autor (2025)

Por fim, o script mantém um registro das vias utilizadas pelos veículos aleatórios ao longo da simulação. Esse rastreamento permite atualizar o parâmetro `edge_score`, utilizado para direcionar novas inserções para áreas menos percorridas, evitando aglomerações artificiais e garantindo melhor cobertura espacial do fluxo. A figura 21 demonstra os os fluxos brancos (área branca) e laranjas (área laranja) atuam.

Figura 21 - Áreas de Atuação dos Fluxos Brancos e Laranjas



Fonte: Autor (2025)

4.3.2.2. Definição do Fluxo de Veículos que usam estacionamento

Além do fluxo laranja, a simulação incluiu outro conjunto específico de veículos que utilizam as áreas de estacionamento ao longo da rede, identificados visualmente pela cor rosa na simulação. Esses veículos têm a função de representar a ocupação dinâmica das vagas de estacionamento em vias urbanas. Sua geração também foi implementada via TraCI, a partir do mesmo script utilizado para o fluxo laranja, porém com lógica própria para seleção de vagas e definição do tempo de permanência.

O primeiro passo do script consiste em identificar todas as áreas de estacionamento disponíveis na rede, com exceção do ELU, que é utilizado exclusivamente pelo veículo de entrega. O trecho mostrado na Figura 22 obtém a lista de áreas de estacionamento e associa cada uma à respectiva lane e à edge correspondente, permitindo que o algoritmo relacione cada vaga a um trecho específico da malha viária.

Figura 22 - Mapeamento das Áreas de Estacionamento Para Faixas e Edges

```
# parkingAreas (menos ELU)
parking_areas = [pa for pa in traci.parkingarea.getIDList() if pa != "ELU"]

# parkingArea → Lane → edge
parking_area_to_lane = {pa: traci.parkingarea.getLaneID(pa) for pa in parking_areas}
parking_area_to_edge = {pa: traci.lane.getEdgeID(lane) for pa, lane in parking_area_to_lane.items()}
```

Fonte: Autor (2025)

Em seguida, é definido um parâmetro que controla a probabilidade de esses veículos surgirem em regiões periféricas da malha, de forma semelhante ao que ocorre com o fluxo laranja. Esse ajuste é realizado por meio da variável `MAGENTA_PERIPH_SHARE`, apresentada na Figura 23, que estabelece a fração de veículos rosas cuja origem é escolhida priorizando bordas da rede. Essa configuração contribui para evitar que as áreas centrais se tornem excessivamente saturadas por veículos de estacionamento.

Figura 23 - Configuração da Preferência Periférica Para o Fluxo Rosa

```
MAGENTA_PERIPH_SHARE = 0.50
```

Fonte: Autor (2025)

A lógica principal de criação dos veículos que utilizam estacionamento está concentrada na função `adicionar_veiculo_com_estacionamento`, apresentada na Figura 24. Nessa função, é definida a origem do veículo (por cobertura geral ou periferia), seleciona-se uma vaga de estacionamento preferencialmente no mesmo setor da origem e calcula-se a rota entre o ponto de partida e a edge associada à vaga. Caso a rota seja válida, o veículo é inserido na simulação com um stop programado na área de estacionamento escolhida.

Figura 24 - Função Responsável Pela Criação dos Veículos do Fluxo Rosa

```
def adicionar_veiculo_com_estacionamento(step):
    vid = f"randVeh_{step}_{random.randint(0, 999999)}"
    origem = (pick_origin_periphery_coverage() if random.random() < MAGENTA_PERIPH_SHARE
              else pick_origin_coverage())
    setor_o = sector_of_edge(origem)
    vagas_mesmo_setor = [pa for pa in parking_areas
                        if sector_of_edge(parking_area_to_edge[pa]) == setor_o]
    vaga = random.choice(vagas_mesmo_setor or parking_areas)

    destino_edge = parking_area_to_edge[vaga]
    print(f"[DEBUG] {vid}: origem={origem}, dest_edge={destino_edge}, vaga={vaga}")

    if origem not in traci.edge.getIDList() or destino_edge not in traci.edge.getIDList():
        print("[ERRO] edge inválido"); return

    rota = traci.simulation.findRoute(origem, destino_edge).edges
    if len(rota) < 1:
        print(f"[ERRO] rota impossível {origem}→{destino_edge}"); return

    try:
        traci.route.add(vid, rota)
        traci.vehicle.add(vid, routeID=vid, typeID="car")
        tempo_parada = random.randint(45, 193)
        traci.vehicle.setParkingAreaStop(vid, vaga, tempo_parada)
        traci.vehicle.setColor(vid, (255, 0, 255))
        print(f"[INFO] {vid} criado: {origem}→{destino_edge}, estacionará em {vaga}")
```

Fonte: Autor (2025)

O elemento central para a definição dos cenários relacionados ao estacionamento é a variável `tempo_parada`, que controla o intervalo de tempo em que o veículo permanece na área de estacionamento antes de retomar o deslocamento. Nos cenários em que o tempo de estacionamento é considerado “padrão”, esse valor é sorteado entre 45 e 193 segundos por meio da função `random.randint(45, 193)`, como mostrado na Figura 24. O menor valor do intervalo representa paradas curtas e operacionais plausíveis, já o maior valor representa o maior tempo que o entregador levou para concluir uma entrega na simulação.

No cenário específico de pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado, manteve-se a mesma lógica de distribuição utilizada no cenário padrão, porém com um intervalo deslocado para cima. Enquanto o cenário convencional adota tempos entre 45 e 193 segundos, o intervalo expandido foi definido tomando o valor máximo desse cenário (193 s) como novo limite inferior. Para determinar o novo limite superior, preservou-se a amplitude original do intervalo ($193 - 45 = 148$ s), resultando em um tempo máximo de 341 segundos ($193 + 148$). Essa escolha assegura coerência entre os cenários, mantendo o mesmo “tamanho” do intervalo de variação, mas deslocado para uma faixa mais alta. Na prática, essa modificação intensifica os efeitos do fluxo rosa sobre a operação, aumentando o tempo de ocupação das vagas e ampliando a interferência sobre o veículo de entrega e sobre os fluxos gerais.

Por fim, a inserção dos veículos do fluxo rosa no laço principal da simulação é feita em intervalos regulares, como ilustrado na Figura 25. A cada conjunto de passos de simulação, uma nova tentativa de criar um veículo com parada em estacionamento é realizada, respeitando os critérios espaciais e de rota definidos anteriormente. Essa estratégia garante a presença contínua de veículos que entram e saem de vagas ao longo do período simulado, reproduzindo de forma simplificada a dinâmica real de ocupação de estacionamento em áreas centrais.

Figura 25 - Inserção Periódica de Veículos do Fluxo Rosa no Laço Principal da Simulação

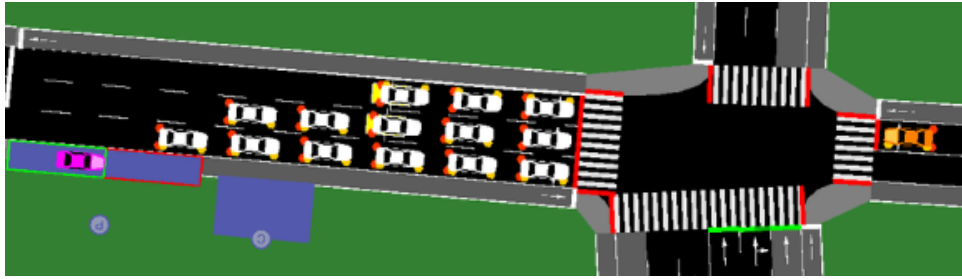
```
step = 0
while step < 6000:
    traci.simulationStep()

    # ROSAS (estacionamento)
    if step % 10 == 0:
        adicionar_veiculo_com_estacionamento(step)
```

Fonte: Autor (2025)

A Figura 26 demonstra os três fluxos citados previamente em ação.

Figura 26 - Fluxos da Simulação

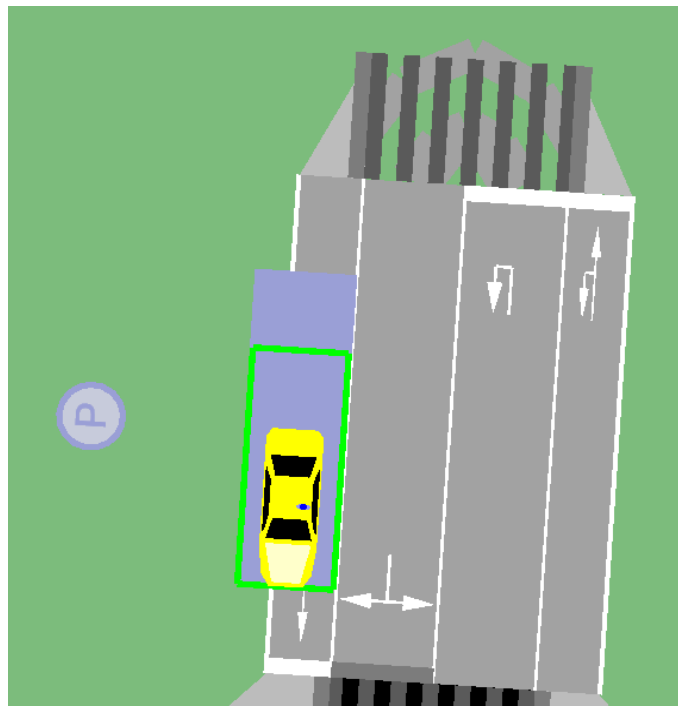


Fonte: Autor (2025)

4.3.2.3. Definição do Veículo de Entrega

A modelagem do agente de entrega foi estruturada de modo a representar de forma integrada o deslocamento do veículo motorizado e a atuação do entregador a pé. No SUMO, essa dinâmica foi implementada a partir da combinação entre um veículo do tipo car e uma entidade person, que embarca e desembarca conforme a sequência de paradas prevista no roteiro de entregas. O veículo inicia a operação estacionado no ELU, e sua partida ocorre apenas no momento em que o entregador entra no automóvel, garantindo a coerência com o funcionamento real do processo de distribuição conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 - Veículo de Entrega e Entregador Aguardando no ELU



Fonte: Autor (2025)

O veículo de entrega foi definido a partir do tipo “carro”, cuja configuração inclui parâmetros de aceleração, desaceleração, distância mínima, comportamento de troca de faixa e nível de impaciência (Figura 28). Esses ajustes foram necessários pois, durante os testes preliminares, o veículo apresentava dificuldade para sair de áreas de estacionamento em cenários congestionados. Assim, parâmetros como *lcAssertive*, *lcImpatience* e *lcPushy* foram incrementados para tornar o comportamento mais responsivo às oportunidades de inserção no tráfego, sem comprometer a segurança ou gerar manobras irrealistas. Além disso, o atributo *emissionClass* foi alternado entre HBEFA4/PC_petrol_Euro-4 e HBEFA4/PC_petrol_Euro-6d, permitindo avaliar o impacto ambiental de diferentes padrões tecnológicos.

Figura 28 - Parâmetros do vType Utilizado Para o Veículo de Entrega

```
<vType id="carro" vClass="private" emissionClass="HBEFA4/PC_petrol_Euro-6d" carFollowModel="Krauss"
  accel="2.6" decel="7.5" emergencyDecel="9.0" tau="0.7" minGap="0.8" sigma="0.2"
  lcAssertive="6.0" lcImpatience="1.8" lcCooperative="0.2" lcPushy="1" lcSpeedGain="0.5" lcAccellat="2.5"/>
```

Fonte: Autor (2025)

Após configurado o comportamento do veículo, definiu-se a modelagem do entregador propriamente dito. Ele foi representado no SUMO como um agente do tipo *person*, responsável por realizar as entregas a pé após o desembarque do carro. Esse agente utiliza *speedFactor* = 1.0 (equivalente a 4,8km/h) (Dalla Chiara et al., 2025; Gruber; Kihm; Lenz, 2014). A interação entre o carro e o entregador ocorre por meio de uma sequência de comandos *ride*, *walk* e *stop*, que funcionam como na vida real. O comando *ride* indica que o entregador embarca no veículo e é transportado até a área de estacionamento correspondente ao próximo ponto de entrega. Em seguida, o comando *walk* determina o deslocamento a pé entre a vaga e o container, enquanto *stop* fixa a permanência de 30 segundos necessária para a realização da entrega. Após concluir a atividade, o entregador retorna ao automóvel por meio de um novo *walk* e o ciclo se reinicia com outro *ride*. Essa lógica se repete sucessivamente para todos os pontos previstos no roteiro, finalizando com o retorno ao ELU.

Em paralelo ao modal carro, os modais ativos foram modelados de forma independente, sem relação com o agente de entrega embarcado no automóvel. Para o modal pedestre, utilizou-se igualmente um agente do tipo *person* com *speedFactor*

de 1.0, porém percorrendo toda a rota exclusivamente a pé. Já o modal ciclista adotou a mesma lógica estrutural, porém com *speedFactor* de 2.5 (equivalente a 12km/h), representando a velocidade típica de uma bicicleta de carga em ambiente urbano. Essa alternativa foi necessária porque o SUMO não permite que agentes do tipo bike utilizem *containerStops*. Assim, a simulação do ciclista baseia-se em uma equivalência de velocidade amplamente documentada na literatura, onde pedestres caminham entre 4 e 6 km/h, enquanto bicicletas de carga operam na faixa de 10 a 15 km/h (Dalla Chiara et al., 2025; Gruber; Kihm; Lenz, 2014).

Essa separação garante que cada modal, carro, pedestre e ciclista, opere de maneira coerente com sua lógica real de funcionamento, ao mesmo tempo em que preserva a distinção entre o entregador associado ao veículo motorizado e os agentes que realizam todo o percurso de forma autônoma. Nos três casos, a interação com os pontos de entrega foi realizada por meio do atributo *containerStop*, assegurando a permanência mínima de 30 segundos em cada local, condição essencial para manter a padronização das métricas de comparação entre cenários e modais.

4.3.3. Cenários Simulados e Outputs Analisados

Foram definidos cinco conjuntos principais de cenários de simulação, totalizando 18 combinações experimentais, que abrangeram diferentes condições de tráfego e modais analisados:

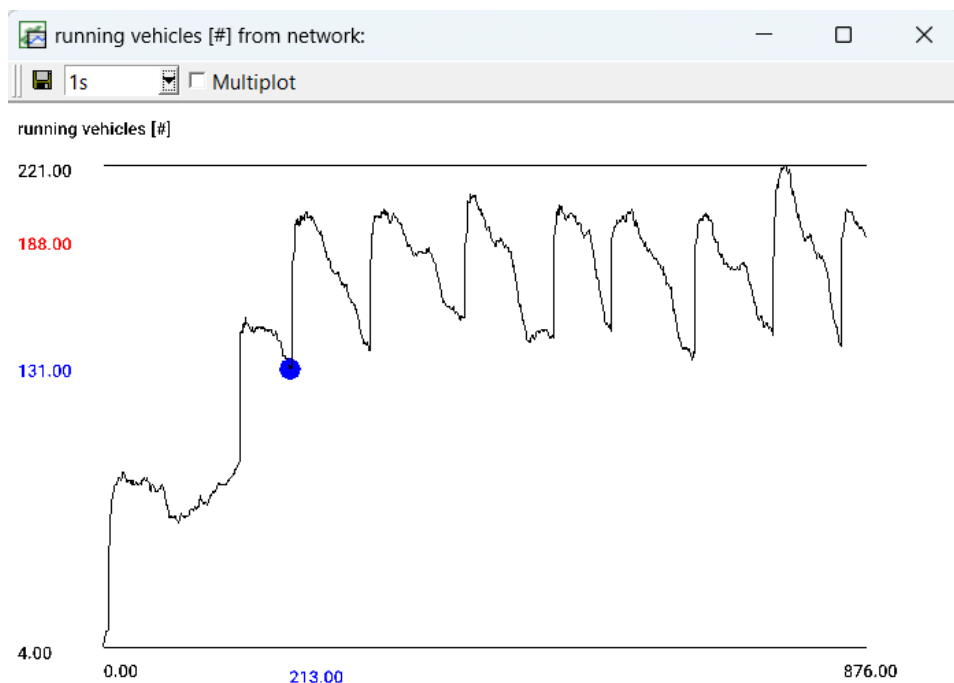
- (1) cenário sem fluxo,
- (2) cenário entrepico,
- (3) cenário pico (base),
- (4) cenário pico aleatório, e
- (5) cenário pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado.

Cada cenário utilizou a mesma configuração de rede e o mesmo conjunto de pontos de entrega, variando apenas os parâmetros de fluxo veicular, as condições operacionais e o tipo de modal empregado (carro Euro 4, carro Euro 6, ciclista e pedestre). Em todos os casos, foi adotado um período de warm-up para que os fluxos de tráfego aleatórios já estivessem plenamente ativos no momento em que o entregador inicia sua rota. Esse procedimento garante que o agente de entrega

enfrente, desde o primeiro deslocamento, as mesmas condições de circulação, interferências e atrasos presentes no restante da simulação, evitando um início artificialmente favorável. O tempo de warm-up foi definido em 213 segundos, valor a partir do qual a presença de veículos na malha atinge um comportamento estável, conforme ilustrado na Figura 29.

Além disso, nos cenários aleatórios (pico aleatório e pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado) também foram usadas sementes aleatórias no SUMO, implementadas via TraCI.

Figura 29 - Tempo de *Warm-up*



Fonte: Autor (2025)

No cenário sem fluxo, apenas o agente de entrega esteve presente, sem interferência de veículos adicionais. Essa configuração foi utilizada para comparar os efeitos do tráfego nas métricas de desempenho e emissões.

O cenário entrepico foi construído com o fluxo branco ajustado por um fator de 0,7 para representar um período intermediário de movimento. Esse cenário busca reproduzir condições de tráfego moderado, frequentemente encontradas entre o fim da manhã e início da tarde.

O cenário de pico manteve a mesma configuração estrutural, utilizando o fluxo branco em sua intensidade total, reproduzindo a situação de maior saturação viária e servindo como condição de referência máxima de densidade de tráfego urbano.

O cenário de pico aleatório integra simultaneamente os três fluxos gerados (branco, laranja e rosa), incorporando tanto o tráfego real quanto as variações estocásticas programadas via TraCI. Nesse cenário, os veículos do fluxo rosa permanecem entre 45 e 193 segundos nas vagas, representando desde uma parada rápida até o tempo máximo de uma entrega real registrado na simulação. A combinação entre tráfego intenso, movimentos aleatórios e ocupação variável das vagas busca reproduzir a imprevisibilidade característica do tráfego urbano, com interferências localizadas que alteram dinamicamente o tempo de percurso.

Por fim, o cenário pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado teve como objetivo avaliar os impactos das restrições operacionais associadas à busca por vagas disponíveis. Nesse cenário, o tempo de permanência nas áreas de estacionamento foi ampliado de forma proporcional, passando a variar entre 193 e 341 segundos, representando uma condição de saturação e competição por vagas. Essa modificação foi aplicada apenas às simulações dos veículos motorizados (carro Euro 4 e Euro 6), uma vez que pedestres e ciclistas não dependem de estacionamento.

A integração entre esses cenários permite avaliar não apenas o impacto dos diferentes volumes de tráfego, mas também a influência das variações estocásticas, da competição por vagas e dos tempos de operação associados às entregas, constituindo a base analítica para os resultados apresentados nas próximas seções.

A combinação entre esses cinco grupos e os diferentes modais resultou em 18 cenários distintos (Tabela 5), que serviram de base para a análise dos indicadores de desempenho como tempo de viagem, tempo perdido, velocidade média, consumo de combustível, emissões e tempo perdido.

O tempo de viagem corresponde ao período necessário para completar a rota, enquanto o tempo perdido reúne os momentos em que o agente não consegue manter sua velocidade desejada, seja por semáforos, desacelerações nas interseções ou, no caso dos modais motorizados, pela espera por vagas nas áreas de estacionamento. A velocidade média expressa a velocidade efetiva do deslocamento ao longo do trajeto, e, para os veículos a combustão, o consumo de combustível e as emissões atmosféricas permitem avaliar os impactos energéticos e ambientais associados ao

percurso. Esses indicadores são amplamente empregados em estudos de microssimulação por permitirem comparar o comportamento dos agentes entre diferentes cenários (Barceló, 2010; Behrisch et al., 2011).

Tabela 5 - Métricas dos Modais Para Cada Cenário

Cenários	Carro Euro 4	Carro Euro 6	Bicicleta	Pedestre
Sem fluxo	1 veículo; sem tráfego externo; tempo de estacionamento padrão (193 s máx.); emissões conforme classe HBEFA4/PC_petrol_Euro-4.	1 veículo; sem tráfego externo; emissões conforme HBEFA4/PC_petrol_Euro-6d.	Agente tipo WALKER ; speedFactor = 2,5; sem interferência de tráfego.	Agente tipo WALKER ; speedFactor = 1,0; sem interferência de tráfego.
Entrepico	Fluxo branco; comportamento de tráfego 30% menor que pico.	Fluxo branco; comportamento de tráfego 30% menor que pico.	Rotas fixas (Norte/Sul); interação com fluxo 30% menor que pico.	Rotas fixas (Norte/Sul); interação com fluxo 30% menor que pico.
Pico	Fluxo branco; tráfego pico	Fluxo branco; tráfego pico	Interação com fluxo do horário de pico	Interação com fluxo do horário de pico
Pico aleatório	Fluxo branco + laranja + rosa; tempo de estacionamento padrão (45–193 s); controle via TraCI; comportamento dinâmico.	Fluxo branco + laranja + rosa; tempo de estacionamento padrão (45–193 s); controle via TraCI; comportamento dinâmico.	Interação com fluxos aleatórios	Interação com fluxos aleatórios
Pico aleatório com estacionamento aumentado	Fluxo branco + laranja + rosa; tempo de estacionamento ampliado (193–341 s); controle via TraCI; comportamento dinâmico.	Fluxo branco + laranja + rosa; tempo de estacionamento ampliado (193–341 s); controle via TraCI; comportamento dinâmico.	Interação com fluxos aleatórios	Interação com fluxos aleatórios

Fonte: Autor (2025)

4.3.4. Definição das Rotas de Deslocamento

As rotas de deslocamento foram definidas de forma a garantir a cobertura completa dos 18 locais de entrega (LE1 a LE18) a partir do ELU, localizado na região central. Cada modal (carro, pedestre e ciclista) seguiu uma estrutura de roteirização específica, considerando suas limitações operacionais, capacidades de deslocamento e acesso à malha viária modelada.

4.3.4.1. Rota do veículo motorizado

O veículo de entrega, representando tanto o carro Euro 4 quanto o carro Euro 6, percorreu uma única rota, passando sequencialmente por todos os pontos de entrega e retornando ao ELU.

A definição da sequência de visitas foi precedida da aplicação de três heurísticas de roteirização distintas, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida, considerando o ponto ELU como origem e destino da rota e utilizando a matriz de distâncias viárias entre todos os dezoito locais de entrega. Entre as estratégias avaliadas, a heurística Farthest Insertion apresentou o melhor desempenho, resultando em uma rota de 12.164,51 metros. Esse método inicia a construção do trajeto conectando o ponto mais distante da origem e, posteriormente, insere os demais pontos de forma a minimizar o incremento total da distância (GOLDEN; WASIL; KELLY, 2002). A segunda melhor solução foi obtida com a heurística Cheapest Insertion, que produziu um percurso de 12.284,52 metros ao inserir, em cada iteração, o ponto cuja inclusão gera o menor aumento no comprimento total da rota (POTVIN; LAPORTE, 1996). Também foi testada a abordagem 2-opt aplicada sobre uma rota inicial gerada pelo vizinho mais próximo (Nearest Neighbor), alcançando uma distância de 13.994,76 metros. Embora útil como técnica de refinamento local, seu desempenho isolado foi inferior às heurísticas baseadas em inserção (LIN; KERNIGHAN, 1973). Diante desses resultados, a heurística Farthest Insertion foi escolhida para as simulações do modal carro Euro 4 e Euro 4, por oferecer a melhor combinação entre qualidade da solução e estabilidade do trajeto. A figura 30 mostra a rota usada em todas as simulações para o modal carro.

Figura 30 - Rota do Modal Carro



Fonte: Autor (2025)

A rota completa possui extensão total de 12,10 km, considerando o percurso de ida e retorno ao ponto de origem (ELU). Essa rota foi adotada de forma idêntica para ambos os tipos de veículos motorizados, permitindo comparações diretas entre os resultados de desempenho e emissões.

4.3.3.4. Rotas dos pedestres e ciclistas

Para os modais ativos, foram definidas duas rotas distintas, denominadas Rota Norte e Rota Sul, de modo a cobrir os 18 pontos de entrega de forma equilibrada entre as duas regiões da malha urbana.

A definição da sequência de visitas para o modal pedestre foi realizada por meio da heurística Nearest Neighbor, que conecta iterativamente o ponto mais próximo ao atual, construindo o percurso por proximidade geográfica (Golden; Wasil;

Kelly, 2002). Diferentemente dos veículos motorizados, os pedestres não estão sujeitos a restrições de circulação, como sentidos obrigatórios de via ou impedimentos de conversão, o que torna o deslocamento significativamente mais flexível. Em função dessa liberdade de movimento e da baixa variabilidade operacional associada ao caminhar, não foram testadas heurísticas alternativas: trajetórias pedonais tendem a seguir naturalmente o caminho mais curto disponível, tornando a lógica de vizinho mais próximo não apenas suficiente, mas também representativa do comportamento real desse modal. Essa abordagem é usualmente recomendada em problemas de roteirização envolvendo agentes não motorizados, nos quais a simplicidade do deslocamento prevalece sobre a necessidade de refinamentos avançados de otimização (Dalla Chiara et al., 2025).

As rotas resultantes estão representadas pelas Figuras 31 para a rota norte e 32 para a rota sul e suas seqüências são as seguintes:

Figura 31 - Rota Norte do Modal Ciclista e Pedestre



Fonte: Autor (2025)

Figura 32 - Rota Sul do Modal Ciclista e Pedestre



Fonte: Autor (2025)

Cada rota foi percorrida por um único agente (pedestre ou ciclista), totalizando dois trajetos independentes, sendo a rota norte com 3,79 km e a rota sul com 4,98km. Para fins de análise, os resultados obtidos em ambas as rotas do mesmo modal foram consolidados, representando o desempenho agregado de um único ciclo completo de entregas, com a finalidade de ter uma melhor comparação entre os modais.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas no software SUMO, considerando os diferentes modais aplicados à logística de última milha.

Os resultados estão organizados por modal, englobando as principais métricas geradas pelo SUMO: tempo total de viagem, tempo perdido, velocidade média, consumo de combustível e emissões de poluentes.

Os valores aqui apresentados serão posteriormente discutidos e comparados no Capítulo 5 – Análise dos Resultados.

5.1. CARRO EURO 4

A Tabela 6 apresenta os resultados médios obtidos para o veículo automotor com tecnologia Euro 4 nos diferentes cenários simulados. Foram analisadas cinco configurações: sem fluxo, entrepico, pico, pico aleatório e pico aleatório com tempo de estacionamento ampliado.

Tabela 6 - Resultados Modal Euro 4

Cenário	Tempo de viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)	CO ₂ (g)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)	PMx (g)	Combustível (g)
Sem Fluxo	41,73	7,86	33,73	4.654,77	32,68	0,22	1,64	0,34	1.509,01
Entrepico	41,95	8,08	33,38	4.650,65	32,21	0,21	1,63	0,33	1.507,67
Pico	43,72	9,60	31,21	4.815,87	32,34	0,21	1,70	0,33	1.561,23
Pico Aleatório	45,38	10,79	28,70	4.938,81	32,42	0,22	1,74	0,33	1.606,45
Pico aleatório estacionamento aumentado	63,18	28,34	18,76	6.333,82	31,10	0,21	2,28	0,32	2.053,34

Fonte: Autor (2025)

O tempo de viagem variou de 41,7 minutos no cenário sem fluxo para 63,2 minutos no cenário de pico aleatório com tempo de estacionamento ampliado,

representando um acréscimo de 51,4%. O tempo perdido aumentou progressivamente entre os cenários, de 7,9 minutos para 28,3 minutos, o que corresponde a uma variação de 259%.

Vale ressaltar também que o desvio-padrão no cenário de pico aleatório foi de 1,77 minutos, já no cenário de pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado, observou-se um aumento substancial na dispersão dos tempos de viagem com um desvio-padrão de 8,27 minutos.

As emissões médias de CO₂ cresceram de 4.654,77 g para 6.333,82 g (+36%), enquanto o NOx aumentou de 1,64 g para 2,28 g (+39%). Os valores de CO, HC e PMx mantiveram variações pequenas entre os cenários, com amplitudes inferiores a 10%. O consumo de combustível apresentou elevação de 1.509 g para 2.053 g (+36%), acompanhando o aumento do tempo de deslocamento.

A velocidade média reduziu-se de 33,7 km/h para 18,8 km/h, configurando uma queda de 44% entre os extremos simulados.

5.2. CARRO EURO 6

A Tabela 7 apresenta os resultados médios obtidos para o veículo automotor com tecnologia Euro 6 nos diferentes cenários simulados, abrangendo condições desde a ausência de tráfego até o pico aleatório com tempo de estacionamento ampliado.

Tabela 7 - Resultados Modal Euro 6

Cenário	Tempo de viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)	CO ₂ (g)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)	PMx (g)	Combustível (g)
Sem Fluxo	41,73	7,86	33,73	4.331,56	9,35	0,14	0,78	0,31	1.404,14
Entrepico	41,95	8,08	33,38	4.332,29	9,38	0,14	0,77	0,31	1.404,38
Pico	43,72	9,60	31,21	4.473,30	9,73	0,14	0,77	0,31	1.450,08

Pico Aleatório	45,38	10,79	28,70	4.683,29	10,30	0,14	0,76	0,31	1.518,13
Pico aleatório estacionamento aumentado	63,18	28,34	18,76	5.840,54	13,28	0,15	0,74	0,30	1.893,18

Fonte: Autor (2025)

O tempo de viagem, tempo perdido e velocidade média mantiveram-se praticamente idênticos aos observados no veículo Euro 4, uma vez que a dinâmica operacional (rota, fluxos e tempos de parada) foi preservada em todas as simulações. Assim, as diferenças entre os cenários refletem exclusivamente o comportamento das emissões e do consumo de combustível, decorrente da melhoria tecnológica do motor.

Vale ressaltar que o desvio-padrão tanto do cenário de pico aleatório, quanto do cenário de pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado mantiveram-se praticamente idênticos aos observados no veículo Euro 4.

O CO₂ variou de 4.331,56 g no cenário sem fluxo para 5.840,54 g no cenário de estacionamento ampliado, representando um aumento de 35,5%. O CO apresentou acréscimo de 9,35 g para 13,02 g (+39,3%), enquanto o HC manteve-se estável entre 0,14 e 0,15 g, com variação inferior a 7%. O NO_x apresentou leve redução de 0,78 g para 0,74 g (-5%), e o PM_x permaneceu praticamente constante, com valores próximos a 0,30–0,31 g.

O consumo de combustível acompanhou a tendência de aumento observada nas emissões de CO₂, passando de 1.404,14 g no cenário sem fluxo para 1.891,42 g no cenário de estacionamento ampliado (+34,7%).

5.3. BICICLETA

Nos cenários simulados com o modal bicicleta, o entregador percorreu as mesmas rotas utilizadas pelo veículo motorizado, totalizando 8,81 km de trajeto.

Foram executadas simulações para os cenários sem fluxo, pico e pico aleatório, visto que a adição de fluxos intermediários (entrepico) e o aumento do tempo

de estacionamento não geraram variação significativa nos resultados. A exclusão desses dois cenários justifica-se pela baixa influência do tráfego veicular sobre o comportamento das bicicletas, uma vez que esse modal opera de forma independente da disponibilidade de vagas e apresenta menor interferência da saturação viária. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Tabela 8 - Resultados Modal Bicicleta

Cenário	Tempo de Viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)
Sem fluxo	57,47	6,15	9,19
Pico	57,47	6,15	9,19
Pico Aleatório	58,18	6,90	9,09

Fonte: Autor (2025)

No cenário sem fluxo, o tempo total de viagem foi de 57,47 minutos, com tempo perdido médio de 6,15 minutos e velocidade média de 9,19 km/h. No cenário de pico, os valores permaneceram praticamente inalterados, indicando estabilidade operacional mesmo sob maior densidade de tráfego. Já no cenário de pico aleatório, observou-se um leve acréscimo médio: tempo total de 58,18 minutos, tempo perdido de 6,90 minutos e velocidade média de 9,09 km/h, correspondendo a um aumento de 1,23 % no tempo total e 12,20 % no tempo perdido. O desvio-padrão no cenário de pico aleatório para a bicicleta foi de 0,48 min.

5.4. PEDESTRE

O modal pedestre foi avaliado nos cenários sem fluxo, pico e pico aleatório, pelo mesmo motivo do ciclista. Os resultados obtidos apresentaram valores estáveis entre os cenários, com variações mínimas nos tempos totais e no tempo perdido, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados Modal Pedestre

Cenário	Tempo de Viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)
Sem fluxo	137,43	15,93	3,82
Pico	137,45	15,94	3,82
Pico Aleatório	137,82	16,31	3,81

Fonte: Autor (2025)

No cenário sem fluxo, o tempo total de viagem foi de 137,43 min, com tempo perdido de 15,93 min e velocidade média de 3,82 km/h. No cenário de pico, registrou-se 137,45 min de tempo total, tempo perdido de 15,94 min e velocidade média idêntica (3,82 km/h). Por fim, no cenário de pico aleatório, observou-se um tempo total médio de 137,82 min, tempo perdido de 16,31 min e velocidade média de 3,81 km/h. O desvio padrão para o pedestre no cenário de pico aleatório foi de 0,15 min.

O pedestre apresenta tempo perdido substancialmente maior que a bicicleta, mesmo sob as mesmas interferências viárias porque, além de possuir velocidade de deslocamento inferior, permanece mais tempo exposto à rede, acumulando atrasos em paradas, travessias e fases de aceleração. Já a bicicleta, simulada com velocidade ampliada, atravessa mais rapidamente os trechos críticos, o que reduz o tempo total em situação de atraso e, conseqüentemente, o tempo perdido associado.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados tem como objetivo comparar o desempenho dos modais simulados (carro Euro 4, carro Euro 6, bicicleta e pedestre) considerando aspectos operacionais (tempo de viagem, tempo perdido e velocidade média) e ambientais (emissões e consumo de combustível).

Os dados apresentados correspondem às médias consolidadas dos cenários simulados, permitindo uma visão integrada das diferenças de desempenho entre os modos de transporte.

6.1. COMPARAÇÃO OPERACIONAL

Os resultados operacionais obtidos nas simulações permitem observar o comportamento dos diferentes modais sob condições progressivamente mais complexas.

No cenário sem fluxo, o tráfego viário é inexistente, permitindo avaliar o desempenho isolado de cada modal, sem interferências de congestionamento ou disputa por vagas, o resultado pode ser visto na Tabela 10. O carro Euro 4 e o carro Euro 6 apresentaram desempenho idêntico, com tempo de viagem de 41,73 minutos, tempo perdido médio de 7,86 minutos e velocidade média de 33,73 km/h. A bicicleta teve tempo total de 57,47 minutos, ligeiramente superior devido à sua limitação de velocidade, embora mantenha um tempo perdido relativamente baixo (6,15 minutos). Já o pedestre apresentou o pior desempenho temporal, com 137,43 minutos de viagem e 15,93 minutos de tempo perdido, reflexo direto da menor velocidade média (3,82 km/h).

Tabela 10 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário Sem Fluxo

Modal	Tempo de viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)
Carro Euro 4	41,73	7,86	33,73
Carro Euro 6	41,73	7,86	33,73
Bicicleta	57,47	6,15	9,19

Pedestre	137,43	15,93	3,82
----------	--------	-------	------

Fonte: Autor (2025)

Com o acréscimo do fluxo viário, como o cenário de pico, nota-se aumento discreto nos tempos dos modais motorizados, observados na Tabela 11. O carro Euro 4 e o carro Euro 6 apresentaram 43,72 minutos de viagem e 9,60 minutos de tempo perdido, indicando leve impacto do congestionamento, que reduziu a velocidade média para 31,21 km/h. A bicicleta, por ser independente do tráfego motorizado, manteve praticamente o mesmo desempenho do cenário anterior, com 57,47 minutos e 9,19 km/h, demonstrando estabilidade operacional. O pedestre, igualmente imune às condições viárias, também manteve estabilidade, com 137,45 minutos de viagem e 15,94 minutos de tempo perdido.

Tabela 11 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário de Pico

Modal	Tempo de viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)
Carro Euro 4	43,72	9,60	31,21
Carro Euro 6	43,72	9,60	31,21
Bicicleta	57,47	6,15	9,19
Pedestre	137,45	15,94	3,82

Fonte: Autor (2025)

No cenário mais extremo, que combina tráfego intenso e maior tempo de estacionamento, observa-se o impacto mais expressivo sobre os modais motorizados, visto na Tabela 12. O carro Euro 4 e o carro Euro 6 registraram aumento significativo no tempo total de viagem (63,18 minutos) e no tempo perdido (28,34 minutos), com consequente redução da velocidade média para 18,76 km/h. A bicicleta foi pouco afetada, apresentando 58,18 minutos de viagem e 6,90 minutos de tempo perdido, com velocidade praticamente inalterada (9,09 km/h). Já o pedestre manteve valores similares aos demais cenários, com 137,82 minutos de viagem e 16,31 minutos de tempo perdido, confirmando sua constância operacional mesmo sob variações externas.

Tabela 12 - Comparação Operacional dos Modais no Cenário de Pico Aleatório com Tempo de Estacionamento Aumentado

Modal	Tempo de viagem (min)	Tempo Perdido (min)	Velocidade Média (km/h)
Carro Euro 4	63,18	28,34	18,76
Carro Euro 6	63,18	28,34	18,76
Bicicleta	58,18	6,90	9,09
Pedestre	137,82	16,31	3,81

Fonte: Autor (2025)

De modo geral, verifica-se que os modais motorizados apresentaram a maior variação de desempenho entre os cenários, sendo diretamente afetados pela presença de tráfego e pela ampliação do tempo de estacionamento. O carro, que no cenário sem fluxo percorria a rota em cerca de 41,7 minutos, teve um acréscimo superior a 50% no cenário extremo, refletindo o impacto das condições urbanas na operação. Por outro lado, bicicleta e pedestre mantiveram tempos de viagem superiores, mas praticamente constante, demonstrando pouca variação frente às variáveis alteradas nos cenários. Essa estabilidade reforça o potencial desses modais em contextos urbanos de alta densidade, sobretudo para entregas curtas ou em áreas com restrição de tráfego.

6.2. COMPARAÇÃO AMBIENTAL

Os resultados ambientais das simulações evidenciam as diferenças significativas entre os modais quanto à emissão de poluentes e ao consumo de combustível. Os veículos motorizados apresentaram variações conforme o nível de saturação viária, enquanto os modais ativos permaneceram com valores nulos em todos os cenários, reforçando sua neutralidade em termos de emissões diretas.

No cenário sem fluxo (Tabela 13), observou-se o padrão básico de emissões dos veículos, que serve como referência para os demais cenários. A comparação entre Euro 4 e Euro 6 mostra reduções consistentes em todos os poluentes já nessa condição, sobretudo em CO e HC. Essas reduções estão associadas à maior

eficiência da queima e aos sistemas de pós-tratamento mais avançados presentes no padrão Euro 6.

Tabela 13 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário Sem Fluxo

Indicador	Carro Euro 4	Carro Euro 6	Diferença (%) Euro 6 vs Euro 4
CO ₂ (g)	4.654,77	4.331,56	-6,93%
CO (g)	32,68	9,38	-71,26%
HC (g)	0,22	0,14	-36,36%
NOx (g)	1,64	0,77	-53,05%
PMx (g)	0,34	0,31	-8,82%
Combustível (g)	1.509,01	1.404,14	-6,96%

Fonte: Autor (2025)

À medida que o tráfego aumenta, como no cenário de pico (Tabela 14), observa-se um crescimento moderado nas emissões, especialmente em poluentes sensíveis ao aumento de ciclos de frenagem e aceleração, como NOx. Ainda assim, o Euro 6 mantém desempenho superior, com reduções proporcionais semelhantes às observadas no cenário básico, indicando estabilidade operacional mesmo sob maior interferência do tráfego. Essa consistência evidencia o benefício tecnológico do padrão Euro 6 em ambientes urbanos congestionados.

Tabela 14 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário de Pico

Indicador	Carro Euro 4	Carro Euro 6	Diferença (%) Euro 6 vs Euro 4
CO ₂ (g)	4.815,87	4.473,30	-7,11%
CO (g)	32,34	9,73	-69,92%
HC (g)	0,21	0,14	-33,33%
NOx (g)	1,70	0,77	-54,71%
PMx (g)	0,33	0,31	-6,06%
Combustível (g)	1.561,23	1.450,08	-7,13%

Fonte: Autor (2025)

No cenário com tráfego intenso e aumento no tempo de estacionamento (Tabela 15), o efeito da saturação viária torna-se mais evidente. As emissões aumentam significativamente, sobretudo CO₂ e combustível, devido ao longo tempo de operação em marcha lenta. Também há crescimento expressivo de NOx, indicando maior esforço do motor em condições de aceleração repetida. Apesar disso, o Euro 6 continua apresentando reduções substanciais em relação ao Euro 4, reforçando que sua tecnologia é mais robusta em contextos de alta variabilidade operacional.

Tabela 15 - Comparação Ambiental dos Modais no Cenário de Pico Aleatório com Tempo de Estacionamento Aumentado

Indicador	Carro Euro 4	Carro Euro 6	Diferença (%) Euro 6 vs Euro 4
CO ₂ (g)	6.333,82	5.840,54	-7,79%
CO (g)	31,10	13,28	-57,28%
HC (g)	0,21	0,15	-28,57%
NOx (g)	2,28	0,74	-67,54%
PMx (g)	0,32	0,30	-6,25%
Combustível (g)	2.053,34	1.893,18	-7,79%

Fonte: Autor (2025)

De forma geral, o Euro 6 reduziu entre aproximadamente 7% e 60% dos poluentes em relação ao Euro 4, com destaque para CO e HC, que são diretamente influenciados pela eficiência de combustão. Já os aumentos observados nos cenários de maior saturação demonstram a forte dependência das emissões em relação às condições viárias, reforçando a importância de intervenções que minimizem tempos de parada e circulação em baixa velocidade (aspectos ausentes nos modais ativos).

6.3. SÍNTESE COMPARATIVA

A integração dos resultados operacionais e ambientais evidencia como as características da operação da empresa influenciam diretamente o desempenho dos modais analisados. Os veículos leves, atualmente utilizados pelos entregadores,

mostraram elevada sensibilidade ao tráfego urbano e ao tempo de estacionamento, elementos que fazem parte da rotina diária da empresa, especialmente no acesso ao centro a partir da BR-101 e na disputa por vagas em áreas de alta demanda.

Em contraste, os modais ativos apresentaram comportamento praticamente constante entre os cenários simulados. O desempenho é determinado majoritariamente pela velocidade do próprio modal, e não pelas condições externas. Essa estabilidade operacional tem implicações diretas para a empresa: ao contrário do automóvel, bicicleta e pedestre não sofrem penalizações adicionais em períodos de maior fluxo ou quando há indisponibilidade de estacionamento, elementos críticos na região central.

A análise sugere que a combinação entre um ponto de apoio, como um ELU, e modais ativos, pode reorganizar a operação da empresa de forma mais coerente com as características do centro da cidade. Como o acesso inicial à área central já impõe deslocamento obrigatório pela BR-101, um veículo de maior capacidade (como um caminhão leve ou médio) poderia realizar apenas uma viagem até o ELU, reduzindo a circulação repetida de múltiplos carros leves na área. A partir desse ponto, modais ativos poderiam assumir as entregas de curta distância, operando com maior previsibilidade e sem impacto ambiental direto. Assim, os resultados das simulações mostram que a estrutura atual, baseada exclusivamente em veículos leves individuais, deixa a operação mais sujeita às oscilações do tráfego, enquanto uma divisão das etapas permite usar melhor as vantagens de cada modal no centro da cidade.

7. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo compreender o impacto de alternativas sustentáveis nos tempos de entrega e na redução de poluentes da logística de última milha, considerando a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental em um contexto urbano. Por meio de simulações microscópicas, foi possível analisar comparativamente o desempenho de quatro modais, carro Euro 4, carro Euro 6, bicicleta e pedestre, sob diferentes condições de tráfego e operação.

A simulação foi elaborada a partir da modelagem da região central de Joinville, utilizando dados reais de geometria viária via OpenStreetMap, fluxos de tráfego e tempos semafóricos. A rede foi configurada no software SUMO, com representação do ELU, locais de entrega, fluxos determinísticos e aleatórios e rotas operacionais dos modais. Ao todo, foram analisados 18 cenários, combinando variações de fluxo (sem fluxo, entrepico, pico, pico aleatório e pico aleatório com tempo de estacionamento aumentado) e modais (carro Euro 4, carro Euro 6, ciclista e pedestre). Para cada simulação, foram extraídos indicadores de tempo total de viagem, tempo perdido, velocidade média, consumo de combustível e emissões atmosféricas, permitindo uma avaliação quantitativa e sistemática dos efeitos observados.

Os resultados mostraram que o nível de saturação viária e o tempo de estacionamento têm grande influência sobre o desempenho dos veículos leves. No cenário básico, o carro Euro 4 apresentou o menor tempo de viagem, mas emissões mais elevadas. O Euro 6, apesar de apresentar comportamento operacional semelhante, registrou reduções expressivas em CO, HC e NOx, além de menor consumo de combustível, evidenciando ganhos diretos da adoção de tecnologias mais eficientes.

Nos cenários de tráfego intenso e de estacionamento ampliado, observou-se degradação significativa da eficiência operacional dos automóveis, com aumento superior a 50% no tempo total de viagem e quase quadruplicação do tempo perdido. As emissões acompanharam essa tendência, especialmente para o carro Euro 4, que ultrapassou 6.300 g de CO₂ no cenário extremo. Esses resultados evidenciam a sensibilidade dos modais motorizados às condições urbanas e à disponibilidade de vagas, fatores críticos nas operações de última milha em centros densos.

Em contrapartida, os modais ativos apresentaram estabilidade nos tempos de deslocamento e total ausência de emissões locais em todos os cenários simulados. A

bicicleta destacou-se como alternativa intermediária, conciliando eficiência temporal (em torno de 57 a 58 minutos para a rota completa) com impacto ambiental nulo, enquanto o pedestre manteve tempos significativamente superiores, em média 137 minutos, o que limita sua aplicabilidade a entregas curtas e densas. Ambos, contudo, demonstraram resiliência frente às variações de tráfego, uma característica desejável para ambientes urbanos de alta complexidade.

A análise consolidada reforça a existência de um trade-off entre desempenho operacional e impacto ambiental. Veículos motorizados mantêm vantagem em alcance e capacidade de carga, mas ao custo de maior geração de poluentes e vulnerabilidade às condições viárias. Já os modais ativos, embora mais lentos, representam soluções de emissão zero e previsibilidade temporal, ideais para curtas distâncias e áreas centrais com restrição de circulação veicular.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a adoção de alternativas sustentáveis, como veículos de menor emissão, bicicletas de carga e operações a pé, pode contribuir para a redução dos impactos ambientais da última milha, sem comprometer de forma significativa a eficiência logística, especialmente em cenários de alta densidade urbana. A microssimulação demonstrou ser uma ferramenta eficaz para quantificar esses efeitos, permitindo análises detalhadas e comparativas que apoiam decisões de planejamento urbano e logístico com foco em sustentabilidade.

Por fim, o estudo evidencia a importância de equilibrar eficiência operacional e responsabilidade ambiental nas operações de entrega urbana. A transição para sistemas mais limpos e otimizados depende não apenas de tecnologias veiculares, mas também de estratégias integradas de mobilidade, infraestrutura e gestão de estacionamento, de modo a reduzir as emissões e melhorar a fluidez nos centros urbanos.

Como limitação principal, destaca-se que a simulação depende dos parâmetros adotados e da representatividade dos dados disponíveis. A modelagem do comportamento dos agentes, a simplificação do ELU como área de estacionamento e a ausência de variáveis externas, como eventos climáticos ou oscilações sazonais de demanda, podem restringir a generalização dos resultados. Além disso, a simulação não considerou variações no perfil dos entregadores, diferenças de carga transportada ou estratégias de roteirização mais complexas.

Além dos resultados técnicos, o estudo também aponta caminhos relevantes para políticas públicas e práticas operacionais que podem melhorar a eficiência e

reduzir os impactos ambientais das entregas urbanas. Em primeiro lugar, a criação de vagas de estacionamento dedicadas a entregas rápidas, preferencialmente distribuídas em pontos estratégicos do centro, pode reduzir significativamente o tempo perdido por procura de vaga, diminuindo congestionamentos e emissões associadas a manobras e circulação desnecessária. Em segundo lugar, os resultados indicam que modais ativos, especialmente bicicletas de carga, são altamente eficientes para percursos curtos em áreas densas, reforçando o potencial de políticas municipais que incentivem sua adoção por meio de subsídios, infraestrutura adequada e programas de incentivo ao uso. Também se destaca a necessidade de regulamentar janelas de entrega, restringindo as operações com veículos motorizados durante horários de pico, mitigando conflitos com o tráfego geral e aumentando a fluidez do sistema. Por fim, ampliar e qualificar a infraestrutura cicloviária, com ciclovias e ciclofaixas contínuas, seguras e bem conectadas ao comércio local, pode fortalecer o uso de modais não motorizados, oferecendo um ambiente urbano mais adequado para operações sustentáveis de última milha.

Para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar o escopo da modelagem incorporando veículos elétricos e híbridos, não abordados neste estudo porque, apesar de apresentarem emissões locais nulas, tendem a reproduzir o mesmo comportamento operacional dos veículos convencionais no tráfego urbano; sua inclusão poderia considerar aspectos como infraestrutura de recarga, autonomia, economia e impacto no ciclo de vida. Também é relevante testar diferentes configurações de ELUs e estratégias de microconsolidação, além de explorar heurísticas de roteirização mais avançadas, como meta-heurísticas e algoritmos híbridos. A ampliação da área de estudo, a inclusão de variáveis como topografia, clima, padrões temporais de demanda e variabilidade maior no peso e tamanho das entregas, bem como a integração com dados em tempo real, especialmente ocupação de vagas e incidentes viários, podem tornar as simulações mais realistas e apoiar avaliações mais amplas sobre eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica das alternativas propostas.

8. REFERÊNCIAS

- AKISHINO, Pedro. **Introdução à Engenharia de Tráfego**. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Apostila, cap. 1, 2011. Disponível em: <https://tecnologia.ufpr.br/dtt/wp-content/uploads/sites/12/2018/02/PlanejTranspCap01.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- ALLEN, J.; BROWNE, M.; CHERRETT, T. **Survey techniques in urban freight transport studies**. *Transport Reviews*, v. 32, n. 3, p. 287-310, 2012.
- ASTARITA, Vittorio; GUIDO, Giuseppe; VITALE, Antonio; GIOFRÈ, Vincenzo P. **A new microsimulation model for the evaluation of traffic safety performances**. *European Transport / Trasporti Europei*, n. 51, p. 1–16, 2012. Disponível em: https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/6117/1/ET_2012_51_1%20-Astarita%20et.%20al..pdf. Acesso em: 5 nov. 2025.
- BAGGIO, Mariana Luersen. **Modelagem de medidas mitigadoras de tecnologias e fluxo veicular em interseções semaforizadas: estudo de caso em Joinville-SC**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of traffic simulation**. 2. ed. New York: Springer, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- BEHRISCH, M.; ERDMANN, J.; KRAJZEWICZ, D.; BENSON, T. **SUMO – Simulation of Urban Mobility: an overview**. In: *Proceedings of the Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL)*. Barcelona: IARIA, 2011.
- BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ANDRÉASSON, I. **Hybrid mesoscopic–microscopic traffic simulation**. *Transportation Research Record*, v. 1934, p. 218–225, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198105193400125>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Relatório de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo: 2023**. São Paulo: CETESB, 2023.
- CET-SP (Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo). **NT 242: Noções Básicas de Engenharia de Tráfego**. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/478886/nt242.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução n. 492, de 20 de dezembro de 2018**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=765&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 5 nov. 2025.

CONWAY, A. *et al.* **Urban micro-consolidation and last mile goods delivery by freight-tricycle in Manhattan: Opportunities and challenges.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2238, n. 1, p. 85-92, 2011.

COSTA, P. A. *et al.* Impactos ambientais do transporte urbano: uma análise das emissões de poluentes em grandes cidades brasileiras. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, n. 2, p. 145-160, 2019.

DABLANC, L. **Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize.** Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 41, n. 3, p. 280-285, 2007.

DALLA CHIARA, Giacomo; GOODCHILD, Anne. **The Role of Walking in Last-Mile Urban Deliveries.** Transportation, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11116-025-10633-6>. Acesso em: 30 out. 2025.

DELDOT (Delaware Department of Transportation). **Traffic Pattern Groups and Hourly Distribution Tables.** Delaware, 2024. Disponível em: <https://deldot.gov>. Acesso em: 20 ago. 2025.

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). **SUMO – Simulation of Urban MObility: User Documentation.** Disponível em: <https://sumo.dlr.de/docs/>. Acesso em: 13 maio 2025.

ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council). **Urban Freight Research Roadmap.** Bruxelas: ERTRAC, 2014. Disponível em: https://www.ertrac.org/wp-content/uploads/2022/07/ERTRAC_Alice_Urban_Freight.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

FHWA (Federal Highway Administration). **Traffic Monitoring Guide.** Washington, D.C.: USDOT, 2017. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

GEVAERS, R.; VAN DE VOORDE, E.; VANELSLANDER, T. **Characteristics and challenges of last-mile logistics.** In: PROCEEDINGS OF THE 12TH MANAGEMENT INTERNATIONAL CONFERENCE, 2011. Disponível em: <https://repository.uantwerpen.be/link/irua/83402>. Acesso em: 26 jun. 2024.

GOLDEN, B.; WASIL, E.; KELLY, J. **The impact of metaheuristics on solving the vehicle routing problem: algorithms, problem sets, and computational results.** In: CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. (Eds.). *Fleet management and logistics*. Boston: Springer, 2002. p. 33-56.

GRUBER, J.; KIHM, A.; LENZ, B. **A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services.** *Research in Transportation Business & Management*, v. 11, p. 53-62, 2014.

HOLGUÍN-VERAS, J.; AMAYA-LEAL, J.; WANG, Q. **Urban freight tour models: State of the art and practice.** In: *The state of the art in the European quantitative oriented transportation and logistics research*. New York: Springer, 2015. p. 97-128.

HOLLANDER, Y. **Transport modelling for a complete beginner.** Cambridge: CTthink!, 2016.

ICCT (International Council on Clean Transportation). **A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards.** Washington, D.C./Berlin/Brussels/San Francisco, jun. 2016. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

IEA (International Energy Agency). **CO2 Emissions from fuel combustion highlights.** Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2020>. Acesso em: 16 jun. 2024.

KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. **Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility.** *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3–4, p. 128–138, 2012.

LOPEZ, P. A.; BEHRISCH, M.; BIEKER-WALZ, L.; ERDMANN, J.; KRAJZEWICZ, D.; WIEDEMANN, R. **Microscopic traffic simulation using SUMO.** In: *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Maui: IEEE, 2018.

MÂKAHLEH, Hisham Y.; TAAMNEH, Madhar; DISSANAYAKE, Dilum. **Promoting Sustainable Transport: A Systematic Review of Walking and Cycling Adoption Using the COM-B Model.** *Smart Cities*, v. 5, n. 3, p. 79, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7590/5/3/79>. Acesso em: 30 out. 2025.

MAXNER, T. **Identifying the Challenges to Sustainable Urban Last-Mile Delivery: A Framework for Understanding Urban Freight Emissions and Policy Responses.** *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 4701, 2022. Disponível em: <https://www.urbanfreightlab.com/wp-content/uploads/2023/04/Challenges-Sustainable-Urban-Last-Mile-Delivery.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

MCKINNON, A. C. **Environmental sustainability: a new priority for logistics managers.** In: MCKINNON, A.; CULLINANE, S.; BROWNE, M.; WHITEING, A. (Eds.). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers, 2010. p. 3-30.

MOHER, D. *et al.* **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement.** PLoS Medicine, v. 6, n. 7, e1000097, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>. Acesso em: 5 nov. 2025.

MOROZ, M.; POLKOWSKI, Z. **The last mile issue and urban logistics: Choosing parcel machines in the context of the ecological attitudes of the Y generation consumers purchasing online.** Transportation Research Procedia, v. 16, p. 378-393, 2016.

OKONSKI, Paulo Antonio. **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.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Transportes e Logística) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

OLIVEIRA, L. K. *et al.* **Analysing the potential of performing last-mile bicycle deliveries: the perspective of Brazilian logistics operators.** Journal of Transport Geography, v. 85, p. 102676, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102676>. Acesso em: 6 nov. 2025.

OLIVEIRA, L. K. **Análise dos benefícios de um espaço logístico urbano na distribuição urbana de mercadorias.** Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção, v. 16, n. 3, p. 988-1006, 2016.

OLIVEIRA, L. K. **Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil.** *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 496-505, 2014.

QUAK, H.; KOSTER, M. **Delivering goods in urban areas: How to deal with urban policy restrictions and the environment.** Transport Reviews, v. 29, n. 1, p. 103-122, 2009.

RODRIGUE, J-P.; DABLANC, L. **City Logistics.** *In:* RODRIGUE, J-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. (Eds.). The geography of transport systems. 3. ed. New York: Routledge, 2013. p. 291-307.

SINDIPEÇAS. **Anuário da Frota Circulante 2024.** São Paulo: Sindipeças, 2024. Disponível em: <https://virapagina.com.br/sindipecas2024/62/>. Acesso em: 6 nov 2025.

APÊNDICE A – Resultados das Simulações

Tabela 16 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Sem Fluxo

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	41,73
Emissões (kg)	
CO2	4654,77
CO	32,68
HC	0,22
Nox	1,64
PMx	0,34
combustível	1509,01
Tempo perdido Carro (minutos)	7,86
Distancia percorrida (metros)	12104,88
Velocidade média (km/h)	33,73

Fonte: Autor (2025)

Tabela 17 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Entrepico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	41,95
Emissões (kg)	
CO2	4650,65
CO	32,21
HC	0,21
Nox	1,63
PMx	0,33
combustível	1507,67
Tempo perdido Carro (minutos)	8,08
Distancia percorrida (metros)	12099,74
Velocidade média (km/h)	33,38

Fonte: Autor (2025)

Tabela 18 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	43,72
Emissões (kg)	
CO2	4815,87
CO	32,34
HC	0,21
Nox	1,70
PMx	0,33
combustível	1561,23
Tempo perdido Carro (minutos)	9,60
Distancia percorrida (metros)	12109,46
Velocidade média (km/h)	31,21

Fonte: Autor (2025)

Tabela 19 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico Aleatório

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo de viagem (minutos)	42,43	46,47	46,95	45,13	46,85	48,17	45,13	43,67	45,23	43,72
Emissões (kg)										
CO2	4668,02	5055,74	5018,97	5058,73	5116,85	5104,10	4924,99	4774,47	4850,32	4815,87
CO	32,46	30,65	32,94	33,07	33,81	32,23	32,35	32,16	32,25	32,34
HC	0,21	0,20	0,22	0,22	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Nox	1,65	1,76	1,80	1,78	1,81	1,81	1,74	1,68	1,71	1,70
PMx	0,34	0,33	0,34	0,33	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
combustível	1515,99	1639,00	1673,79	1639,96	1663,08	1654,68	1596,61	1547,81	1572,40	1561,23
Tempo perdido Carro (minutos)	8,32	12,38	12,87	10,90	11,21	12,27	10,98	9,40	9,93	9,60
Distancia percorrida (metros)	12101,32	12109,48	12143,77	12099,02	12184,77	12104,20	12099,06	12099,76	12099,08	12109,46
Velocidade média (km/h)	33,05	27,87	27,71	29,57	28,81	28,00	29,43	26,68	27,07	27,87

Fonte: Autor (2025)

Tabela 20 - Resultados Modal Carro Euro 4 Cenário Pico Aleatório com Estacionamento Aumentado

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tempo de viagem (minutos)	66,23	58,52	52,40	70,25	74,75	67,27	54,23	56,78	61,58	76,25	56,75
Emissões (kg)											
CO2	4774,47	6082,64	5495,58	7194,00	7545,76	6856,89	5786,96	5980,14	6329,31	7523,81	6102,44
CO	32,16	31,67	29,68	31,00	30,38	30,92	31,93	32,17	31,30	28,65	32,23
HC	0,21	0,21	0,20	0,21	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,19	0,21
Nox	1,68	2,19	1,95	2,63	2,76	2,49	2,06	2,14	2,29	2,76	2,19
PMx	0,33	0,33	0,32	0,32	0,33	0,32	0,32	0,33	0,32	0,32	0,33
combustível	1547,81	1971,91	1781,59	2332,21	2446,25	2222,92	1876,05	1938,68	2051,88	2439,13	1978,33
Tempo perdido Carro (minutos)	32,14	22,48	18,46	36,04	38,25	31,72	19,67	21,88	26,73	41,35	23,03
Distancia percorrida (metros)	12094,58	12099,01	12104,16	12094,55	12099,68	12099,69	12104,15	12104,17	12094,55	12109,46	12094,52
Velocidade média (km/h)	15,87	20,08	22,59	14,62	13,99	16,01	21,80	20,42	17,99	13,21	19,80

Fonte: Autor (2025)

Tabela 21 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Sem Fluxo

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	41,73
Emissões (kg)	
CO2	4331,56
CO	9,35
HC	0,14
Nox	0,78
PMx	0,31
combustível	1404,14
Tempo perdido Carro (minutos)	7,86
Distancia percorrida (metros)	12104,88
Velocidade média (km/h)	33,73

Fonte: Autor (2025)

Tabela 22 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Entrepico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	41,95
Emissões (kg)	
CO2	4332,29
CO	9,38
HC	0,14
Nox	0,77
PMx	0,31
combustível	1404,38
Tempo perdido Carro (minutos)	8,08
Distancia percorrida (metros)	12099,74
Velocidade média (km/h)	33,38

Fonte: Autor (2025)

Tabela 23 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	43,72
Emissões (kg)	
CO2	4473,30
CO	9,73
HC	0,14
Nox	0,77
PMx	0,31
combustível	1450,08
Tempo perdido Carro (minutos)	9,60
Distancia percorrida (metros)	12109,46
Velocidade média (km/h)	31,21

Fonte: Autor (2025)

Tabela 24 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico Aleatório

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo de viagem (minutos)	42,43	46,47	46,95	45,13	46,85	48,17	45,13	43,67	45,23	43,72
Emissões (kg)										
CO2	4959,38	4678,70	4777,34	4759,70	4725,97	4589,83	4485,46	4712,84	4632,08	4511,55
CO	11,02	10,28	10,50	10,44	10,39	10,02	9,85	10,34	10,18	9,89
HC	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Nox	0,75	0,76	0,78	0,78	0,76	0,78	0,71	0,77	0,75	0,74
PMx	0,31	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,31	0,30
combustível	1607,61	1516,65	1548,62	1542,91	1531,97	1487,85	1454,01	1527,71	1501,54	1462,47
Tempo perdido Carro (minutos)	8,32	12,38	12,87	10,90	11,21	12,27	10,98	9,40	9,93	9,60
Distancia percorrida (metros)	12101,32	12109,48	12143,77	12099,02	12184,77	12104,20	12099,06	12099,76	12099,08	12109,46
Velocidade média (km/h)	33,05	27,87	27,71	29,57	28,81	28,00	29,43	26,68	27,07	27,87

Fonte: Autor (2025)

Tabela 25 - Resultados Modal Carro Euro 6 Cenário Pico Aleatório com Estacionamento Aumentado

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tempo de viagem (minutos)	66,23	58,52	52,40	70,25	74,75	67,27	54,23	56,78	61,58	76,25	56,75
Emissões (kg)											
CO2	5712,09	5693,02	5352,06	6092,01	5334,10	6077,15	5458,44	5934,03	6048,54	6016,14	6528,39
CO	12,93	12,81	12,00	13,91	12,02	13,91	12,29	13,55	13,85	13,70	15,06
HC	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16
Nox	0,75	0,80	0,76	0,75	0,73	0,72	0,76	0,72	0,71	0,75	0,73
PMx	0,30	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
combustível	1851,56	1845,38	1734,87	1974,68	1729,05	1969,85	1769,35	1923,48	1960,57	1950,09	2116,09
Tempo perdido Carro (minutos)	32,14	22,48	18,46	36,04	38,25	31,72	19,67	21,88	26,73	41,35	23,03
Distancia percorrida (metros)	12094,58	12099,01	12104,16	12094,55	12099,68	12099,69	12104,15	12104,17	12094,55	12109,46	12094,52
Velocidade média (km/h)	15,87	20,08	22,59	14,62	13,99	16,01	21,80	20,42	17,99	13,21	19,80

Fonte: Autor (2025)

Tabela 26 - Resultados Modal Ciclista Cenário Sem Fluxo

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	57,47
Emissões (kg)	
CO2	0,00
CO	0,00
HC	0,00
Nox	0,00
PMx	0,00
combustível	0,00
Tempo perdido (minutos)	6,15
Distancia percorrida (metros)	8816,40
Velocidade média (km/h)	9,17

Fonte: Autor (2025)

Tabela 27 - Resultados Modal Ciclista Cenário Pico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	57,47
Emissões (kg)	
CO2	0,00
CO	0,00
HC	0,00
Nox	0,00
PMx	0,00
combustível	0,00
Tempo perdido (minutos)	6,15
Distancia percorrida (metros)	8816,40
Velocidade média (km/h)	9,17

Fonte: Autor (2025)

Tabela 28 - Resultados Modal Ciclista Cenário Pico Aleatório

Simulação	1	2	3	4	5
Tempo de viagem (minutos)	57,78	58,55	58,55	57,55	58,47
Emissões (kg)					
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nox	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PMx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
combustível	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo perdido (minutos)	6,47	7,24	7,33	6,24	7,15
Distancia percorrida (metros)	8816,40	8816,40	8816,40	8816,40	8816,40
Velocidade média (km/h)	9,13	9,01	9,01	9,16	9,03

Fonte: Autor (2025)

Tabela 29 - Resultados Modal Pedestre Cenário Sem Fluxo

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	137,43
Emissões (kg)	
CO2	0,00
CO	0,00
HC	0,00
Nox	0,00
PMx	0,00
combustível	0,00
Tempo perdido (minutos)	15,93
Distancia percorrida (metros)	8776,28
Velocidade média (km/h)	3,82

Fonte: Autor (2025)

Tabela 30 - Resultados Modal Pedestre Cenário Pico

Simulação	1
Tempo de viagem (minutos)	137,45
Emissões (kg)	
CO2	0,00
CO	0,00
HC	0,00
Nox	0,00
PMx	0,00
combustível	0,00
Tempo perdido (minutos)	15,94
Distancia percorrida (metros)	8776,28
Velocidade média (km/h)	3,82

Fonte: Autor (2025)

Tabela 31 - Resultados Modal Pedestre Cenário Pico Aleatório

Simulação	1	2	3	4	5
Tempo de viagem (minutos)	137,72	137,43	137,45	137,42	137,70
Emissões (kg)					
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nox	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PMx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
combustível	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo perdido (minutos)	16,21	15,93	15,94	15,91	16,19
Distancia percorrida (metros)	8776,28	8776,28	8776,28	8776,28	8776,28
Velocidade média (km/h)	3,82	3,83	3,82	3,83	3,82

Fonte: Autor (2025)