

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Marina Laisa Mota da Silva

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM AS ALTERAÇÕES DO PLANO DE
MOBILIDADE URBANA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO: CASO DE USO
PARA A CIDADE DE SANTA MÁRIA**

Santa Maria, RS
2022

Marina Laisa Mota da Silva

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM AS ALTERAÇÕES DO PLANO DE MOBILIDADE URBANA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO: CASO DE USO PARA A CIDADE DE SANTA MARIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO, Área de Concentração em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.**

ORIENTADORA: Prof.^a Marcia Pasin

Santa Maria, RS
2022

Marina Laisa Mota da Silva

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM AS ALTERAÇÕES DO PLANO DE MOBILIDADE URBANA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO: CASO DE USO PARA A CIDADE DE SANTA MARIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO, Área de Concentração em Ciência da Computação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.**

Aprovado em 3 de junho de 2022:

Marcia Pasin, Dra. (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)

Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM)

Thiago Lopes Trugillo da Silveira, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2022

DEDICATÓRIA

À Luna, a melhor cadelinha que eu poderia ter.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Pabula Daniela e João Aloísio, minha base, pelo apoio incondicional.

Meus irmãos, Martina, Elísio, João Vítor, Everton e Aninha.

Aos queridos amigos, que me apoiaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu namorado, Marcos, pelo constante apoio, paciência e compreensão, nos momentos bons e ruins.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, pelo conhecimento oferecido durante a realização do curso de Mestrado.

Aos professores da banca, pelos conselhos, sugestões e interesses na melhoria e construção deste trabalho.

Á minha orientadora, Marcia Pasin, por toda paciência, amizade e lições durante a construção deste projeto.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos que possibilitou este projeto.

E a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte da minha vida acadêmica, muito obrigada.

A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você lembrar de acender a luz.

(Albus Dumbledore)

RESUMO

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM AS ALTERAÇÕES DO PLANO DE MOBILIDADE URBANA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO: CASO DE USO PARA A CIDADE DE SANTA MARIA

AUTORA: Marina Laisa Mota da Silva

ORIENTADORA: Marcia Pasin

Devido a eventos (jogos de futebol, acidentes, vestibular, etc.), sazonalidade, ou mesmo para ajustar a demanda de mobilidade devido à carga atual e futuras expansões, muitas prefeituras precisam repensar o sistema de transporte nas cidades. As alterações podem incluir o rodízio de veículos, o aumento dos valores de pagamento de taxas e custos com bilhetes de estacionamento ou limitação do número de veículos em circulação. De qualquer forma, mudanças no sistema de transporte nas cidades são sempre continuamente necessárias para garantir a mobilidade urbana adequada. Antes de propor alterações ao sistema real de transporte urbano de forma a resolver os problemas elencados, é necessário avaliar as melhorias que essas soluções propõem em relação ao sistema atualmente implementado. A simulação computacional abre uma nova oportunidade neste âmbito. Assim, este trabalho propõe a avaliação de diferentes cenários de infraestrutura, com suporte de simulação computacional, e seus impactos no tráfego para o sistema de transporte urbano. Como caso de uso, é utilizado o centro da cidade de Santa Maria, no sul do Brasil. Os cenários avaliados refletem as melhorias do Plano de Mobilidade Urbana (PMU) definido pelas autoridades municipais, criado com base na Política Nacional de Mobilidade Urbana. O suporte de simulação é fornecido pelo simulador aberto SUMO. Um dos grandes desafios desse trabalho é a falta de dados sobre o trânsito da cidade. Assim, a simulação foi calibrada a partir de informações disponíveis no site da prefeitura e em notícias da Internet. Mais especificamente, neste trabalho: (a) foram modelados diferentes cenários de trânsito na cidade de acordo com o PMU atual e futuro e (b) os cenários foram avaliados em um ambiente de simulação no que diz respeito às emissões de poluentes, distância percorrida pelos veículos e tempos de viagem. Os cenários modelados incluem modificações propostas pelo PMU que inclui fechamento de vias para veículos particulares e extensão de áreas exclusivas para pedestres.

Palavras-chave: Plano de Mobilidade Urbana. Simulação. SUMO. Santa Maria.

ABSTRACT

MOBILITY ASSESSMENT ACCORDING TO DIFFERENT ROAD INFRASTRUCTURE: USE CASE TO THE CITY OF SANTA MARIA IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: Marina Laisa Mota da Silva

ADVISOR: Marcia Pasin

Due to events (football games, accidents, college entrance exams, etc.), seasonality, or even to adjust mobility demand due current load and further expansions, many city halls need to rethink transportation system in cities. Changes can include the rotation of vehicles, augmentation of the fee payment values and cost of parking tickets or limiting the number of vehicles in circulation. Anyway, changes in the transportation system in cities are always continuously necessary to guarantee the adequate urban mobility. Before proposing changes to the real urban transport system, in order to solve the listed problems, it is necessary to evaluate the improvements that these solutions propose concerning the system currently implemented. Computer simulation opens a new opportunity in this scope. Thus, this work proposes the evaluation of different infrastructure scenarios, with computer simulation support, and their impact on traffic to the urban transportation system. As use case, the down town of the City of Santa Maria, in Southern Brazil is used. The assessed scenarios reflect the improvements to the Urban Mobility Plan (UMP) defined by the city authorities. Simulation support is provided by SUMO. One of the big challenges of this work is the lack of data about city traffic. So, the simulation was calibrated using information available in the prefecture and in Internet news. More specifically, in this thesis: (a) we model different city scenarios according to the current and future city UMP and (b) we evaluate these scenarios in a simulation environment with regard to pollutant emissions, traveled distance and travel time.

Keywords: Urban Mobility Plan. Simulation. SUMO. Santa Maria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – A distribuição atual do tráfego (viagens) no centro de nossa cidade está concentrada em três formas (topo) e no cenário ideal (baixo) segundo a dados da União Europeia. Fonte: autora, adaptado de (Diário de Santa Maria, 2015)	15
Figura 4.1 – Visualização do bairro Centro na aplicação JOSM (Java Open Street Map). Fonte: autora/JOSM	37
Figura 4.2 – Passo-a-passo da geração dos arquivos, da importação de arquivos até geração de resultados. Fonte: autora/OSM	39
Figura 4.3 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria com modificações sugeridas pelo PMU. Fonte: autora	40
Figura 5.1 – Imagem área definida pela prefeitura como área central, no PMU. Fonte: Prefeitura de Santa Maria	43
Figura 5.2 – Rua Acampamento em destaque no mapa. Fonte: autora	44
Figura 5.3 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria visto no OSM. Fonte: autora/OSM	45
Figura 5.4 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria visto pelo SUMO. Fonte: autora/OSM	45
Figura 5.5 – Mudanças propostas no PMU de Santa Maria. Fonte: autora/OSM	48
Figura 5.6 – Emissões de CO ₂ nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	50
Figura 5.7 – Emissões de CO nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	50
Figura 5.8 – Emissões de HC nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	51
Figura 5.9 – Emissões de NOX nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	51
Figura 5.10 – Tempo médio de viagem nos 6 cenários, simulação com 10,100 veículos. Fonte: autora	52
Figura 5.11 – Distância média de viagem nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	53
Figura 5.12 – Consumo médio de combustível nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora	53
Figura 5.13 – Em destaque, visão de engarrafamento causado com as alterações, do experimento 5. O engarrafamento deixa de existir no último cenário. Fonte: autora/OSM	58
Figura 5.14 – Mapa do bairro Centro de acordo com a prefeitura. Fonte: Prefeitura de Santa Maria (IPLAN Santa Maria, 2013)	59
Figura 5.15 – Em destaque, visão de engarrafamento causado com as alterações, do experimento 5. Fonte: autora/OSM	61
Figura 5.16 – Captura de tela no simulador com as ruas da região centro da Cidade de Santa Maria, para o experimento 5. Fonte: autora/OSM	62
Figura 5.17 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.0. Fonte: autora	63
Figura 5.18 – Aplicação desenvolvida em execução. Fonte: autora	64
Figura 5.19 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.1. Fonte: autora	65
Figura 5.20 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.2 Fonte: autora	66

Figura 5.21 – Emissões de poluentes, consumo de combustível e tempo de viagens para os 6 cenários analisados, considerando os três fluxos de trânsito, no experimento 4. 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre os simuladores	31
Tabela 5.1 – Parâmetros das simulações usados nos experimentos.....	42
Tabela 5.2 – Emissões de poluentes, distância média, consumo médio de combustível e tempo médio de viagem. Simulação com 10.100 (ou seja, 10.000 carros e 100 ônibus) veículos para o Experimento 1: proibindo o tráfego de veículos privados na Rua Acampamento (valores arredondados).....	46
Tabela 5.3 – Resultados do experimento com viagens pela área central de Santa Maria	52
Tabela 5.4 – Resultados das emissões de poluentes apenas na Rua Acampamento. Simulação com 10.100 (ou seja, 10.000 carros e 100 ônibus) veículos para o Experimento 3: proibindo o trânsito de veículos privados na Rua Acampamento.....	54
Tabela 5.5 – Valores dos parâmetros usados na simulação do experimento 4.....	54
Tabela 5.6 – Cenário 1: sem alterações	55
Tabela 5.7 – Cenário 2: 2 quadras.....	55
Tabela 5.8 – Cenário 3: 3 quadras.....	55
Tabela 5.9 – Cenário 4: 4 quadras.....	56
Tabela 5.10 – Cenário 5: 5 quadras com anel perimetral e alteração nas vias.....	56
Tabela 5.11 – Cenário 6: 5 quadras com anel perimetral, alteração nas vias e fechamento da Rua do Acampamento	56
Tabela 5.12 – Resultados do experimento com viagens curtas no bairro Centro.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADESM</i>	Agência de Desenvolvimento de Santa Maria
<i>AIMSUN</i>	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
<i>ANTP</i>	Associação Nacional dos Transportes Públicos
<i>CORSIM</i>	CORridor SIMulation
<i>DENATRAN</i>	Departamento Nacional de Trânsito
<i>FENABRAVE</i>	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
<i>FHWA</i>	Federal Highway Administration
<i>HBEFA</i>	Handbook of Emission Factors for Road Transport
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>IPEA</i>	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
<i>ITS</i>	Intelligent Transport System
<i>JOSM</i>	Java Open Street Map
<i>MATSim</i>	Multi-Agent Transport Simulation
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>MITSIMlab</i>	Microscopic Traffic SIMulation Laboratory
<i>OSM</i>	Open Street Map
<i>PMU</i>	Plano de Mobilidade Urbana
<i>PNMU</i>	Política Nacional de Mobilidade Urbana
<i>SUMO</i>	Simulation of Urban MObility
<i>TCP</i>	Transmission Control Protocol
<i>TraCI</i>	Traffic Control Interface
<i>TSS</i>	Transport Simulation Systems

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>NOX</i>	Óxido de Nitrogênio
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTRIBUIÇÃO	16
1.2	ROTEIRO	17
2	PLANO DE MOBILIDADE URBANA	18
2.1	POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA	18
2.1.1	Plano de Mobilidade Urbana da cidade de Santa Maria	20
2.1.2	Vantagens da urbanização de calçadas	22
2.1.3	Outros casos de urbanização	23
2.1.3.1	<i>Plano de Mobilidade de Cachoeira do Sul</i>	23
2.1.3.2	<i>A Rua das Flores: O Calçadão de Curitiba</i>	24
2.1.3.3	<i>Paulista Aberta - Programa na Avenida Paulista, em São Paulo</i>	24
2.1.4	Testes reais de implementação do PMU em Santa Maria	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	TRABALHOS RELACIONADOS	26
3.2	SIMULADORES	27
3.2.1	AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks)	27
3.2.2	ARCHISIM	28
3.2.3	CORSIM (CORridor SIMulation)	28
3.2.4	MATSim (Multi-Agent Transport Simulation)	29
3.2.5	MITSIMlab	29
3.2.6	SUMO (Simulação de Mobilidade Urbana)	29
3.2.7	Comparação entre os simuladores	30
3.2.8	Métricas avaliadas	31
3.2.8.1	<i>Consumo médio de combustível</i>	31
3.2.8.2	<i>Emissão média de poluentes</i>	32
3.2.8.3	<i>Tempo médio de viagem</i>	33
3.2.8.4	<i>Distância média percorrida</i>	33
4	METODOLOGIA	35
4.1	SCRIPTS	35
4.1.1	Netedit, Netconvert e Netgenerate	35
4.1.2	randomTrips	35
4.1.3	DUArouter	36
4.2	ELABORAÇÃO DO MAPA	36
4.3	PREPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	40
5	EXPERIMENTOS	42
5.1	EXPERIMENTO 1: PROIBIR O TRÁFEGO NA RUA ACAMPAMENTO PARA VEÍCULOS PRIVADOS	43
5.2	EXPERIMENTO 2: EXPANDIR A ZONA DE PEDESTRES	46
5.3	EXPERIMENTO 3: EMISSÃO DE POLUENTES MEDIDA EM UMA RUA OU QUADRA ESPECÍFICA	52
5.4	EXPERIMENTO 4: VARIAÇÕES NAS TAXAS DE INSERÇÃO	54
5.5	EXPERIMENTO 5: VIAGENS CURTAS	59
5.6	APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS AO LONGO DO TRABALHO	61
5.6.1	Aplicação cliente com TraCI	62

5.6.2	Aplicação de análise dos resultados	62
5.6.3	Aplicação Final	63
5.7	DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS	64
5.7.1	Experimento 1	64
5.7.2	Experimento 2	65
5.7.3	Experimento 3	66
5.7.4	Experimento 4	67
5.7.5	Experimento 5	68
5.7.6	Limitações do trabalho	68
5.7.7	Desafios encontrados	69
6	CONCLUSÕES	71
6.1	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

Devido a eventos (jogos de futebol, acidentes, vestibular, maratonas, etc.), sazonalidade, ou mesmo para ajustar a demanda de mobilidade devido à carga atual e futuras expansões, muitas prefeituras precisam repensar e ajustar o sistema de transporte nas cidades. O sistema de transporte público e a infraestrutura rodoviária frequentemente precisam ser ampliados, seja na capacidade máxima dos veículos, no custo das taxas de estacionamento, taxas ou no número de veículos permitidos em circulação, para garantir a qualidade de serviço exigida. "Os engarrafamentos, a falta de conexões e alternativas de mobilidade adequadas, bem como a falta de integração e interoperabilidade entre os diferentes meios de transporte reduzem as oportunidades econômicas das cidades e sua capacidade de geração de riqueza para os cidadãos, impedindo que se satisfaçam as necessidades básicas de mobilidade das pessoas" (Secretaria das Cidades. Governo do Estado do Ceará, 2017). Ainda, ao mesmo tempo, "a "rua" deixou de ser uma área social e de encontro na cidade para passar a ser uma infraestrutura para os veículos" (Secretaria das Cidades. Governo do Estado do Ceará, 2017). A preocupação por esta tendência fez com que determinados países, como o Brasil, programassem medidas de recuperação dos "padrões de mobilidade mais saudáveis, promovendo e favorecendo os modos de transporte mais sustentáveis" (Secretaria das Cidades. Governo do Estado do Ceará, 2017).

Essas medidas devem ser realizadas de forma permanente e incremental na rede de transporte urbano das cidades e são geralmente descritas no Plano de Mobilidade Urbana (PMU) organizado pelas autoridades municipais. Esse plano foi desenvolvido de acordo com as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Esta política foi baseada na Lei nº 12.587/12 – Política Nacional de Mobilidade Urbana (Governo Federal, 2013). Esta lei determina que cidades com mais de 20 mil habitantes elaborem e apresentem o PMU, com a intenção de planejar o crescimento de forma ordenada. A Lei determina que o PMU priorize transportes não motorizados e os serviços de transporte público coletivo. Normalmente, o PMU busca um equilíbrio de tráfego e melhorias na mobilidade urbana nas cidades e, portanto, oferecer melhor qualidade de vida aos cidadãos. Estas medidas buscam recuperar o espaço urbano para as pessoas, assegurando-lhes sua mobilidade com o objetivo de favorecer as interações sociais e econômicas. Além disso, organizar o trânsito para permitir melhor qualidade de vida às pessoas tem sido uma preocupação importante para muitas entidades governamentais (European Commission - Directorate-General for the Environment, 2004).

Antes de propor mudanças, é interessante observar como funciona a mobilidade nas cidades. Mais especificamente, na nossa cidade, Santa Maria, a distribuição das viagens no centro da cidade concentra-se em três formas; transporte privado (carros e motos),

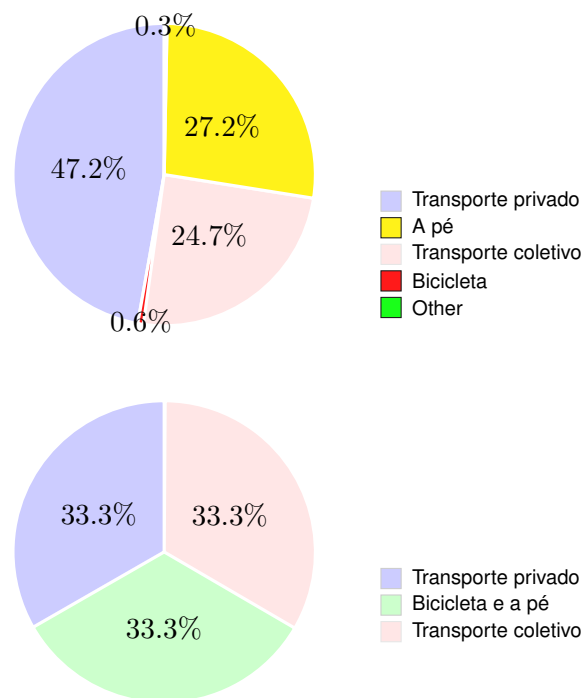


Figura 1.1 – A distribuição atual do tráfego (viagens) no centro de nossa cidade está concentrada em três formas (topo) e no cenário ideal (baixo) segundo a dados da União Europeia. Fonte: autora, adaptado de (Diário de Santa Maria, 2015)

pedestre e transporte público (ônibus, microônibus e veículos de transporte público), conforme descrito em Figura 1.1 (topo). Segundo (Diário de Santa Maria, 2015), a distribuição modal em Santa Maria é coerente com o modelo brasileiro atual, o transporte privado é protagonista na divisão modal (47%). Seguido do transporte a pé (27%), e depois o transporte coletivo (24%), a bicicleta ainda tem pouca participação na distribuição geral (0,6%). Uma análise detalhada do transporte privado revela que 30% dos deslocamentos são feitos por motoristas de carro e 10% por passageiros de carro (Diário de Santa Maria, 2015).

Ainda, segundo o estudo da Idom Ingeniería Y Sistemas (2012) apud (Diário de Santa Maria, 2015), a cidade ainda carece de uma grande transformação para alcançar o deslocamento sustentável. Alguns desafios para serem enfrentados incluem¹:

- 25% da população usa o veículo privado para percorrer uma distância de somente 600m, o que equivale a duas quadras,
- existem paradas de ônibus com 50m a 100m de distância entre elas na cidade,
- concentração de veículos nas vias principais, como é o esperado. 15 mil veículos circulam pela Rua do Acampamento rotineiramente.

O cenário ideal para a cidade seria que as viagens fossem igualmente distribuídas

¹<http://centralsul.org/2014/alternativas-colaborativas-defendem-o-meio-ambiente/>

em transporte particular, a pé e de bicicleta, e transporte coletivo, como retrata a Figura 1.1 (fundo).

Por fim, alterações pontuais de tráfego e infraestrutura também são importantes neste contexto e precisam ser planejadas e avaliadas antes de sua implantação plena. Por exemplo, devido à pandemia do novo coronavírus, o tráfego de bicicletas pode ter maior prioridade em uma cidade. Os ônibus devem circular com capacidade reduzida. Além disso, dados da FENABRAVE 2020² mostram que as vendas de automóveis aumentaram no Brasil por conta da pandemia. Assim, espera-se mais tráfego de veículos motorizados privado.

Nesse contexto, a simulação computacional desempenha um papel importante, pois permite avaliar novos cenários antes de seu desenvolvimento completo. Assim, as mudanças no PMU precisam ser estudadas a fim de observar os impactos financeiros e as melhorias na qualidade de vida das pessoas envolvidas. É necessário avaliar os benefícios e malefícios que essas mudanças propõem em relação à infraestrutura de suporte atualmente disponível.

1.1 CONTRIBUIÇÃO

Nesse sentido, este trabalho propõe a avaliação de diferentes cenários de tráfego e infraestrutura, com suporte de simulação computacional, e seus impactos no tráfego para o sistema de transporte urbano. Como caso de uso, é utilizada a área central e, em alguns experimentos, o bairro Centro da cidade de Santa Maria, no sul do Brasil. Os cenários avaliados refletem as melhorias para o PMU definidas pelas autoridades municipais. Para contemplar um espectro mais amplo, foi modificado o cenário de infraestrutura de acordo com o PMU. O suporte de simulação é fornecido pelo SUMO (BEHRISCH et al., 2011).

Mais especificamente, nesta dissertação:

- foram modelados diferentes cenários alterações no mapa de acordo com o PMU, da cidade atual e futuro e
- foram avaliados esses cenários em um ambiente de simulação no que diz respeito às emissões de poluentes, tempo de viagem, distância de viagem e consumo de combustível.

Um desafio para a realização deste trabalho é a falta de dados sobre o trânsito atual em Santa Maria. Os mapas da cidade estão disponíveis em diferentes plataformas, mas não há dados dinâmicos organizados como um conjunto de dados. Para tornar o trabalho

²<https://carros.ig.com.br/2020-09-11/pesquisa-mostra-impactos-da-pandemia-no-mercado-dos-carros.html>

realista, foram utilizadas informações disponíveis no site da Prefeitura e em outros sites, como portais de notícias da cidade.

1.2 ROTEIRO

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma. O PMU para Santa Maria e o Plano Nacional de Mobilidade Urbana são descritos na seção 2. Trabalhos relacionados são descritos na seção 3, juntamente com outros Planos de Mobilidade que foram realizados em outras cidades da região. Também são trazidos outros simuladores existentes e comparados. Na seção 4, a metodologia é descrita. Nesta seção são discutidas as ferramentas utilizadas, como foi realizada a elaboração dos mapas utilizados nos experimentos e a preparação das simulações que são realizadas na seção seguinte. A seção 5 descreve os experimentos realizados, juntamente com uma análise de cada resultado obtido em cada simulação. Também são descritas as aplicações que foram desenvolvidas para a realização dos experimentos citados anteriormente. Finalmente, a seção 6 conclui esta dissertação, com análises dos resultados.

2 PLANO DE MOBILIDADE URBANA

Planos de Mobilidade Urbana são parte da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Governo Federal, 2013), proposta pela Lei 12.587/12, conhecida como Lei da Mobilidade Urbana. Esta lei determina aos municípios a tarefa de planejar e executar a política de mobilidade urbana. O planejamento urbano, que já foi anteriormente estabelecido como diretriz pelo Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01) (Governo Federal, 2001), é instrumento importante e necessário para o crescimento sustentável das cidades no país.

2.1 POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA

A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) foi criada com a Lei de Mobilidade Urbana e "passou a exigir que os municípios com população acima de 20 mil habitantes, elaborem e apresentem um plano de mobilidade urbana, com a intenção de planejar o crescimento das cidades de forma ordenada" (STEFANELLO et al., 2020). A Lei determina que estes planos priorizem o modo de transporte não motorizado e os serviços de transporte público coletivo. Antes da Lei, a aplicação destes princípios e diretrizes só ocorria quando os municípios estavam com estes alinhados ou quando havia previsão em programas de financiamento ou repasse de recursos do Governo Federal para o setor" (ERBACH, 2011). A partir da Lei 12.587/12, há a obrigatoriedade de observar os preceitos que regem a Política de Mobilidade Urbana.

A PNMU tem como um dos principais objetivos incrementar a participação do transporte coletivo e não motorizado nos deslocamentos da população. Os princípios presentes na PNMU são os conceitos abrangentes que visam orientar a compreensão da Lei e podem servir como base para elaboração de novas normas a respeito no âmbito da mobilidade urbana.

Segundo o Art. 5º, a PNMU está "fundamentada nos seguintes princípios (Governo Federal, 2013):

- Acessibilidade universal;
- Desenvolvimento sustentável das cidades, nas dimensões socioeconômicas e ambientais;
- Equidade no acesso dos cidadãos ao transporte público coletivo;
- Eficiência, eficácia e efetividade na prestação dos serviços de transporte urbano;
- Gestão democrática e controle social do planejamento e avaliação da Política Nacional de Mobilidade Urbana;

- Segurança nos deslocamentos das pessoas;
- Justa distribuição dos benefícios e ônus decorrentes do uso dos diferentes modos e serviços;
- Equidade no uso do espaço público de circulação, vias e logradouros; e
- Eficiência, eficácia e efetividade na circulação urbana".

As diretrizes, por sua vez, são orientações sobre os caminhos a seguir para que sejam atingidos os objetivos desta Lei. As diretrizes destacam a necessidade de integração com as demais políticas urbanas e a priorização dos modos não motorizados e do transporte público coletivo.

Segundo o Art. 6º, PNMU é "orientada pelas seguintes diretrizes (Governo Federal, 2013):

- Integração com a política de desenvolvimento urbano e respectivas políticas setoriais de habitação, saneamento básico, planejamento e gestão do uso do solo no âmbito dos entes federativos;
- Prioridade dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados e dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado;
- Integração entre os modos e serviços de transporte urbano;
- Mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas na cidade;
- Incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico e ao uso de energias renováveis e menos poluentes;
- Priorização de projetos de transporte público coletivo estruturadores do território e indutores do desenvolvimento urbano integrado; e
- Integração entre as cidades gêmeas localizadas na faixa de fronteira com outros países sobre a linha divisória internacional".

O Plano de Mobilidade Urbana deve colocar em prática os princípios, objetivos e diretrizes da PNMU. Um plano de mobilidade efetivo é produto e ferramenta do planejamento sistêmico da mobilidade urbana do município, agrega os instrumentos de promoção da acessibilidade à cidade e os princípios de desenvolvimento sustentável. Além dos "princípios, objetivos e diretrizes da lei, o Plano de Mobilidade deve contemplar (Art. 24): (Governo Federal, 2013):

- I - os serviços de transporte público coletivo;

- II - a circulação viária;
- III - as infraestruturas do sistema de mobilidade urbana;
- IV - a acessibilidade para pessoas com deficiência e restrição de mobilidade;
- V - a integração dos modos de transporte público e destes com os privados e os não motorizados;
- VI - a operação e o disciplinamento do transporte de carga na infraestrutura viária;
- VII - os polos geradores de viagens;
- VIII - as áreas de estacionamentos públicos e privados, gratuitos ou onerosos;
- IX - as áreas e horários de acesso e circulação restrita ou controlada;
- X - os mecanismos e instrumentos de financiamento do transporte público coletivo e da infraestrutura de mobilidade urbana; e
- XI - a sistemática de avaliação, revisão e atualização periódica do Plano de Mobilidade Urbana em prazo não superior a 10 (dez) anos".

O artigo 23 da Lei traz alguns "dispositivos que podem ser usados pelo poder público municipal (Governo Federal, 2013):

- Acesso restrito a veículos motorizados em determinados locais e horários visando uma maior utilização do espaço público por pedestres e ciclistas.
- Adoção de padrões para controle de poluentes, em locais e horários determinados, com a possibilidade de condicionamento da circulação e do acesso ao atingimento da meta estipulada.
- Definição de faixas exclusivas para o transporte coletivo e para os modos não motorizados, como forma de distribuir de forma mais justa o uso do espaço físico das vias e privilegiar pedestres e ciclistas".

2.1.1 Plano de Mobilidade Urbana da cidade de Santa Maria

O PMU de Santa Maria foi definido em 2015 pela prefeitura e ainda não está totalmente implementado. Uma das razões para que isso ainda não tenha acontecido ocorre pelas mudanças na gestão da prefeitura, e que cada gestão tem diferentes prioridades e não há continuidade nesta política pública. O Plano visa concretizar os princípios e objetivos da PNMU, segundo diretrizes gerais e premissas de sustentabilidade definidas no

Plano Nacional de Mobilidade Urbana. "Compõem a Política Municipal de Mobilidade Urbana (Art. 6) (Prefeitura de Santa Maria, 2015):

- I - Política do transporte não motorizado;
- II - Política do transporte público coletivo urbano;
- III - Política da ordenação do tráfego de veículos pesados e regulação do transporte de cargas;
- IV - Política da educação para o trânsito;
- V - Política do tratamento, classificação e hierarquização da rede viária;
- VI - Política da estruturação da gestão e controle da mobilidade urbana; e
- VII - Política do impacto ambiental e urbanístico dos sistemas de transporte”.

Neste trabalho, foram tratadas as mudanças geradas pela Política do impacto ambiental e urbanístico dos sistemas de transporte (VII), com foco nas mudanças a serem realizadas na área central da cidade. As principais mudanças no PMU de Santa Maria, que promete mudar o comportamento do tráfego na cidade, incluem¹:

- Fechamento da Rua Acampamento para veículos privados durante o dia. Esta rua, muito importante para o escoamento do tráfego no centro da cidade, será exclusiva para ônibus, táxis e embarque e desembarque destes veículos. A circulação do tráfego privado somente será permitida entre as 20 horas da noite e as 6 horas da manhã;
- Ampliação do calçadão da Rua Salvador Isaía (zona de pedestres), com mais quatro quadras;
- Corredores de ônibus serão construídos nas avenidas Rio Branco, Medianeira, Presidente Vargas e Liberdade. No bairro Camobi, o corredor de ônibus será na Avenida Roraima, o principal acesso ao campus universitário da cidade. Outro corredor de ônibus será construído na Avenida Paulo Lauda, no bairro Tancredo Neves;
- As avenidas Nossa Senhora da Medianeira e Presidente Vargas serão de sentido único. A direção será bairro-centro na Avenida Medianeira, e centro-bairro na Avenida Presidente Vargas.
- As regiões planas da cidade ganharão pistas para os ciclistas.

¹<http://centralsul.org/2014/o-plano-que-promete-mudar-o-transito-de-santa-maria/>

Em geral, o PMU descreve a proibição ou restrição de tráfego em determinadas áreas, de forma que se possam criar zonas de pedestres e vias de uso exclusivo de transporte público. Especificamente, no calçadão da Rua Salvador Isaías, localizado no centro da cidade, as alterações do PMU incluem:

- extensão do calçadão (na Rua Dr. Bozano) até a Rua Duque de Caxias,
- novo calçadão da rua Floriano Peixoto entre as ruas Venâncio Aires e Niederauer,
- novo calçadão na rua Venâncio Aires entre a Avenida Rio Branco e a Rua Floriano Peixoto,
- extensão do calçadão da Rua Alberto Pasqualine para a Rua Floriano Peixoto.

Nos novos calçadões, prevê-se permitir a passagem de veículos privados dos moradores para chegar aos estacionamentos privados. Será permitida somente a circulação dos moradores que tenham residência naqueles eixos de pedestres, permitindo assim os acessos aos estacionamentos privados, localizados dentro dos empreendimentos.

Segundo dados do Instituto de Planejamento de Santa Maria (IPLAN)², a cidade possui 969 km de ruas, sendo 380 km de ruas asfaltadas e 20 km de ruas com concreto. As mudanças no PMU que serão tratadas neste trabalho são pertinentes a apenas uma pequena parte das ruas, no centro da cidade. De qualquer forma, é interessante avaliar o impacto dessas mudanças antes de colocá-las em prática.

2.1.2 Vantagens da urbanização de calçadas

Um dos pontos do PMU que é tratado neste trabalho se trata da urbanização das ruas Venâncio Aires, Floriano Peixoto e Coronel Niederauer e expansão do atual calçadão na rua Dr. Bozano. Nesta seção são apresentadas como exemplo das melhorias trazidas às cidades, a urbanização realizada nas cidades de Curitiba e São Paulo.

A urbanização é principalmente uma forma de oferecer aos pedestres espaços públicos exclusivos e democráticos, nos quais as pessoas encontram uma grande diversidade na oferta de produtos, serviços e lazer. Nessa vertente, uma cidade se constitui também no andar, “naquilo que a rua oferta em termos de possibilidade de experienciar a esfera do público no deslocamento que pode representar apenas uma espécie de circularidade-, mas também, enquanto espaço que resguarda redes de relações e produção de cultura na cidade” (ABREU da SILVEIRA, 2002). De acordo com (WIEDENHOEFT, 1979):

[...] uma cidade transformada em benefício dos pedestres se converte, acaso inconscientemente, em eixo de atividades e num ponto central do acontecer

²<http://iplan.santamaria.rs.gov.br>

da comunidade, tanto sendo seus participantes do lugar ou não. Um dos mais belos efeitos secundários da zona de pedestres consiste na fácil incorporação dos recém chegados e dos solitários. Obtê-lo na medida desejada é uma questão de sua concepção e de sua realização, tendo em conta o estado inicial do centro da cidade.

Para (da FONSECA, 2012), os calçadões assumem um papel preponderante em uma área urbana. Eles favorecem a manutenção do aspecto vital do centro, criam um ambiente extremamente concentrado, tendendo à saturação, pelo excesso de pessoas e veículos. São inseridos como forma de minimizar os conflitos de tráfego e dar espaço ao intenso fluxo de pessoas nas ruas, ganhando destaque como locais de passagem, cruzamento de caminhos, pontos de encontro e interesses variados. Formam corredores de comércio e serviços, atraindo um variado contingente de pessoas, valorizando atividades de rua, tornando assim o espaço concorrido. Como consequência, a criação de calçadões visam a melhoria das condições ambientais nos centros urbanos, trazendo redução nos níveis de poluição, melhora da imagem das ruas e preservação de áreas históricas. Com a redução do acesso de veículos à estas áreas ocorre a redução de níveis de poluição não somente do ar, mas também sonora e visual (da FONSECA, 2012).

2.1.3 Outros casos de urbanização

Nesta seção são trazidos outros casos em que foi realizada a urbanização de ambientes e seu planejamento, e quão benéfico pode ser para a população. Na sequência, são brevemente comentados os exemplos do PMU de Cachoeira do Sul, o calçadão de Curitiba e a Avida Paulista, em São Paulo.

2.1.3.1 Plano de Mobilidade de Cachoeira do Sul

O projeto de extensão da Universidade Federal de Santa Maria, “Planejamento Colaborativo da Mobilidade Urbana de Cachoeira do Sul: ações para elaboração do Plano de Mobilidade” (STEFANELLO et al., 2020), buscou acompanhar e auxiliar na implementação do PMU da cidade de Cachoeira do Sul, realizando o acompanhamento e auxílio da elaboração do documento junto da população cachoeirense, “desde a ideia inicial da sua criação até a entrega para as autoridades competentes, bem como as ações que estão sendo desenvolvidas e planejadas para sua implementação” (STEFANELLO et al., 2020). O documento, elaborado ao longo dos anos 2018 e 2019, contempla “várias áreas da mobilidade urbana, como: transporte público coletivo, transporte de cargas, circulação viária,

polos geradores de viagens, infraestruturas de mobilidade, áreas de estacionamento, acessibilidade universal, acesso e circulação restrita, integração dos transportes e mecanismos de financiamentos” (STEFANELLO et al., 2020).

2.1.3.2 *A Rua das Flores: O Calçadão de Curitiba*

Curitiba é uma cidade que se destaca pelo seu planejamento urbanístico. Conforme (MENEZES, 1996) apud (DITTRICH et al., 2015), no PMU de Curitiba, o objetivo foi "integrar as funções sociais da cidade, valorizando a presença do homem no seu meio ambiente: a cidade como cenário de encontro". "Assim, dentro do registrado pela mídia escrita, compreendeu-se que a política de urbanização adotada naquele espaço público previa a humanização da cidade" (DITTRICH et al., 2015).

Em especial, conforme (DITTRICH et al., 2015), o Calçadão de Curitiba, também conhecido como "A Rua das Flores", oferece "à população uma via pública sem tráfego de veículos e, assim, em teoria, dá uma maior segurança à população transitar em uma rua reservada, apenas para pedestres, cujo acesso de veículos é bastante restrito e limitado a determinados serviços e que fez de Curitiba um ponto de referência em planejamentos arrojados, demonstrando que, se bem planejados e administrados, têm vida útil prolongada". Destaca-se que "os calçadões exclusivos para pedestres devem visar à população e seu bem-estar de forma geral, promovendo o ser humano como o centro do planejamento urbano e o desenvolvimento econômico social em se pensando na cidade" (DITTRICH et al., 2015).

2.1.3.3 *Paulista Aberta - Programa na Avenida Paulista, em São Paulo*

A Avenida Paulista, em São Paulo, tem oferecido "novas possibilidades de uso e se transformou em espaço de lazer aos domingos e feriados através do programa denominado Paulista Aberta³" (PAIM, 2013). Ainda, de acordo com (PAIM, 2013), "por iniciativa da sociedade civil, em movimento iniciado em 2014, a proposta foi implantada e posteriormente oficializada como política pública, sendo ainda ampliada para outras áreas da cidade com o programa Ruas Abertas" (CASA CIVIL DO GABINETE DO PREFEITO. Prefeitura de São Paulo, 2016).

Desde outubro de 2016, o programa Paulista Aberta transforma a Paulista em espaço de lazer para a população através da restrição da circulação de veículos motorizados das 10 horas da manhã às 18 horas da tarde, todos os domingos e feriados. Neste período, a extensão da avenida fica livre para o uso público. Os frequentadores, além de caminhar,

³<https://www.paulistaaberta.minhasampa.org.br>

correr ou andar de bicicleta, interação com as diversas atrações oferecidas por artistas de rua, grupos de dança, entre outros.

De acordo o relatório (Bike Anjo, Corrida Amiga, ITDP, LABMOB, 2019), pesquisas realizadas de 2015 a 2018, indicam que os índices de aprovação do programa Paulista Aberta eram de 47% em outubro de 2015 e chegaram 97% em outubro de 2018. Entre os moradores da região da Paulista, os índices também foram altos: em 2018, 71% declararam ser favoráveis à abertura da Avenida Paulista para os pedestres. O programa Paulista Aberta é descrito na página Ruas Sem Carros⁴, disponível na Internet, que mostra "10 cidades do mundo que estão tentando mudar a prática de priorizar os carros para abrir mais espaços para as pessoas e o transporte sustentável".

2.1.4 Testes reais de implementação do PMU em Santa Maria

No dia 05 de outubro de 2021, a Prefeitura de Santa Maria realizou testes com ônibus vazios⁵ nos trechos que são alterados neste trabalho, nas ruas Acampamento, José Bonifácio, André Marques e Rio Branco. Para isso o fluxo nas ruas Venâncio Aires, Astrogildo de Azevedo, Tuiuti e Pinheiro Machado chegaram a ser bloqueados por agentes de trânsito. Conforme os ônibus passavam, as vias eram liberadas. A rua Venâncio Aires foi a que mais teve bloqueios, e onde mais motoristas buzonavam por não entender o que estava acontecendo. Problemas estes acarretados com os testes, que duraram cerca de uma hora, e causaram transtornos para a população. Esta é uma situação que poderia ter sido evitada com o uso de simulação para realizar os testes.

Já no dia 15 de dezembro de 2021, a prefeitura passou a permitir que táxis pudessem trafegar também na faixa exclusiva para ônibus na rua do Acampamento, em caráter experimental, até o dia 28 de fevereiro de 2022⁶.

⁴<https://uploads.knightlab.com/storymapjs/9b0a98fe966d53097b2817792e2e7bf9/cidades-sem-carros/index.html>

⁵<https://www.santamaria.rs.gov.br/noticias/23873-testes-de-possiveis-itinerarios-do-transporte-coletivo-no-centro-sao-concluidos-com-sucesso>

⁶<https://diariosm.com.br/noticias/geral/taxis-poderao-trafegar-em-corredor-de-onibus-da-rua-do-acampamento-a-partir-desta-quarta-feira-1.2389600>

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão de trabalhos de pesquisa relacionados a alterações no transporte urbano, planos de mobilidades e estudos relacionados, na base de dados do Google Scholar. Mais especificamente, foram buscadas as palavras-chave MOBILIDADE, TRANSPORTE PÚBLICO, POLÍTICAS PÚBLICAS (em português e em inglês) no título, resumo e termos de índice para artigos publicados de 2015 a 2021. Foram então escolhidos os trabalhos com propostas mais próximas à situação aqui avaliada. Como critérios de exclusão, foram excluídos artigos com foco diferente do proposto, que não fossem nas mudanças de mobilidade, nos efeitos de políticas de mobilidade. Foram limitadas as quantidades de artigos de países estrangeiros. Havia a ideia de limitar a trabalhos relacionados de cidades de porte semelhante à cidade tratada neste trabalho, porém houve grande dificuldade de encontrar trabalhos de simulação neste escopo, por isso foi necessário ampliar o escopo da pesquisa.

3.1 TRABALHOS RELACIONADOS

(GUEDES de SOUSA, 2017) propôs uma análise das condições existentes em termos de ocupação e mobilidade no centro da cidade de João Pessoa, PB, Brasil, fazendo um diagnóstico da situação atual e propondo melhorias para facilitar outros meios de transporte que não os privados. Foi então proposto um conjunto de ações para estimular as pessoas a optarem por deixar o carro e utilizar outros meios de transporte. Essas medidas incluem a criação de atritos para dificultar o acesso do veículo individual ao centro da cidade e a implantação de prédios-garagem em locais estratégicos com o objetivo de reduzir a ociosidade dos veículos nas ruas, para que as pessoas possam se integrar às linhas de ônibus ou racks de bicicleta com mais facilidade.

Em (da SILVEIRA RIBEIRO; FERREIRA de OLIVEIRA, 2004), foi feito um estudo sobre os aspectos envolvidos no projeto de frotas para o transporte público urbano. Um modelo de simulação foi desenvolvido na tentativa de dimensionar essas frotas com base em um maior número de parâmetros envolvidos no problema, propondo uma alternativa ao atualmente utilizado pela Associação Nacional dos Transportes Públicos (ANTP), no Brasil¹.

Em (GEURS; PAIX; WEPEREN, 2016), foi realizado um estudo sobre os impactos da implementação de políticas de integração de bicicletas em trens no sistema de transporte e como isso pode beneficiar os usuários de transporte público na Holanda. O estudo

¹<http://www.antp.org.br>

propôs formas de implantação de uma rede de bicicletas conectada à rede de transporte público de trens, com combinações de vias de acesso / saída e penalidades para usuários que infringirem as regras.

(CODECA; FRANK; ENGEL, 2015) propuseram criar um cenário para avaliar requisitos comuns em termos de tamanho, realismo e duração, de forma a ter uma base comum para avaliações. A rede rodoviária da Cidade do Luxemburgo foi utilizada como base para o cenário para reproduzir a procura real de tráfego e os padrões de mobilidade.

O trabalho de (ALLIARDI, 2016) analisou os possíveis impactos que podem ser gerados na cidade de Cachoeirinha, também no estado do Rio Grande do Sul, com a implantação de um projeto de faixa exclusiva para ônibus, na principal avenida da cidade, a Avenida General Flores da Cunha. Foram analisados impactos no comércio local nas áreas afetadas e da implantação da ciclo faixa. Com a implantação da ciclo faixa na avenida, foram retiradas as vagas de estacionamento no local, o que, de acordo com entrevista com os comerciantes locais, prejudicou o comércio na área afetada. As alterações no trânsito não foram mensuradas.

Este trabalho diferencia-se dos demais por propôr uma avaliação do trânsito da cidade de Santa Maria, em meio ao cenário proposto pelo PMU da Prefeitura da cidade, desenvolvido com base na Política Nacional de Desenvolvimento Urbano. São avaliados cenários alternativos de tráfego com a limitação de vias por onde os veículos podem passar. Para demonstrar o efeito das mudanças de infraestrutura, simulações são realizadas com o apoio do simulador SUMO, para poder avaliar os resultados das alterações propostas sem a necessidade de realizar testes reais, e verificar assim seu resultado em termos de tempo de viagem, alteração no volume de poluentes emitidos e consumo de combustível.

3.2 SIMULADORES

Esta seção apresenta uma breve descrição e comparação entre simuladores, para justificar a escolha do SUMO.

3.2.1 AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks)

AIMSUN (CASAS et al., 2010), disponível na TSS-Transport Simulation Systems (Espanha), é capaz de reproduzir as condições reais de tráfego de qualquer rede de transporte. É usado, entre outros usos, para desenvolver e testar os sistemas de controle de

tráfego, regras de gerenciamento de tráfego, controles de acesso, localização de pedágios, redes de transporte público, faixas de pedestres e pode trabalhar em conjunto com os sistemas de orientação de veículos e outras aplicações em tempo real. O AIMSUN está embutido no GETRAM, um ambiente de simulação composto por um editor de rede de tráfego (TEDI), um banco de dados de rede, um módulo para realização de simulação e uma Interface de Programação de Aplicação que visa a interface com outros modelos de simulação ou atribuição. Por meio de uma biblioteca adicional de funções DLL, as extensões GETRAM, o modelo é capaz de se comunicar com aplicativos externos definidos pelo usuário, como lógica de controle em tempo real.

3.2.2 ARCHISIM

O ARCHISIM (BONTE; ESPIÉ; MATHIEU, 2006), desenvolvido pela equipe de Modelagem e Simulação do Instituto Nacional de Investigação em Transportes e Segurança (INRETS), sediado na França, é um modelo de simulação comportamental, a sua implementação segue os conceitos de sistemas multiagentes. Os motoristas de veículos são agentes simulados. Suas funções são baseadas em três processos principais: percepção, decisão e ação. No ARCHISIM, existem dois tipos de componentes simulados: agentes e objetos. Os agentes irão coletar informações, traçar estratégias e, em seguida, enviar as informações. Os principais agentes de simulação são os motoristas e os pedestres. Os objetos são sinais de trânsito, por exemplo. Cada motorista simulado é um agente de *software* autônomo que evolui em um ambiente virtual e interage com outros agentes da simulação realizando seus objetivos de acordo com suas habilidades e a situação atual.

3.2.3 CORSIM (CORridor SIMulation)

CORSIM (HALATI; LIEU; WALKER, 1997), patrocinado e desenvolvido pela The Federal Highway Administration (FHWA), sediado nos Estados Unidos, é um software de simulação de tráfego para sistemas de sinalização, redes de estradas e sistemas de rodovias. É composto por um conjunto integrado de dois modelos que representam o ambiente de todo o tráfego. NETSIM representa o tráfego nas estradas da cidade. FRESIM representa o tráfego em estradas e rodovias. CORSIM fornece sua própria interface e software de driver. Além da interface do usuário, o CORSIM fornece acesso a um novo processador de dados de saída. O processador de saída permite ao usuário acumular estatísticas selecionadas pelo usuário e dados resumidos durante várias execuções do CORSIM. Ele grava os dados coletados em uma pasta de trabalho do Excel, um arquivo separado por vírgulas e/ou em um arquivo separado.

3.2.4 MATSim (Multi-Agent Transport Simulation)

MATSIM (MATSIM, 2009), desenvolvido pela Politécnica de Zurique, fornece um conjunto de ferramentas para implementar uma grande simulação baseada em agentes. É usado para simular o tráfego em Zurique (Suíça), Berlim (Alemanha), Padang (Indonésia) e Toronto (Canadá). Pode simular o tráfego de uma vasta região ao longo do dia. O MATSim busca uma abordagem baseada em atividades para geração de demanda. Ao contrário de outros pacotes de simulação de transporte, o MATSim é totalmente baseado em agente e gera planos de atividades individuais como entrada para o carregamento da rede, em vez de matrizes de origem e destino (dependentes de tempo) como normalmente usadas na atribuição dinâmica de tráfego.

3.2.5 MITSIMLab

MITSIMLab (YANG; KOUTSOPOULOS, 1996), desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT), é um simulador de tráfego que avalia os impactos de projetos alternativos de sistemas de gerenciamento de tráfego, sistemas de informação para viajantes, operações de transporte público e várias estratégias de ITS (Intelligent Transport Systems) no nível operacional e contribui para seu refinamento adicional. Ele pode avaliar sistemas avançados de gerenciamento de tráfego e sistemas de orientação rodoviária. O papel do MITSIMLab é representar "o mundo". Os elementos de tráfego e rede são representados em detalhes para capturar a sensibilidade dos fluxos de tráfego para as estratégias de controle e roteamento. MITSIMLab é um aplicativo de código aberto em que seus modelos principais foram escritos em C ++ e estão totalmente disponíveis.

3.2.6 SUMO (Simulação de Mobilidade Urbana)

SUMO (BEHRISCH et al., 2011) foi desenvolvido no Centro Aeroespacial Alemão. Neste simulador, os veículos podem se mover livremente, são simuladas colisões entre veículos e acidentes. Cada veículo tem sua própria estrada e o roteamento do veículo é dinâmico. No SUMO, são representadas tanto a infraestrutura da rede viária quanto a demanda de tráfego e tem sido utilizado em diversos problemas de pesquisa como escolha de rotas, algoritmos de semáforos, simulação de comunicação veicular, entre outros. O comportamento do veículo é levado em consideração pelo simulador, como a mudança de faixa. As estradas no SUMO são mostradas como uma pluralidade de faixas. E a largura de cada faixa é fixa. Além disso, a largura do veículo é fixa. E não leva em consideração os diferentes tipos de veículos. SUMO permite a modelagem de sistemas de tráfego intermo-

dal, incluindo veículos rodoviários, transporte público e pedestres. A implementação atual SUMO pode ser aprimorada através da adição de modelos personalizados (como aqueles que geram o fluxo de veículos e de pedestres). Além disso, o SUMO possibilita o uso de APIs para controlar remotamente a simulação, com implementações nas linguagens Python e Java.

A escolha do simulador SUMO para este trabalho se deu pela facilidade do uso, da disponibilidade de ferramentas necessárias na aplicação, pela familiaridade dos participantes do trabalho com o simulador e por sua popularidade, que permite que haja uma grande quantidade de informação disponível para pesquisa sobre a ferramenta na internet. Sua popularidade deriva do fato de ser de código aberto, altamente portátil e oferecer pacotes de simulação de tráfego microscópicos e multimodais projetados para lidar com grandes redes rodoviárias e estabelecer um banco de testes comum para implementar algoritmos e modelos para pesquisa de tráfego. Também é estável e em evolução contínua, apoiado por uma grande comunidade de desenvolvedores e usuários.

A simulação, neste trabalho, foi realizada usando como base o mapa da cidade de Santa Maria. O mapa da cidade de Santa Maria foi obtido via Open Street Map (OSM) e importado para o SUMO.

3.2.7 Comparação entre os simuladores

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação dos simuladores avaliados para o desenvolvimento deste trabalho. Os simuladores que foram comparados neste trabalho tem diferentes categorias:

- Microscópico: Modelos microscópicos simulam o movimento de cada veículo na rua, principalmente assumindo que o comportamento do veículo depende das habilidades físicas do veículo para se mover e do comportamento de controle do motorista (BEHRISCH et al., 2011).
- Macroscópico: Em modelos macroscópicos, o fluxo de tráfego é a entidade básica (BEHRISCH et al., 2011),
- Mesoscópico: As simulações mesoscópicas estão localizadas na fronteira entre as simulações microscópicas e macroscópicas (BEHRISCH et al., 2011). Aqui, o movimento do veículo é principalmente simulado usando abordagens de fila e veículos individuais são movidos entre essas filas.
- Comportamental: Neste tipo está somente o ARCHISIM, que tem como foque a simulação de comportamento do usuário dentro de um veículo, não de uma simulação do trânsito.

Tabela 3.1 – Comparação entre os simuladores

Nome	Autores	Tipo	Licença
SUMO	(BEHRISCH et al., 2011)	Microscópico	Aberta
ARCHISIM	(BONTE; ESPIÉ; MATHIEU, 2006)	Comportamental	Proprietário
AIMSUN	(CASAS et al., 2010)	Microscópico	Proprietário
MATSIM	(MATSIM, 2009)	Microscópico	Aberta
CORSIM	(HALATI; LIEU; WALKER, 1997)	Microscópico	Proprietário
MITSIMLab	(YANG; KOUTSOPOULOS, 1996)	Microscópico	Aberta

3.2.8 Métricas avaliadas

Neste trabalho são avaliadas diversas métricas para realizar a avaliação das alterações trazidas com a implementação do PMU na cidade, sendo elas o consumo médio de combustível, distância média percorrida e da emissão de poluentes.

De acordo com o PMU, a emissão de gases poluentes representa um grave problema ambiental nas cidades. Além de partículas em suspensão e gases como o óxido de nitrogênio, os veículos de carga ainda eliminam resíduos de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, chumbo, ozônio, entre outros (Governo Federal, 2013). Nesta seção então são descritas as métricas e o motivo de serem avaliadas.

3.2.8.1 Consumo médio de combustível

A quantidade de CO₂ que um veículo emite está diretamente relacionada à quantidade de combustível consumido. Por exemplo, um veículo a diesel que consome cerca de 3,7 litros de combustível por 100km, emite 95g de CO₂ por quilômetro. Um veículo a gasolina que consome cerca de 4 litros por 100km para as mesmas emissões de CO₂. De acordo com a metodologia utilizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) (RIBEIRO de CARVALHO, 2011), para ônibus é utilizado um fator de emissão médio de 2,6 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado na combustão, que somado com o valor médio de 0,5 kg de CO₂ emitidos para produzir e distribuir o combustível, chega-se a uma taxa final de emissão em torno de 3,2 kg de CO₂ em Km/L de diesel consumido. A eficiência do combustível, às vezes chamada de economia de combustível, é a relação entre a distância percorrida e o combustível consumido. O cálculo do consumo médio de combustível é semelhante ao cálculo da emissão média de CO₂ discutido anteriormente. O modelo de consumo de combustível está relacionado à classe de emissão de cada tipo de veículo. Um somatório do consumo de combustível de cada veículo é feito quando o veículo está em movimento na rota e quando está parado, em sinaleiras e engarrafamentos.

3.2.8.2 Emissão média de poluentes

Segundo (CETESB - Governo do Estado de São Paulo, 2013), "a poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais da atualidade, que compromete a saúde e qualidade de vida das populações. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que mais de 4 milhões de pessoas morrem no mundo em decorrência da poluição no ar. Aproximadamente 90% da população mundial está exposta a níveis de concentração de poluentes acima do recomendado pela OMS" (Organização Mundial da Saúde (OMS), 2018).

Os efeitos respiratórios relacionados à exposição da população a contaminantes atmosféricos podem ser atribuídos aos poluentes particulados e gasosos, emitidos por diferentes fontes, incluindo veículos automotores. Esta exposição tem levado a um aumento nos sintomas de doenças respiratórias, na procura por atendimentos em serviços de emergência e no número de internações e de óbitos provenientes de afecções do trato respiratório (ROMAN et al., 2015; DRUMM et al., 2014).

As emissões de veículos como automóveis, ônibus e motocicletas se constituem nas principais fontes de poluição nas cidades (RIBEIRO de CARVALHO, 2011), chegando a corresponder a cerca de 20% das emissões globais de CO₂, que é um dos principais gases causador do efeito estufa, sem considerar a emissão de outros gases também nocivos ao meio ambiente (NESAMANI, 2010; COLVILE et al., 2001). Essas emissões são compostas por diversas substâncias tóxicas, que ao serem absorvidas pelo sistema respiratório, produzem diversos efeitos negativos sobre a saúde. De acordo com (dos Santos Bento et al., 2012), além dos prejuízos para o meio ambiente, o CO₂ acarreta também problemas para os humanos, pois o gás é considerado um dos mais tóxicos para o homem, já que este possui características – não possuir cheiro, cor nem causar alguma irritação – que não permitem que estes sejam captados pelos sentidos. (MUSSE; LOPES; TAVARES, 2018) reforça que "(dos Santos Bento et al., 2012) considera os veículos automotores sendo "vilões ambientais", não somente pela quantidade de gases que emitem, mas também graças diversidade de poluentes produzidos".

Além do CO₂, estes veículos lançam para a atmosfera outros gases nocivos à saúde e que degradam o ambiente, como o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SOx) e de nitrogênio (NOx), além do material particulado (MP) e outras substâncias químicas como os hidrocarbonetos (HCs) vindos da queima dos combustíveis fósseis (DRUMM et al., 2014). "O monóxido de carbono (CO) é um gás resultante da queima incompleta do combustível e, quando inalado, reduz a capacidade do sangue de transportar oxigênio" (CETESB - Governo do Estado de São Paulo, 2013). "Os óxidos de nitrogênio (NOx) são formados quando o nitrogênio reage com o oxigênio em razão da alta temperatura na câmara de combustão" (CETESB - Governo do Estado de São Paulo, 2013). Representam "um dos poluentes de maior preocupação na atualidade e que requerem tecnologias atualizadas de controle, já que sua formação tende a aumentar com a eficiência dos motores,

principalmente nos veículos movidos a óleo diesel” (CETESB - Governo do Estado de São Paulo, 2013).

"Os hidrocarbonetos (HC) são a parcela de combustível não queimado ou parcialmente queimado que é expelido pelo motor, bem como vapor de combustível emitido de diversos pontos do veículo ou expelido durante o abastecimento do tanque” (CETESB - Governo do Estado de São Paulo, 2013).

Neste trabalho, para avaliar a emissão média de poluentes, foi realizada a soma das emissões de CO₂ de cada tipo de veículo, que é calculada ao longo do tempo de viagem na rota e divididos pela quantidade de veículos na simulação. Os ônibus presentes na simulação, apesar de serem em número muito menor que os carros, geram uma quantidade muito maior de poluentes.

3.2.8.3 Tempo médio de viagem

O deslocamento para o trabalho causa considerável estresse na mente e no corpo humanos e nas relações familiares. Cada minuto de viagem adicionado está relacionado a um aumento nos problemas de saúde. (COSTAL; PICKUP; MARTINO, 1988; RÜGER et al., 2017; ALI et al., 2021) mostraram que os passageiros de longa distância sofrem de distúrbios psicossomáticos em uma taxa muito maior do que as pessoas com viagens curtas para o trabalho. Os sintomas físicos variam de dores de cabeça e costas a problemas digestivos e hipertensão. As doenças mentais incluem distúrbios do sono, fadiga e problemas de concentração. Os passageiros que dirigem passam por dificuldades especiais - mau tempo, engarrafamentos e acidentes causam estresse.

De acordo com um estudo realizado pelo Transportation Economics Committee (COMMITTEE, 2004), outra vantagem se trata sobre custos para as empresas com o tempo que seus funcionários e veículos gastam em viagens e custos para os consumidores com tempo pessoal (não pago) gasto em viagens.

Neste experimento foi avaliado o tempo médio de viagem obtido nas simulações. O tempo médio de viagem é obtido pela média do tempo de viagem de cada veículo na simulação. Em cada cenário, o tempo médio de viagem é calculado do somatório de cada veículo, da diferença entre a hora de chegada e a hora de saída, dividido pela quantidade de veículos na simulação.

3.2.8.4 Distância média percorrida

De acordo com (KOVÁČIKOVÁ; LUGANO; POURHASHEM, 2017), o valor do tempo de viagem é um dos fatores mais importantes do planejamento de transporte e mobilidade

e uma série de países e organizações internacionais têm valores oficiais que projetam e políticas de transporte em uma base consistente. A redução na distância percorrida, como visto nos resultados das simulações, leva a um consumo menor de combustível, que leva a uma menor emissão de CO₂ em condições sem engarrafamento. No estudo realizado por (BARTH; BORIBOONSOMSIN, 2008), foi mostrado que as emissões de CO₂ variam muito, dependendo da velocidade média do veículo para uma variedade de trajetórias de veículos. O congestionamento pesado resulta em velocidades mais lentas e maior flutuação de velocidade, resultando em emissões de CO₂ mais altas. No entanto, viajar em velocidades muito altas também aumenta as emissões de CO₂. O melhor cenário é quando o tráfego como um todo se move em velocidades suaves e moderadas.

Neste trabalho para a geração das rotas dos veículos simulados foi usada a ferramenta DUArouter, que utiliza do algoritmo de Dijkstra para calcular sempre a menor rota possível para dados pontos de início e fim de cada viagem.

4 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia do trabalho. Nesta seção será explicado a forma que foi realizada para a geração dos mapas utilizados nas simulações, assim como as ferramentas que foram empregadas nestes. A seção inicia tratando os scripts que foram utilizados, em seguida a elaboração do mapa e por fim a preparação para as simulações que foram executadas e serão tratadas no capítulo seguinte.

4.1 SCRIPTS

Para a elaboração do mapa foram utilizados scripts que acompanham na instalação do simulador utilizado, o SUMO. Os scripts serão brevemente comentados no texto que segue.

4.1.1 **Netedit, Netconvert e Netgenerate**

O Netedit, Netconvert e Netgenerate são três scripts servem para a geração do arquivo do mapa. O netedit é um editor gráfico de rede incluído no SUMO. Usado para converter o arquivo gerado pelo JOSM para um arquivo .net, o arquivo da rede do mapa.

O netconvert importa arquivos de mapas digitais de diferentes fontes e os converte para serem usados pelo SUMO. O netconvert possui um conjunto completo de opções de processamento para ajustar a conversão do mapa. Os mapas podem ser obtidos com o suporte do OpenStreetMap (OSM), que é gratuito e tem uma boa representação no mundo real ou podem ser gerados pelo netgenerate.

O netgenerate é uma ferramenta de linha de comando que permite gerar três tipos diferentes de redes viárias geométricas: redes em grade, redes circulares(também conhecidas como spiders), e redes aleatórias.

4.1.2 **randomTrips**

randomTrips é outra ferramenta nativa do SUMO, um script na linguagem Python, que gera um conjunto de viagens aleatórias para uma determinada rede. Ele faz isso escolhendo a borda de origem e de destino uniformemente de forma aleatória ou com uma distribuição modificada, conforme descrito a seguir. As viagens resultantes são armazenadas em um arquivo XML adequado para DUArouter (que será tratado na próxima

subseção), que é chamado automaticamente se a opção (com um nome de arquivo para o arquivo de rota resultante) for fornecida. As viagens são distribuídas uniformemente em um intervalo definido por hora de início e hora de término em segundos. O número de viagens é definido pela taxa de repetição em segundos. Cada viagem tem um id que consiste em um prefixo e um número em execução. O script `randomTrips.py` gera as viagens de acordo com o mapa da rede, porém ele não verifica se todo o caminho de cada viagem é possível. Para isto é preciso usar outro script, o `DUArouter`.

4.1.3 DUArouter

`DUArouter` gera rotas de veículos com base na demanda para viagens individuais ou fluxos de veículos, usando os algoritmos de roteamento de rota mais curta (SUMO Wiki,), sendo este o algoritmo de Dijkstra (NOTO; SATO, 2000). As entradas obrigatórias do `DUArouter` são a rede rodoviária e o arquivo de veículos e, como saída, um arquivo com as rotas dos veículos. A demanda pode ser atribuída como viagens individuais com o elemento de viagem ou como um fluxo de veículos com elemento de fluxo, que fornece a origem e o destino dos veículos. O arquivo de demanda veicular inclui a definição dos tipos de veículos, o fluxo de veículos de acordo com seu tipo para diferentes intervalos de tempo (se necessário) e os pontos de origem e destino.

O `DUArouter` permite a configuração de paradas para um fluxo específico em um arquivo separado. Isso é especialmente útil para simular o comportamento dos ônibus. Quando chamado iterativamente, o `DUArouter` executa a atribuição dinâmica do usuário (DUA). Isso é facilitado pela ferramenta `duaiterate.py` que converge para um estado de equilíbrio (DUE).

4.2 ELABORAÇÃO DO MAPA

A rede de estradas SUMO representa um mapa de tráfego de veículos, consistindo em um conjunto de estradas através das quais os veículos se movem na simulação. Para criar arquivos de mapas, duas ferramentas citadas no tópico anterior foram utilizadas: `netgenerate` e `netconvert`. Além disso, uma rede rodoviária foi editada com outra ferramenta, o `netedit`. Na figura 4.2 é possível ver o passo-a-passo para a geração dos arquivos até o resultado final.

Para a geração dos arquivos, foram necessários o uso de:

- Open Street Map, um projeto colaborativo para criar um banco de dados geográfico editável gratuito. Nele é possível realizar o download do mapa em uma área selecio-

nada em um arquivo editável de extensão .osm;

- JOSM (Java Open Street Map), a aplicação usada neste trabalho para realizar o download e alteração do mapa exportado do Open Street Map.
- Scripts nativos da ferramenta Sumo, sendo estes netedit, netconvert, netgenerate, Duarouter e Randomtrips.
- TraCI, "Traffic Control Interface"(Interface de controle de tráfego). Esta interface oferece a possibilidade de comunicação bidirecional entre a aplicação do usuário e a simulação.

Para realizar a geração dos mapas a serem utilizados neste trabalho é necessário selecionar a área no mapa a ser convertida em um arquivo de rede, no aplicativo JOSM. Para este trabalho, foi selecionada a área central da cidade, que consta no Plano de Mobilidade Urbana, e em alguns experimentos, especificamente o bairro Centro da cidade, como visto na Figura 4.1.

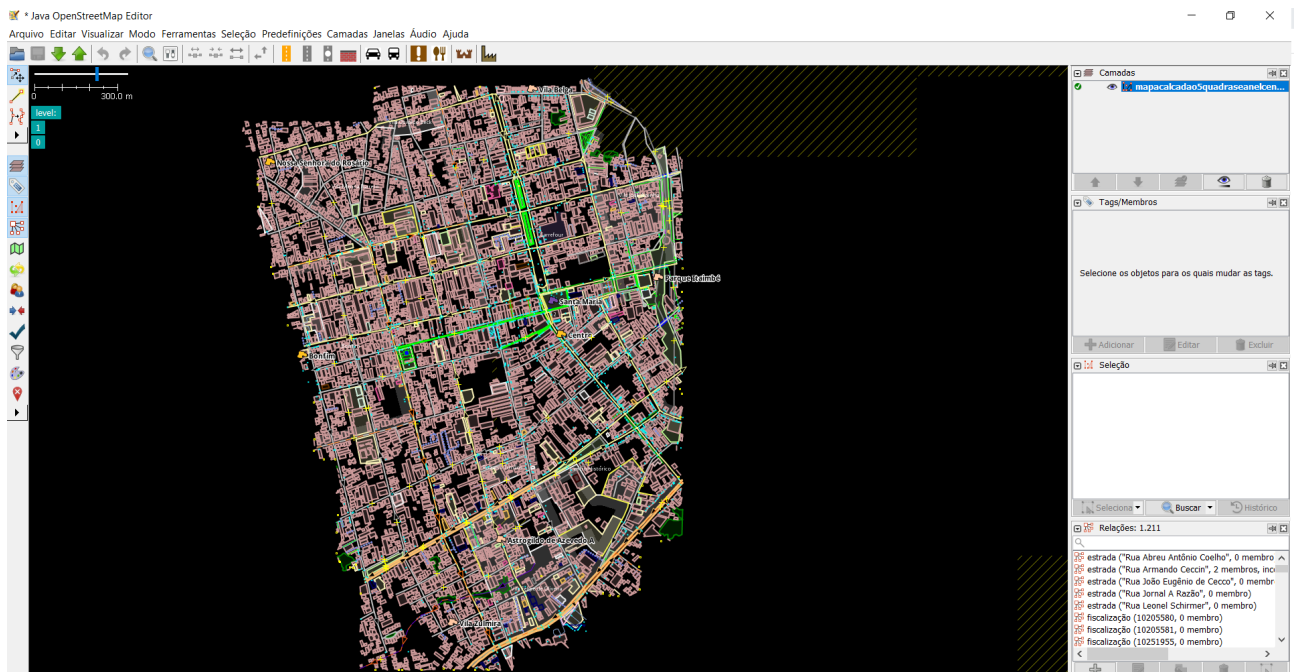


Figura 4.1 – Visualização do bairro Centro na aplicação JOSM (Java Open Street Map).
Fonte: autora/JOSM

Foram realizadas as alterações nos mapas de acordo com cada um dos seis cenários que são propostos neste trabalho de acordo com o PMU e foram gravadas em arquivos separados. Após isto, é utilizado o script do netedit, para realizar a conversão do arquivo .osm gerado pelo JOSM e convertido para um arquivo de extensão .net. Com este arquivo foram geradas então as viagens que ocorreram na área. Para isso é utilizado o script randomTrips para a geração das viagens de acordo com o seguinte comando:

```
python randomTrips.py -n mapacalcadao2quadras.net.xml -l -p 1
-e 15400 -o trips.trips.xml
```

Neste comando há: python - comando necessário para iniciar um script na linguagem Python randomTrips.py - comando necessário para iniciar o script -n - informa qual o arquivo de rede do qual serão geradas as viagens mapanovo2.net.xml - exemplo de arquivo de rede que foi usado neste trabalho -p - indica qual o intervalo de inserção de veículos. Neste exemplo será de 1 veículo a cada 5 segundos -e - tempo da inserção no mapa do último veículo da simulação -o - informa qual será o nome do arquivo com as viagens geradas pelo script.

Os arquivos gerados pelo randomTrips.py apontam a rota inicial e a final de cada viagem e o tipo de veículo.

```
<routes>
  <vType id="bus" vClass="bus"/>
  <trip id="0" depart="0.00" from="2267" to="-1917#1"/>
  <trip id="1" depart="0.50" from="-3609#4" to="-3042#0"/>
  <trip id="2" depart="1.00" from="2266" to="-5078#0"/>
  <trip id="3" depart="1.50" from="-5067" to="-2526#6" type="bus"/>
</routes>
```

Neste arquivo, a marcação (tag) informa as rotas, a marcação informa o veículo, o passo de início da sua rota e os trechos iniciais e finais de cada veículo. Com este arquivo, é necessário então ser realizada a criação das rotas por onde os veículos irão trafegar, e isto é realizado com o já mencionado script DUArouter. O script verifica se é possível chegar entre os pontos e realiza a rota mais curta para cada um dos veículos. Para fazermos uso do DUArouter, é usado o comando:

```
duarouter -n mapanovo2.net.xml --route-files
trips.trips.xml -o teste.rou.xml
```

Onde há: duarouter - o comando para chamar o script -n mapanovo2.net.xml- o nome do arquivo de rede que será utilizado na simulação --route-files trips.trips.xml o arquivo que foi gerado pelo randomTrips com as rotas -o teste.rou.xml- e o arquivo que será gerado como resultado. O arquivo xml gerado então fica no formato:

```
<routes>
  <vehicle id="0" depart="0.00">
    <route edges="2267 -3042#0 5049 5048 -1917#1"/>
  </vehicle>
  <vehicle id="1" depart="0.50">
    <route edges="-3609#4 -3609#3 -3609#2 -3042#01"/>
  </vehicle>
</routes>
```



```

</vehicle>
<vehicle id="2" depart="1.00">
  <route edges="2266 2312#0 3609#0 -5078#0"/>
</vehicle>
<vehicle id="3" type="bus" depart="1.50">
  <route edges="-5067 1917#2 2312#1 -2526#6 "/>
</vehicle>
</routes>

```

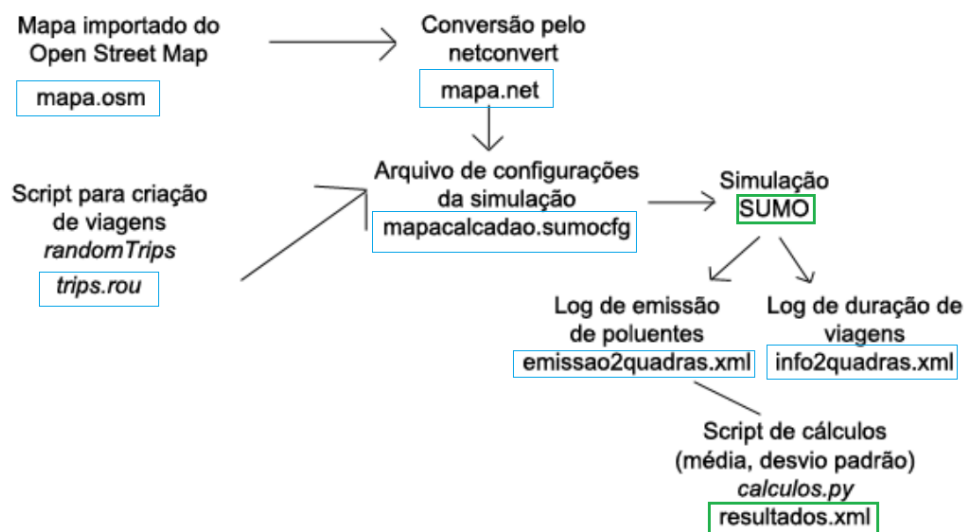


Figura 4.2 – Passo-a-passo da geração dos arquivos, da importação de arquivos até geração de resultados. Fonte: autora/OSM

Extraímos o mapa da cidade pela plataforma Open Street Map, utilizando a ferramenta Java Open Street Map (JOSM), levando em consideração a região descrita como centro na documentação da prefeitura. O mapa da cidade é visto antes de ser gerado na imagem 5.3. Já o mapa visível pela aplicação JOSM pode ser visto na imagem 4.1. O mapa do centro da cidade de Santa Maria com as modificações propostas do PMU é mostrado em Figura 4.3. Neste mapa, têm-se os seguintes elementos:

- em verde: é indicada a Rua do Acampamento, que terá seu fluxo de veículos modificado, vedando o trânsito de veículos privados. Atualmente, a Rua Acampamento tem a função de drenar veículos do centro para o bairro,
- em vermelho: a área que será reservada apenas para pedestres. Esta área é atualmente apenas um bloco e no futuro será ampliada, e
- em azul: o novo anel circular para drenar o tráfego de veículos no centro da cidade.

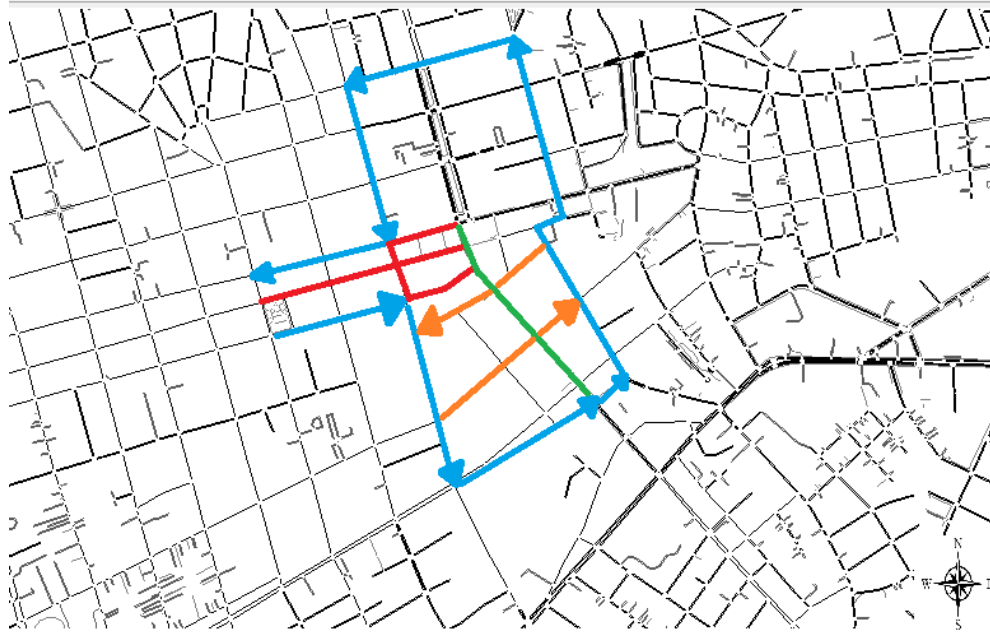


Figura 4.3 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria com modificações sugeridas pelo PMU. Fonte: autora

- em laranja: as ruas que tiveram o sentido alterado para a criação de binários no trânsito. ¹

4.3 PREPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Nas simulação, o tráfego foi configurado seguindo parâmetros reais do tráfego da cidade, utilizando como fonte de informação documentação da prefeitura e notícias na Internet. Para avaliar o impacto das modificações do PMU, a simulação foi executada usando o mapa da cidade atual e, em seguida, foram realizadas modificações no mapa de simulação para incluir os novos recursos propostos no PMU da cidade e, em seguida, a simulação foi executada novamente. Foram avaliadas principalmente as emissões de poluentes e o tempo de viagem.

Normalmente, os veículos que circulam em uma cidade são ônibus públicos, motocicletas, bicicletas, táxis, caminhões e veículos de transporte particular (Uber, 99 e outros) e veículos privados. Neste trabalho, há o interesse em verificar como se comporta o fluxo de veículos em função das mudanças sugeridas no PMU da cidade. Nesta simulação, foi distinguido somente entre ônibus e veículos privados. Em particular, foi verificado se a distância percorrida, os tempos de viagem foram penalizados e se a emissão de poluentes piora devido às mudanças necessárias no PMU. A emissão de poluentes é calculada automaticamente pelo próprio SUMO, que oferece a discriminação de diferentes poluentes,

¹Binário no trânsito é quando duas ruas ou avenidas se complementam, uma se contrapondo à outra.

incluindo CO₂, CO, HC e NOX. Foram desenvolvidas aplicações que analisam os arquivos gerados pelas simulações e realizam os cálculos e emitem relatórios com base nestes. O tempo de viagem é calculado individualmente por cada veículo simulado e, em seguida, a média é calculada usando uma aplicação desenvolvida por nós, com auxílio da interface TraCI.

Nesta implementação, o TraCI é utilizado para controlar a mobilidade dos veículos nos cenários propostos. SUMO prepara a simulação e espera que a aplicação desenvolvida se conecte e assuma o controle da simulação. Em seguida, os clientes se conectam a ele por meio de uma conexão TCP com a porta SUMO. O aplicativo cliente desenvolvido então envia comandos ao SUMO para controlar a execução da simulação, influenciando o comportamento do veículo individual. A simulação contém alguns arquivos XML para cada cenário, um arquivo de configuração e aplicação na linguagem Python. Ao executar essa aplicação, o software SUMO é iniciado. Ao iniciar a simulação, os veículos são inseridos e viajam nas estradas do mapa. Após o final da simulação, os arquivos de saída são gerados, que são usados para extrair as métricas que foram usadas para avaliar os diferentes usuários da estrada em vários cenários.

Para tornar os experimentos mais realistas, a descrição do cenário da simulação leva em consideração as seguintes premissas no que diz respeito à configuração dos parâmetros, de acordo com o Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul (DENATRAN/RS) e reportagem disponível na Internet²:

- o número de veículos que circulam diariamente na região central ao meio-dia: 50 mil. O número de pedestres que circulam diariamente na mesma região e horário é de 5 mil,
- levantamento realizado por pesquisadores universitários da cidade aponta que cerca de 100 mil veículos circulam diariamente na área central da cidade,
- 25% das pessoas viajam 600 metros (dois quarteirões) de carro,
- 52,8% da população utiliza modos sustentáveis (transporte público, a pé ou de bicicleta), sendo o ideal 66% da população utilizando estes meios de transporte,
- o maior fluxo de veículos se dirige ao bairro-centro.

²<http://centralsul.org/2014/o-plano-que-promete-mudar-o-transito-de-santa-maria/>.

5 EXPERIMENTOS

Nesta seção são descritos os experimentos realizados no âmbito deste trabalho. Inicialmente, é relatado como o cenário considerado na simulação foi descrito pela implementação, sem e com as alterações propostas pelo PMU. Em seguida, as métricas avaliadas na simulação são descritas. Finalmente, os resultados dos experimentos para cada modificação do PMU são comentados.

Em todos os experimentos realizados, os veículos foram gerados de forma aleatória com o script `randomTrips`, que cria pontos de partida e chegada aleatórios no mapa. A rota de todos os veículos gerados então é gerada pelo `DUArouter`, que calcula para todos eles qual a menor rota possível. Foi utilizada a proporção de 1/3 das viagens em veículos públicos (ônibus, microônibus, táxis e veículos particulares (de aplicativos, como Uber e 99) e 2/3 das viagens em veículos privados.

Assim, os experimentos foram conduzidos levando em consideração os valores descritos na página Santa Maria em Dados¹. Esta página é um projeto da ADESM (Agência de Desenvolvimento de Santa Maria), em parceria com o Município de Santa Maria, que traz informações e dados da cidade, organizado em um único sistema, e está disponível acesso para toda a população.

De acordo com dados do IBGE (2011)², Santa Maria possui uma frota de 176.278 veículos. Destes, aproximadamente 104.968 automóveis e 1.010 são ônibus. Para a realização das simulações neste trabalho, a quantidade de veículos foi escolhida de maneira proporcional, com 10.000 veículos privados (carros) e 100 veículos públicos (ônibus). Portanto, os experimentos foram realizados com 10.100 veículos no total.

Quanto à emissão de poluentes, o SUMO possui facilidades para avaliar essas métricas. O padrão de emissão de poluentes HBEFA3 (Handbook of Emission Factors for Road Transport) é implementado pelo SUMO.

Tabela 5.1 – Parâmetros das simulações usados nos experimentos

Parâmetro	valor
Velocidade média dos veículos	25 km/h
Taxa de Inserção	1 veículo/s
Número de veículos privados	10,000
Número de veículos públicos	100
Tempo de simulação	≈ 4 horas
Tipos de veículos	carros e ônibus
Classe de veículos privados	HBEFA3/PC _{GEU4}
Classe de ônibus	HBEFA3/Bus

¹<https://santamariaemdados.com.br/8-infraestrutura/9-1-transportes/>

²<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/santa-maria/pesquisa/22/0>

Os experimentos que foram realizados neste trabalho são:

- Experimento 1: proibir o tráfego na Rua Acampamento para veículos privados
- Experimento 2: expansão a zona de pedestres
- Experimento 3: emissão de poluentes medida em uma rua ou quadra específica
- Experimento 4: variações nas taxas de inserção
- Experimento 5: viagens curtas

Nos experimentos 1-5 é usado como mapa o que foi definido pelo PMU como 'área central', onde estas mudanças estão localizadas, como visto na Imagem 5.4. A área definida pelo centro é a área que está dentro da área pontilhada na Figura 5.1.

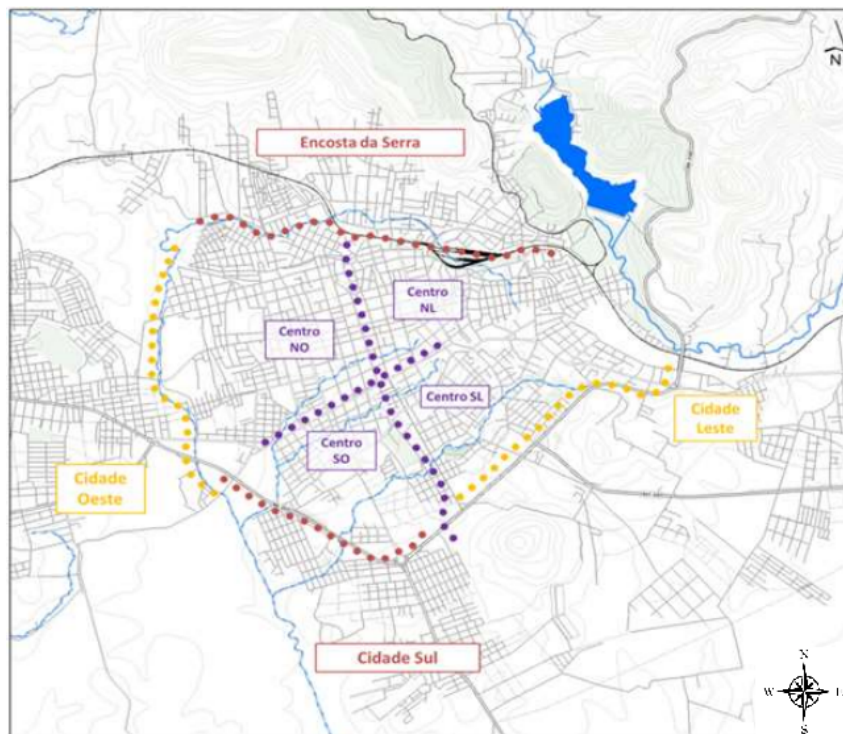


Figura 5.1 – Imagem área definida pela prefeitura como área central, no PMU. Fonte: Prefeitura de Santa Maria

5.1 EXPERIMENTO 1: PROIBIR O TRÁFEGO NA RUA ACAMPAMENTO PARA VEÍCULOS PRIVADOS

Uma possível forma de tornar a rua mais atrativa para os pedestres é proibir o trânsito em algumas avenidas, aumentando os espaços urbanos para os pedestres. Outra

opção menos radical é reduzir o tráfego, limitando a circulação de alguma categoria de veículos.

Um importante eixo comercial do centro da cidade começa na Avenida Rio Branco e segue pela Rua do acampamento, concentra uma grande parte do comércio varejista da cidade. Porém há aqui um problema do transporte de carga e descarga, que se agrava pela mistura de atividades e tipos de transporte público, privado e de carga na mesma estrada. Esta falta de regulação a respeito cria congestionamento pela incompatibilidade de usos na via e dificulta o trânsito em geral, bem como toda atividade comercial (Governo Federal, 2013). Da mesma forma que em outros pontos da cidade, se observam irregularidades do setor privado do transporte no estacionamento. Pesquisas realizadas pela prefeitura mostram que esta área (Rua Acampamento, Rua Pinheiro Machado e Rua José Bonifácio) concentra uma parte importante do congestionamento de Santa Maria pelas atividades comerciais, hospitalares e também educativas.

Assim, de acordo com o PMU, a Rua Acampamento ficará aberta somente para veículos de transporte público, sendo liberado à noite no horário entre as 20 horas da noite e as 6 horas da manhã.

Com a disponibilidade total do PMU, essa via será exclusiva para ônibus, microônibus, táxis e para embarque / desembarque destes veículos no intervalo entre as 20 horas da noite e as 6 horas da manhã. À noite, o tráfego será liberado conforme a situação atual, para todos os tipos de veículos. A Rua Acampamento é mostrada em destaque em Figura 5.2.

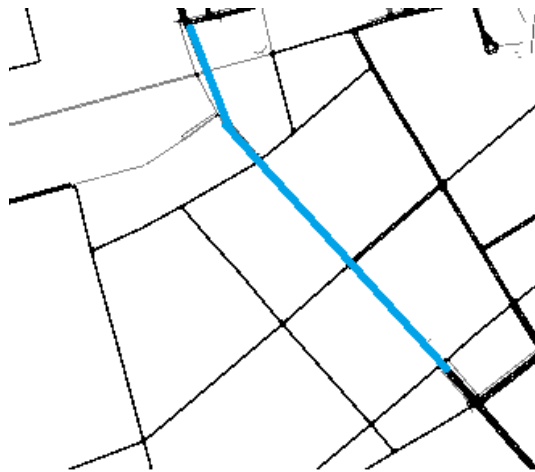


Figura 5.2 – Rua Acampamento em destaque no mapa. Fonte: autora

Foram investigadas as métricas em questão - emissão de poluentes, tempo de viagem e distância percorrida para ambos os cenários, com e sem veículos privados permitidos, sendo com veículos privados a situação atual. Os parâmetros completos da simulação são descritos na Tabela 5.1.

Os resultados da simulação são mostrados na Tabela 5.2. As métricas que foram consideradas na simulação, emissão de poluentes, distância percorrida e tempo de

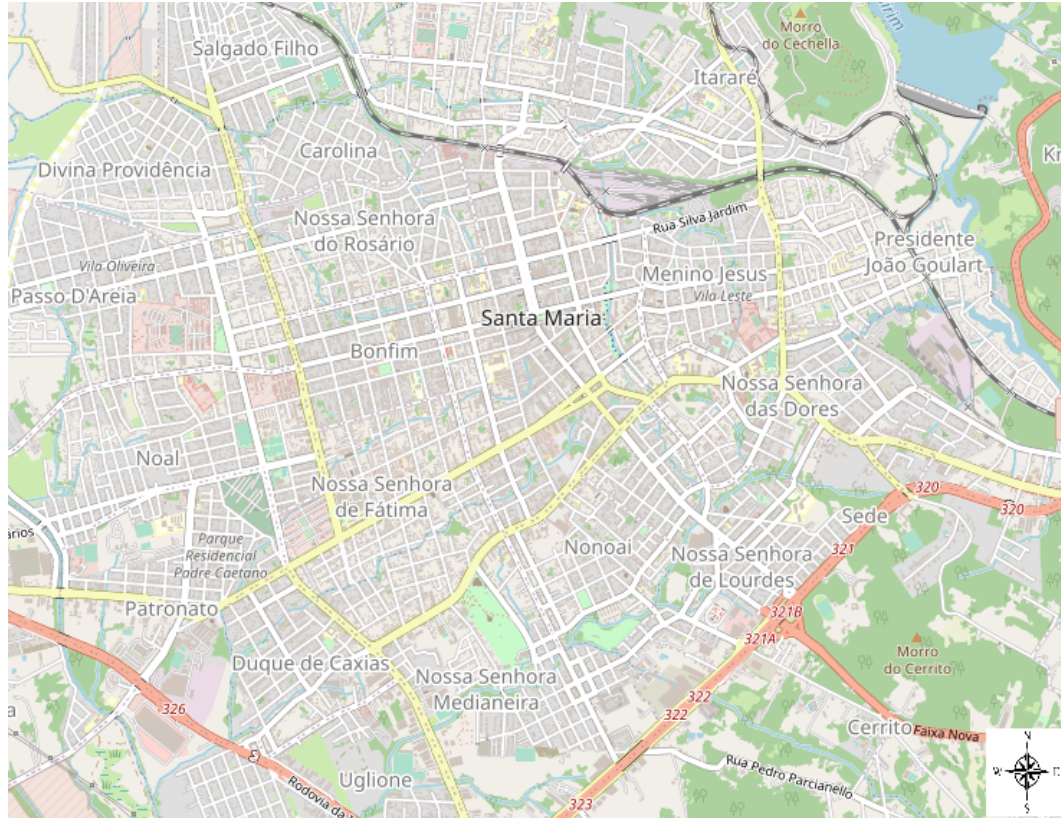


Figura 5.3 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria visto no OSM. Fonte: autora/OSM



Figura 5.4 – Mapa do centro da cidade de Santa Maria visto pelo SUMO. Fonte: autora/OSM

Tabela 5.2 – Emissões de poluentes, distância média, consumo médio de combustível e tempo médio de viagem. Simulação com 10.100 (ou seja, 10.000 carros e 100 ônibus) veículos para o Experimento 1: proibindo o tráfego de veículos privados na Rua Acampamento (valores arredondados).

Métrica	Rua Aberta	Rua Fechada
CO ₂ (kg)	1	1 (0%)
CO (g)	19	19 (0%)
HC (μ g)	129	129 (0%)
NOX (mg)	919	917 (\approx 0%)
Combustível (l)	0.47	0.47 (0%)
Distância média (km)	3.1	3.1 (0%)
Tempo médio (m)	4	4 (0%)

viagem, são praticamente os mesmos, com ou sem proibição de circulação de veículos privados. A esses cenários, foram denominados como rua aberta e rua fechada, respectivamente. As mudanças motivadas pelo PMU acabam se diluindo e não têm um impacto profundo no contexto global da cidade, no que diz respeito às questões de trânsito. Ressalte-se que o estacionamento não é mais permitido em toda a extensão da Rua do Acampamento, entre as ruas Venâncio Aires e Pinheiro Machado. Essa mudança teve pouco impacto no trânsito porque foi avaliada a região central da cidade como um todo, sem focar em uma região pequena.

5.2 EXPERIMENTO 2: EXPANDIR A ZONA DE PEDESTRES

No experimento 2 foram medidos os impactos da expansão da zona pedonal no centro, visível na imagem 5.3 do mapa da cidade. Para este experimento, foram utilizados a configuração atual das ruas como linha de base (cenário 1), com uma zona pedonal de apenas um quarteirão, e gradualmente foi expandida a zona pedonal, obtendo-se assim 6 cenários (adicionando um novo quarteirão proibido por cenário). Com a expansão gradual do calçadão, foi possível avaliar como cada aumento expansão afetou nos resultados, para o caso dessa mudança ser feita de forma gradual, quando posta em prática.

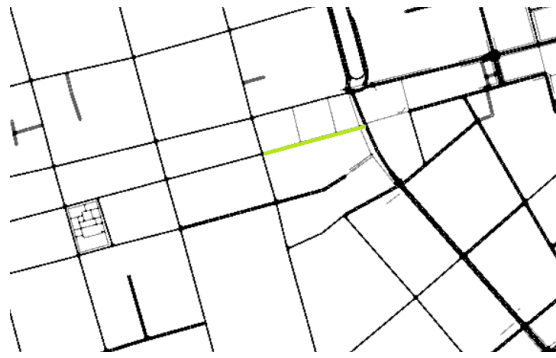
Mais precisamente, foram definidos os seguintes cenários de simulação:

- cenário 1, o cenário real ou linha de base: este cenário é a configuração atual da zona pedonal da cidade com 189 m de extensão, representada na Figura 5.5 (a),
- cenário 2: de acordo com a proposta do PMU, a zona de pedestres teria primeiro a nova configuração mostrada na Figura 5.5 (b), com dois blocos,

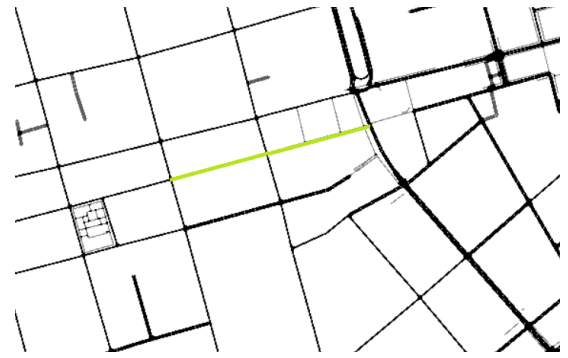
- cenário 3: o próximo passo será a expansão da zona de pedestres para o comprimento de 3 quarteirões, conforme ilustrado na Figura 5.5 (c),
- cenário 4: com uma nova extensão, a zona pedonal passaria a ter a configuração apresentada na Figura 5.5 (d), com um total de 4 quarteirões,
- cenário 5: então, com uma nova extensão, o pavimento teria a configuração ilustrada na Figura 5.5 (e), com um total de 5 quarteirões e outras modificações feitas em algumas ruas, com mudança de sentido das vias, e
- cenário 6: neste cenário, foram avaliados os 5 quarteirões da zona pedonal (cenário 5) e o cenário representado no Experimento 1 que proíbe a circulação de veículos privados na Rua do Acampamento. Esta situação é ilustrada na Figura 5.5 (f).

Em particular, o cenário 4 inclui as mudanças feitas no cenário 3 e além da extensão na rua Niederauer. No cenário 5, foi realizada a mudança na Rua Venâncio Aires, com o acréscimo desta rua ao calçadão e seu fechamento. Para isso, também é necessário alterar o sentido do trânsito na quadra anterior desta rua. De acordo com o PMU, também há mudança de direção na Rua Benjamin Constant, para desvio de tráfego vindo da Rua Astrogildo Cezar de Azevedo, fazendo com que o trânsito flua de acordo com o anel esperado pelo PMU, conforme visto na Figura 4.3.

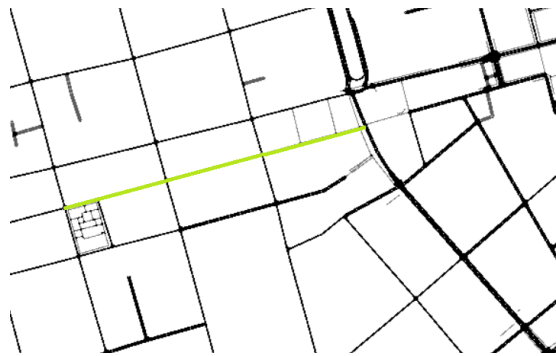
Ainda, no cenário 6, estão todas as alterações propostas para a zona pedonal de Salvador Isaia e Rua Acampamento, além da alteração do trânsito nas ruas Venâncio Aires, José Bonifácio, Tuiutí e na Dr. Astrogildo Cezar de Azevedo com alteração de direção. Este cenário apresenta as maiores diferenças entre o cenário real (linha de base) e as mudanças propostas do PMU, e apresenta as maiores diferenças nos resultados das emissões de poluentes.



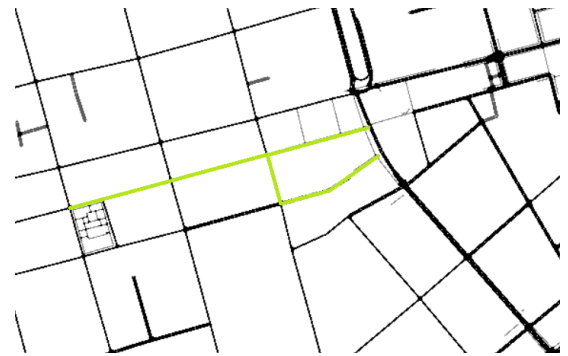
(a) Cenário 1: O pavimento hoje; 189,92 metros de comprimento.



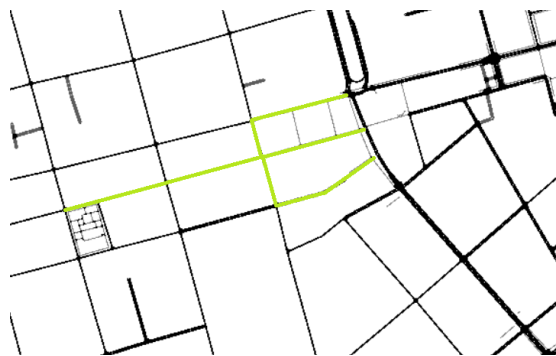
(b) Cenário 2: Calçadão com 2 quadras.



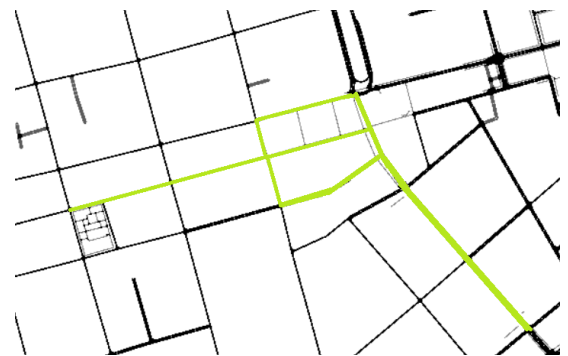
(c) Cenário 3: Calçadão com 3 quadras.



(d) Cenário 4: Calçadão com 4 quadras.



(e) Cenário 5: Novo pavimento - extensão de pavimento, total de 5 blocos.



(f) Cenário 6: Todas as mudanças no centro.

Figura 5.5 – Mudanças propostas no PMU de Santa Maria. Fonte: autora/OSM

Por meio dos valores armazenados nos arquivos de saída da simulação, foram calculados os valores médios com desvio padrão para diferentes métricas. No que diz respeito à emissão de poluentes, para diferentes cenários, os valores obtidos nos experimentos foram estáveis, com ou sem a implementação das alterações propostas no PMU, de acordo com os cenários 1-6, apresentados nas Figuras 5.6–5.11.

Os valores obtidos nos experimentos para as emissões de poluentes, apesar dos diferentes cenários, são quase os mesmos. Isso aconteceu porque as simulações foram realizadas na área que é considerada a área central da cidade pelo PMU, e essa área, no contexto da pesquisa, é enorme. O mapa de Santa Maria aqui considerado possui 20.867 arestas (ou blocos) e nos cenários foram feitas alterações entre 2 a 11 arestas, dependendo do cenário. Por esse motivo, as diferenças de valores para a emissão de poluentes entre os cenários são tão pequenos. Levando em consideração todo o mapa da cidade, as alterações do PMU, de fato, são pontuais.

Também foi avaliado o tempo médio de viagem (ver Figura 5.10), a distância média (ver Figura 5.11) e o consumo de combustível (ver Figura 5.12) para os seis cenários. Os resultados obtidos pela análise do desvio padrão devem-se à diferença na emissão dos veículos privados e dos veículos de transporte público utilizados na simulação. De acordo com nossos experimentos, os ônibus geram emissões de poluentes, em alguns casos, 14 vezes maiores do que um carro. Porém, é preciso levar em consideração que em ônibus podem

Com base nos gráficos mostrados nas Figuras 5.6–5.9, a emissão de poluentes manteve-se com tendência de pequeno crescimento nos cenários onde se têm o maior número de variações em relação ao cenário atual. Na tabela 5.3 temos os mesmos resultados vistos nas imagens.

Os gráficos nesses cenários evidenciam grande discrepância no desvio padrão. Isto pode ser causado pela presença na simulação dos veículos de tipo ônibus, que emitem quantidades muito maiores de poluentes do que um veículo particular. Porém, quanto mais passageiros estiverem em um ônibus ou trem, menores serão as emissões por passageiro-quilômetro. Por exemplo, em uma situação que tem cerca de um quarto (28%) de seus assentos ocupados em média por ônibus, as emissões de gases de efeito estufa estimadas em 33% mais do que a média por passageiro dos veículos particulares (HODGES, 2010).

Como pode ser visto na Figura 5.10, o tempo médio de viagem dos veículos tem um ligeiro aumento em relação aos cenários 1-6, com o crescente número de ruas que são fechadas para a passagem de veículos privados.

Em todos os cenários, o consumo médio de combustível permaneceu quase inalterado, e novamente um grande desvio padrão, devido à diferença de consumo entre ônibus e carros, esses resultados são apresentados na Figura 5.12.

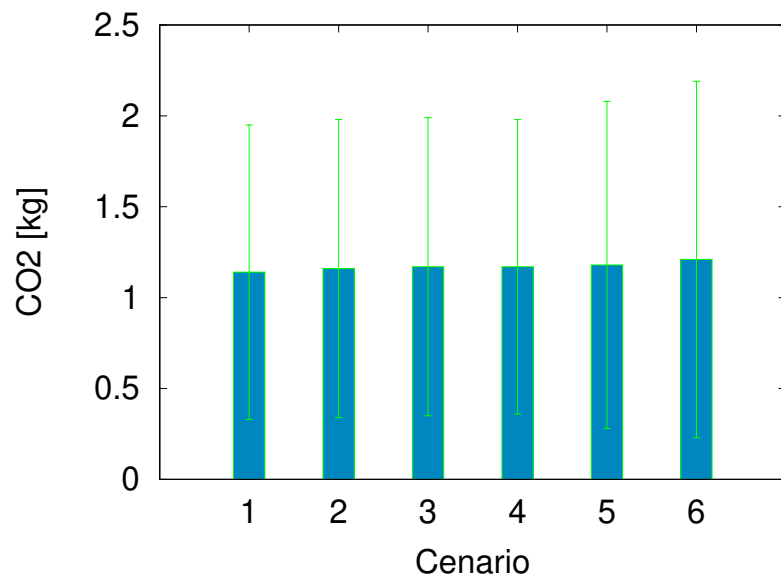


Figura 5.6 – Emissões de CO₂ nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

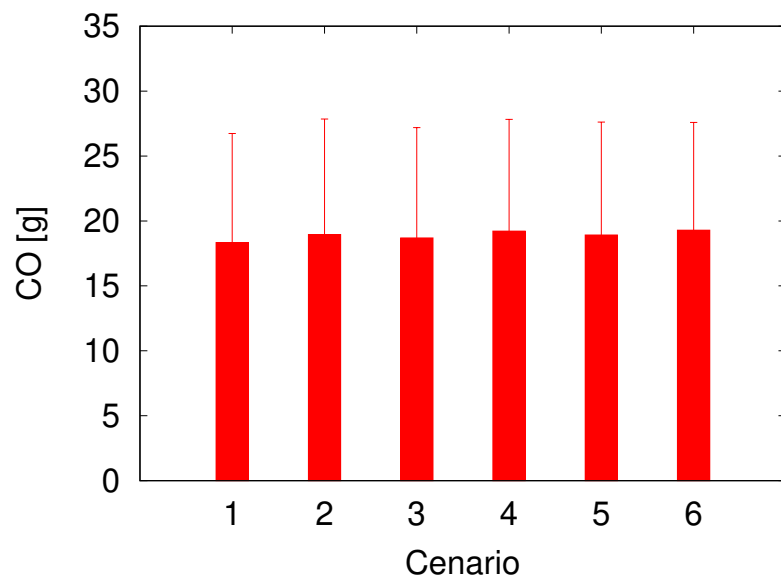


Figura 5.7 – Emissões de CO nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

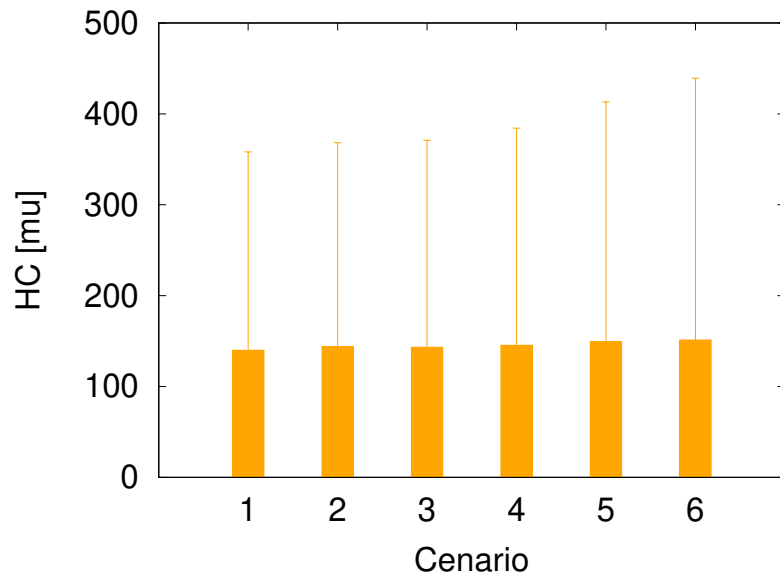


Figura 5.8 – Emissões de HC nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

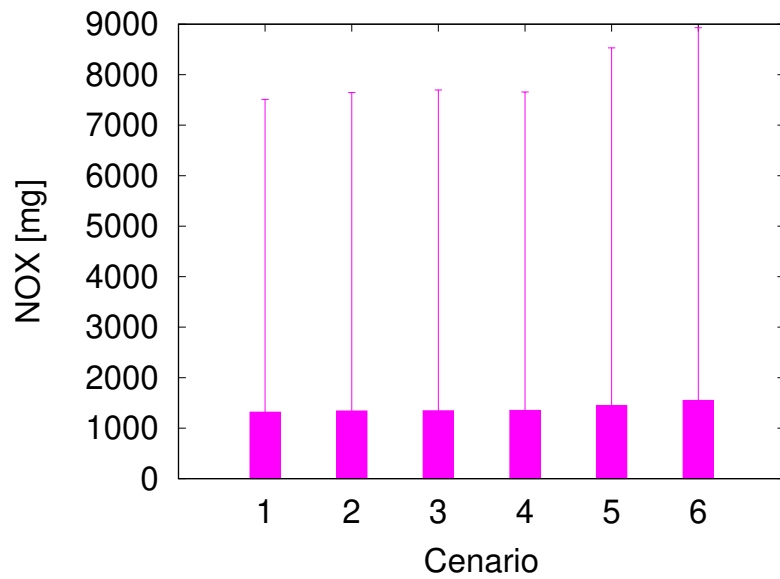


Figura 5.9 – Emissões de NOX nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

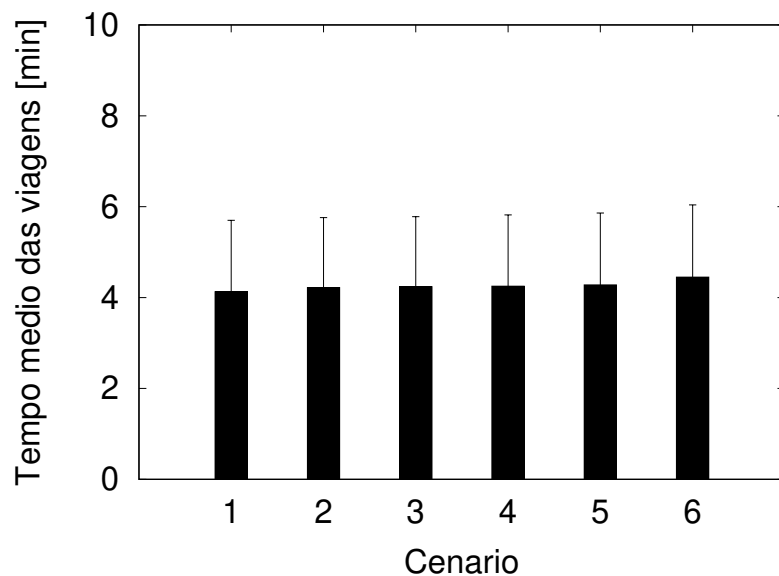


Figura 5.10 – Tempo médio de viagem nos 6 cenários, simulação com 10,100 veículos.
Fonte: autora

Tabela 5.3 – Resultados do experimento com viagens pela área central de Santa Maria

Cenário	1	2	3	4	5	6
CO ₂ (kg)	1,051	1,050 (-0.2%)	1,050(-0.2%)	1,050(-0.2%)	1,061 (+0.7%)	1,062 (+0.7%)
CO(g)	18.78	18.72(-0.3%)	18.72 (-0.3%)	18.72(-0.3%)	18.95(+0.9%)	18,88 (+0.5%)
HC(g)	0,113	0,113(-0.3%)	0,113 (-0.3%)	0,113(-0.3%)	0,114(+0.8%)	0,0113(+0.5%)
NOX(g)	0,514	0,513(-0.1%)	0,512(-0.1%)	0,513(-0.1%)	0,515(+0.2%)	0,515(+0.2 %)
Combust.(l)	0,453	0,452(-0.2%)	0,452(-0.2%)	0,453(-0.1%)	0,456(+0.7%)	0,456(+0.7%)
Dist.(km)	3.11	3.11(0%)	3.11(0%)	3.11(0%)	3.14(+0.1%)	3.15(+1.4%)
Tempo	4m13s	4m12s(-0.5%)	4m13s(0%)	04m13s(0%)	4m13s(0%)	04m13s(0%)

Fonte: autora

5.3 EXPERIMENTO 3: EMISSÃO DE POLUENTES MEDIDA EM UMA RUA OU QUADRA ESPECÍFICA

Outro experimento que foi realizado é da avaliação das emissões de poluentes veiculares em uma rua ou um quarteirão específico, conforme a Tabela 5.4. Para a realização deste, foi utilizada a Rua Acampamento que foi fechada para o trânsito de veículos privados, permitindo somente a passagem de transporte público. Espera-se que, com a proibição ou limitação do trânsito, uma via se torne mais agradável para o público pedestre.

Em particular, SUMO fornece valores absolutos e normados de emissões de poluentes veiculares coletados em bordas e estradas. Os valores absolutos são a soma de cada um dos poluentes emitidos em cada via / estrada, enquanto os valores normados fornecem os valores normalizados pela duração do intervalo e pelo comprimento da via.

Como resultado do experimento, foi obtida uma redução da emissão de poluentes na via ao fechar a Rua Acampamento para veículos privados, permitindo a passagem apenas de veículos de transporte público. A proibição da circulação de veículos permitiu que a

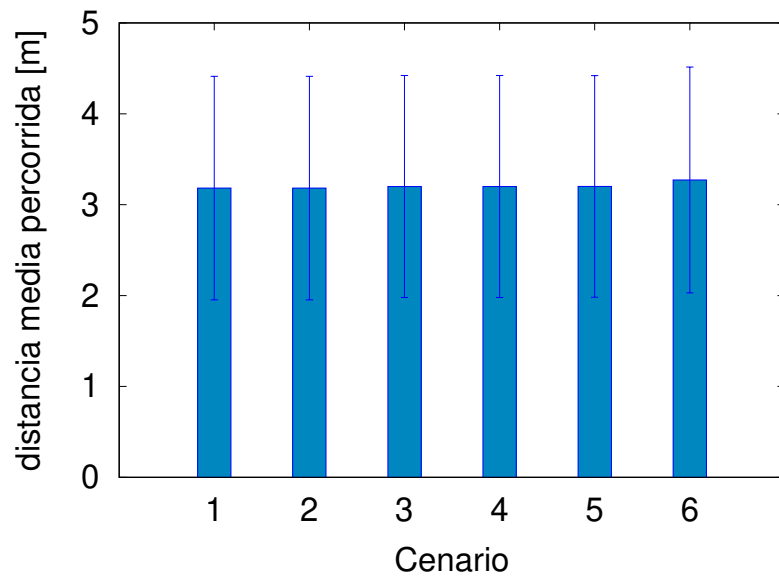


Figura 5.11 – Distância média de viagem nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

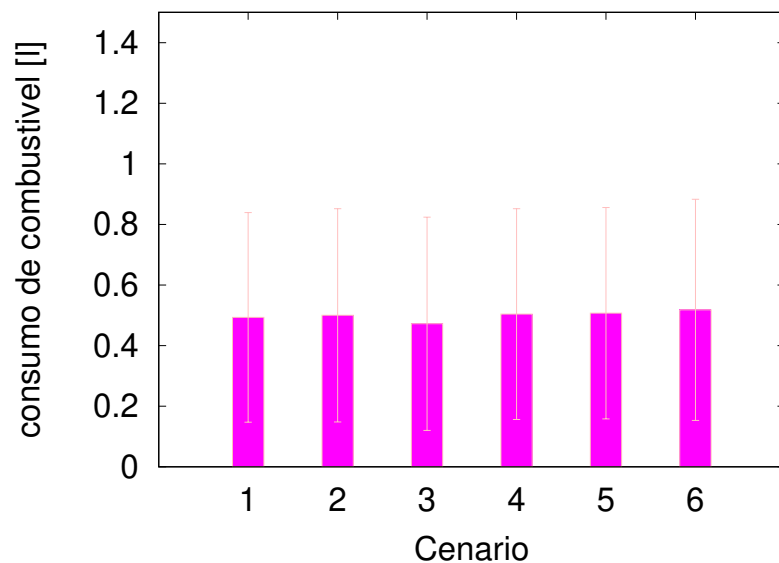


Figura 5.12 – Consumo médio de combustível nos 6 cenários, simulação com 10.100 veículos. Fonte: autora

via central da cidade ficasse menos congestionada, enquanto os veículos que circulavam por ela se dividiam nas ruas adjacentes sem causar muitas mudanças no tempo de viagem ou no consumo de combustível (como visto no Experimento 1).

Como citado anteriormente no experimento 1, a Rua Acampamento é uma importante avenida de mão única para o fluxo de tráfego do centro da cidade, com 831m de extensão. A combinação da Avenida Rio Branco com a Rua Acampamento permite que o trânsito flua de um bairro a outro, e possibilita que os veículos cruzem rapidamente a região central da cidade. Com a permissão somente de veículos de transporte coletivo, além

Tabela 5.4 – Resultados das emissões de poluentes apenas na Rua Acampamento. Simulação com 10.100 (ou seja, 10.000 carros e 100 ônibus) veículos para o Experimento 3: proibindo o trânsito de veículos privados na Rua Acampamento.

Métrica	Trânsito aberto	Trânsito fechado
CO(g) abs	1,271	5 (-99%)
CO ₂ (g) abs	78,240	3,568 (-95%)
HC(g) abs	8	1 (-87%)
NOx(g) abs	58	27 (-52%)
CO(g) normed	4	0.020 (-99%)
CO ₂ (g) normed	257	11 (-95%)
HC(mg) normed	29	4 (-85%)
NOx(mg) normed	19	94 (-50%)

Fonte: autora

de incentivar o uso do transporte coletivo para chegar nesta área de comércio varejista da cidade, haverá uma redução expressiva de poluentes na área, melhorando a qualidade do ar neste local, que é uma área atrativa comercialmente para a população.

5.4 EXPERIMENTO 4: VARIAÇÕES NAS TAXAS DE INSERÇÃO

Neste experimento foram usados os cenários do experimento 2, mas com os parâmetros descritos na Tabela 5.5. Novamente aqui é realizada a expansão nas quadras de forma gradual, para posterior análise.

Parâmetro	Valor
Quantidade de veículos públicos	100
Quantidade de veículos privados	10.000
Velocidade média dos veículos	32 km/h
Taxa de inserção dos veículos	0.5 veículo/s; 1 veículo/s, 2 veículos/s
Tempo de simulação	≈ 4h

Tabela 5.5 – Valores dos parâmetros usados na simulação do experimento 4.

Foram feitas análises em 3 situações diferentes com os mesmos 10.100 veículos (sendo 10000 carros e 100 ônibus), tendo os mesmos pontos de partida e chegada para todas as simulações. As situações foram de:

- tráfego intenso, implementado na simulação através da taxa de inserção de 1 veículo a cada 0.5 segundo,
- tráfego moderado, implementado na simulação através da taxa de inserção de 1 veículo por segundo,

Tabela 5.6 – Cenário 1: sem alterações

Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,05	1,04 (-1.6%)	1,46 (+38.6%)
CO (g)	18,78	18,02 (-4.1%)	43.46 (+131.4%)
HC (g)	0,011	0,011 (-3.4%)	0,023(+107.5%)
NOX (g)	0,51	0,50 (-1.4%)	0,70(+37%)
Combustível (l)	0,45	0,44 (-1.6%)	0,630 (+38.6%)
Distância média (km)	3,11	3,11 (0%)	3,11 (0%)
Tempo médio (m)	4m13s	4m04s (-3.4%)	07m23s +90.4%

Tabela 5.7 – Cenário 2: 2 quadras

Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,05	1,03 (-2%)	1,56 (+48.6%)
CO (g)	18,72	17,88 (-4.5%)	50,05 (+167.3%)
HC (g)	0,011	0,010 (-3.8%)	0,026 (+136.6%)
NOX (g)	0,513	0,503 (-2%)	0,750(+46.2%)
Combustível (l)	0,45	0,44(-2%)	0,67(+48.7%)
Distância média (km)	3,11	3,11 (0%)	3,10(+0.1%)
Tempo médio (m)	4m12s	4m03s (-3.5%)	07m40s (+71,5%)

- tráfego calmo, implementado na simulação através da taxa de inserção de 1 veículo a cada 2 segundos.

Esses experimentos foram realizados nos 6 cenários e os valores obtidos para as métricas analisadas estão apresentados nas Tabelas 5.5 a 5.11. As porcentagens exibidas nas tabelas são em relação do tráfego moderado (inserção de 1 veículo/s) com o tráfego da outra coluna, ou seja, o quanto mudou entre o tráfego calmo contra o moderado e o cenário de tráfego intenso contra o moderado. Considerando os valores das tabelas, nos cenários 1 (sem alterações, cenário real) - 6 (com todas as alterações) em uma situação de tráfego intenso há enormes engarrafamentos, o que causa que os tempos de viagem, emissão de poluentes e de uso de combustível sejam muito maiores do que nos demais

Tabela 5.8 – Cenário 3: 3 quadras

Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,05	1,03 (-1.7%)	1,94 (+84.6%)
CO (g)	18,72	17,97 (-4%)	73,92 (+294.8%)
HC (g)	0,011	0,010 (-3.3%)	0,038 (+240.5%)
NOX (g)	0,512	0,504 (-1.5%)	0,923(+80.3%)
Combustível (l)	0,452	0,444(-1.7%)	0,836(+84.7%)
Distância média (km)	3.11	3.11 (0%)	3.11(+0.1%)
Tempo médio (m)	4m12s	4m03s (-3.5%)	08m02s (91,3%)

Tabela 5.9 – Cenário 4: 4 quadras

Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,05	1,03 (-1.8%)	1,68 (+59.3%)
CO (g)	18,72	17,99 (-3.9%)	57,16(+205.3%)
HC (g)	0,011	0,010 (-3.3%)	0,030(+167.4%)
NOX (g)	0,51	0,50 (-1.8%)	0,80(+56.2%)
Combustível (l)	0,45	0,44 (-1.8%)	0,72 (+59.4%)
Distância média (km)	3.11	3.11 (%)	3.11 (-0.1%)
Tempo médio (m)	4m12s	4m03s(-3.5%)	07m23s(+74,6%)

Tabela 5.10 – Cenário 5: 5 quadras com anel perimetral e alteração nas vias

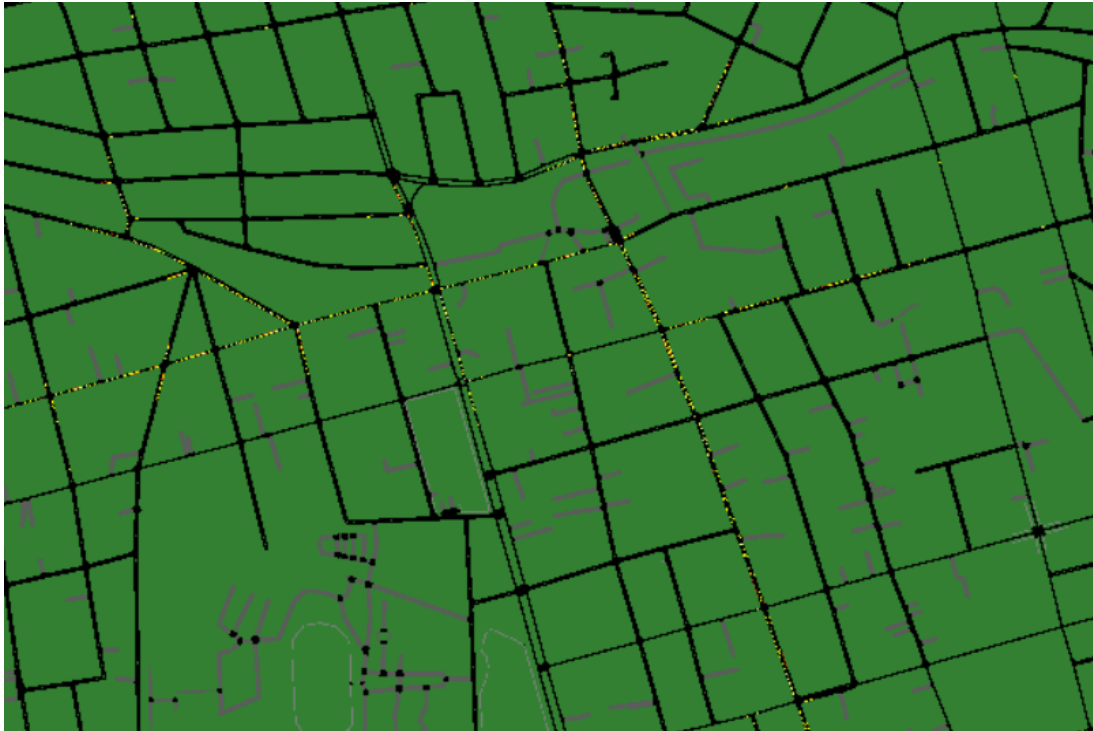
Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,06	1,04 (-1.6%)	1,13 (+6.7%)
CO (g)	18,95	18,25 (-3.7%)	22,58(+19.1%)
HC (g)	0,011	0,011 (-3.2%)	0,013(+16.0%)
NOX (g)	0,51	0,51 (-1.2%)	0,55(+7.0%)
Combustível (l)	0,46	0,45 (-1.6%)	0,49 (+6.7%)
Distância média (km)	3,14	3,14 (0%)	3,14 (0%)
Tempo médio (m)	4m12s	4m03s (-3.5%)	4m50s (15%)

Tabela 5.11 – Cenário 6: 5 quadras com anel perimetral, alteração nas vias e fechamento da Rua do Acampamento

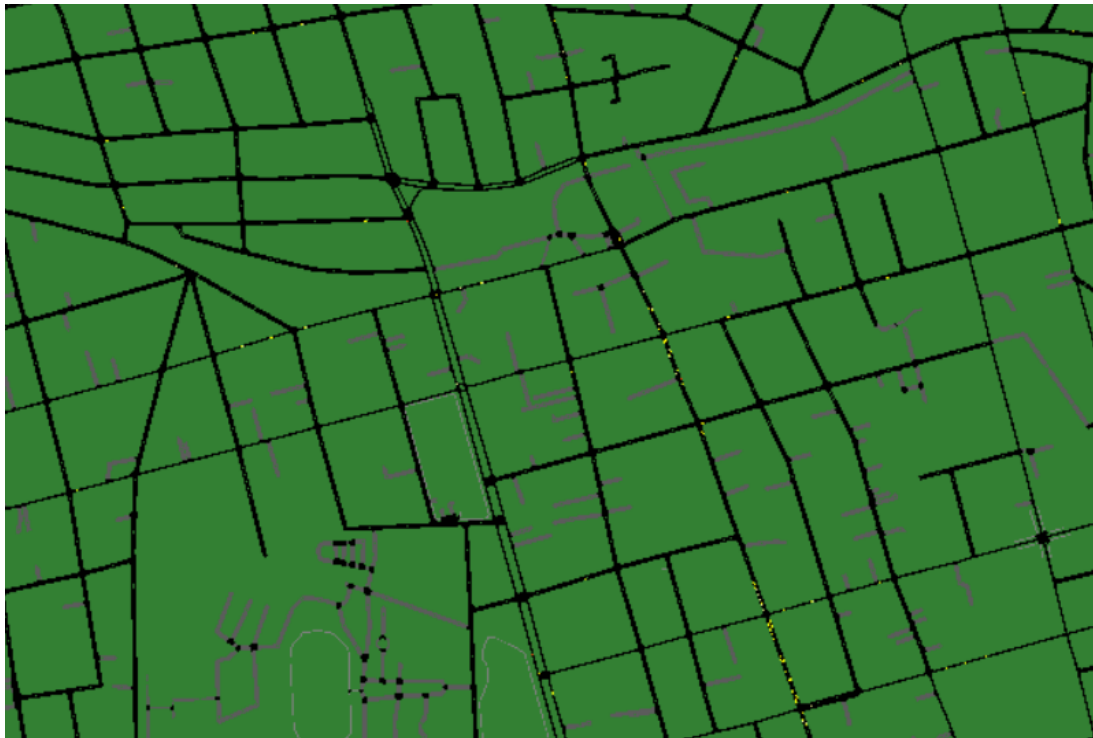
Métrica	Moderado	Calmo	Intenso
CO ₂ (kg)	1,06	1,04(-1.7%)	1,16 (+9.5%)
CO (g)	18,81	18,11 (-4%)	24,18 (+28.1%)
HC (g)	0,011	0,011(-3.3%)	0,014 (+23.4%)
NOX (g)	0,51	0,50 (-1.2%)	0,56(+9.7%)
Combustível (l)	0,46	0,45 (-1.7%)	0,50 (+9.5%)
Distância média (km)	3.15	3.15 (0%)	3.15 (0%)
Tempo médio (m)	4m13s	04m04s (-3,5%)	5m04s(+20,1%)

tempos de inserção. Dos cenários 1 ao 4 (tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9) temos um crescimento linear dos valores. Já nos cenários 5 e 6 (5.11), pode-se perceber uma drástica queda nas métricas avaliadas, para o cenário de tráfego intenso. De acordo com os experimentos realizados no contexto deste trabalho, considerando os cenários 4 (5.9) e 5 (5.10) houve uma queda de 31% no CO₂, 60% no CO, 56% no HC, 27% no NOX, 32% no consumo de combustível e redução de 43% nos tempos de viagem.

Essas variações nos valores se devem às alterações de sentido realizadas nas ruas Benjamin Constant, Venâncio Aires, Tuiuti, Astrogildo de Azevedo, e Pinheiro Machado, necessárias para a realização da ampliação do calçadão na Rua Venâncio Aires, criação do anel perimetral e de um binário para a fluidez no trânsito. Com isso, é possível diminuir o engarrafamento. A Figura 5.13 apresenta dois exemplos de cenários: (a) com engarrafamento e (b) sem engarrafamento. Os pontos amarelos nas imagens são os veículos (carros e ônibus) da simulação.



(a) Engarrafamento visto no passo 4000 da simulação de cenário 4 com tráfego intenso (inserção a cada 0.5/s).



(b) Ausência de engarrafamento visto no passo 4000 da simulação de cenário 5 com tráfego intenso (inserção a cada 0.5/s).

Figura 5.13 – Em destaque, visão de engarrafamento causado com as alterações, do experimento 5. O engarrafamento deixa de existir no último cenário. Fonte: autora/OSM

Nos experimentos com tráfegos moderado e calmo obteve-se, na maioria das métri-

Tabela 5.12 – Resultados do experimento com viagens curtas no bairro Centro

Cenário	1	2	3	4	5	6
CO ₂ (kg)	0,45	0,46(+0.6%)	0,46(+1.3%)	0,47(+1.4%)	0,56(+23.2%)	0,57(+25.5%)
CO(g)	8,75	8,82(+1.1%)	8,83 (+1.3%)	8,96(+2%)	11,84(+34%)	11,79(+35%)
HC(g)	0,05	0,06(+0.7%)	0,06(+1.1%)	0,06(+1.8%)	0,07(+31.7%)	0,07(+32.6%)
NOX(g)	0,31	0,32(+7.3%)	0,32(+0.9%)	0,32(+1.6%)	0,40 (+28%)	0,41(+29%)
Combust.(l)	0,19	0,19(+0.5%)	0,20(+0.7%)	0,20(+1.4%)	0,24 (+23.2%)	0,25(+25.5%)
Dist.(km)	1,21	1,21(+0.6%)	1,21(+0.6%)	1,26(+0.8%)	1,34(+11.1%)	1,38(+14.2%)
Tempo	2m08s	2m11s(+2,3%)	2m14s (+4,7%)	2m16s(+6,2%)	2m32s (+18,7%)	2m33s(+19,5%)

Fonte: autora.

Também é esperado um aumento na emissão de poluentes e no consumo de combustível, a medida que a distância percorrida aumenta em relação ao cenário anterior. Isto ocorre como consequência do fechamento das vias e engarrafamento causado por isto, como visto em 5.15. Um dos problemas gerados neste experimento se dá com o engarrafamento gerado nos cenários 2-4, já que nestes somente é realizada a expansão do calçadão na rua Dr. Bozano e na rua Floriano Peixoto, ainda sem alteração do sentido das ruas com o anel perimetral. Apesar do tempo ser maior no cenário 5, este não tem engarrafamento. O mapa utilizado para esta simulação é visto em 5.16.

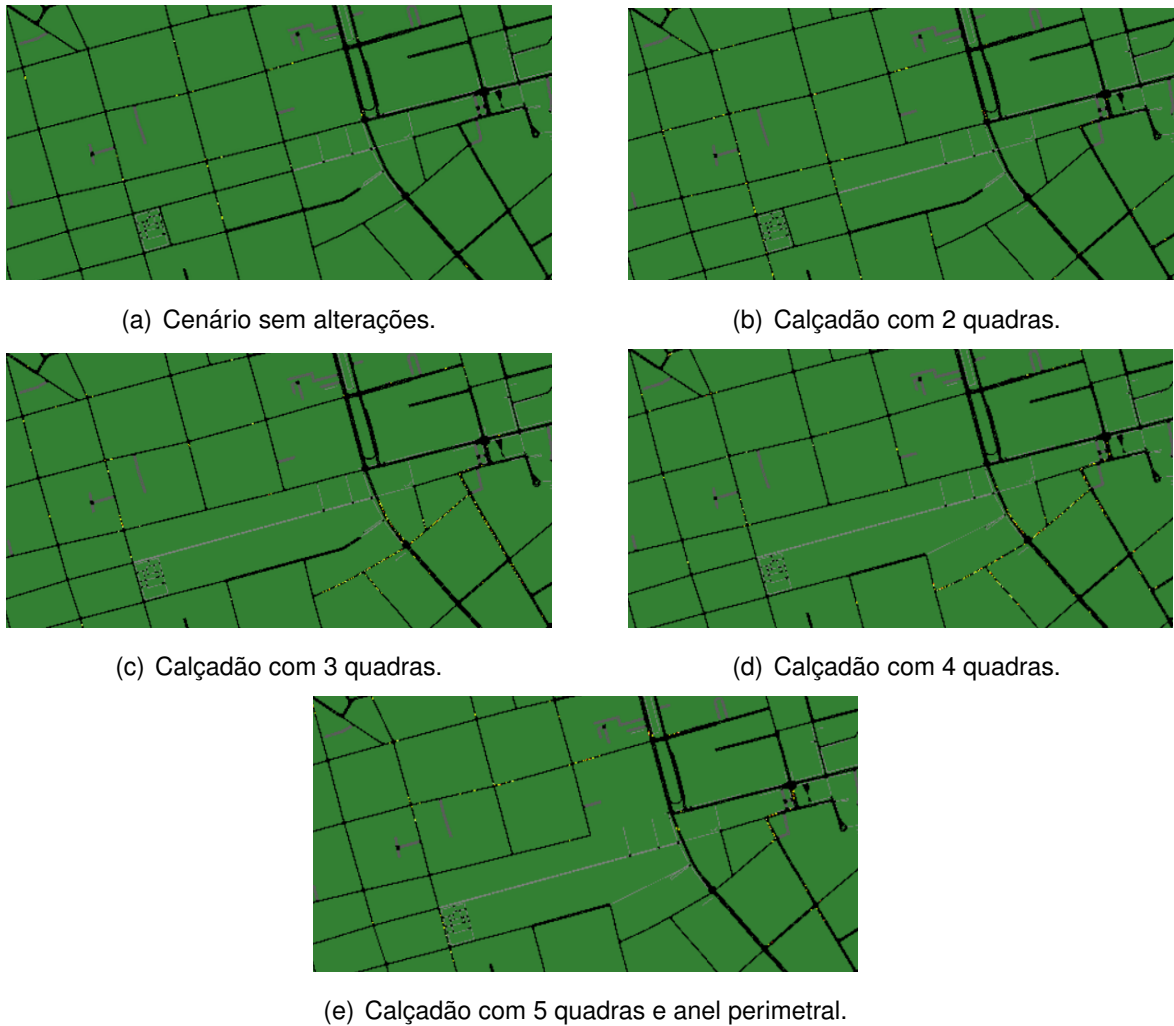


Figura 5.15 – Em destaque, visão de engarrafamento causado com as alterações, do experimento 5. Fonte: autora/OSM

No último cenário têm-se os maiores números até agora, visto que neste contêm todas as alterações realizadas, juntamente com a alteração em vias secundárias.

5.6 APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS AO LONGO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram desenvolvidas diversas aplicações, todas na linguagem Python, para a geração dos resultados. A seguir, as aplicações desenvolvidas são descritas.



Figura 5.16 – Captura de tela no simulador com as ruas da região centro da Cidade de Santa Maria, para o experimento 5. Fonte: autora/OSM

5.6.1 Aplicação cliente com TraCI

Esta é a aplicação que realiza a conexão do cliente com o SUMO, sendo realizada com o uso da interface TraCI. Nesta é possível definir os parâmetros em que a simulação irá funcionar, se será com a interface gráfica do SUMO, os arquivos de emissão que serão gerados, com informações da viagem e das emissões.

As informações são obtidas através dos arquivos de configuração das simulações (extensão .sumocfg). A aplicação finaliza quando o último veículo chega no seu ponto final.

5.6.2 Aplicação de análise dos resultados

Esta aplicação realiza a análise dos arquivos que foram gerados nas simulações. Ela recebe os arquivos gerados pelo SUMO, com os dados das viagens e das emissões, em XML, que calcula a média das métricas e gera um arquivo XML com os resultados da análise. Posteriormente foi adicionada a função de calcular o desvio padrão.

Esta aplicação foi a que tem as maiores tempos de execução. Os arquivos analisa-

dos nos experimentos tem em média 2 milhões de linhas, o que torna a execução destas análises mais longas.

5.6.3 Aplicação Final

Por fim, foi desenvolvida uma aplicação que junta as aplicações anteriores, com interface gráfica e integração com o SUMO e o TraCI, recebe como parâmetros 2 arquivos de configuração de simulações diferentes e realiza a comparação destas simulações e gera um relatório comparativo das 2 simulações, informando entre estes quais métricas melhoraram ou pioraram.

A aplicação possui uma interface simples, como vista na imagem 5.17, com 2 botões para a seleção dos 2 arquivos de configuração sumo (que devem possuir os arquivos de tipo xml de rede .net e um arquivo de rotas .rou), um botão para executar a aplicação e um botão para fechar a aplicação (finalizando a aplicação a qualquer momento ou ao terminar a execução da aplicação).

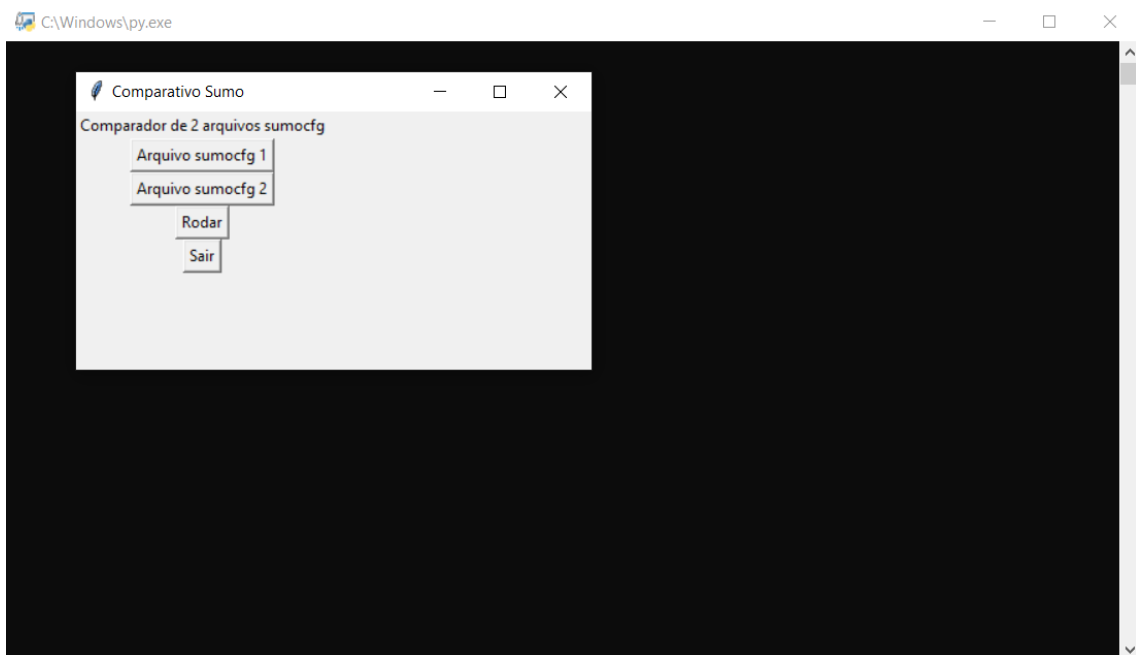


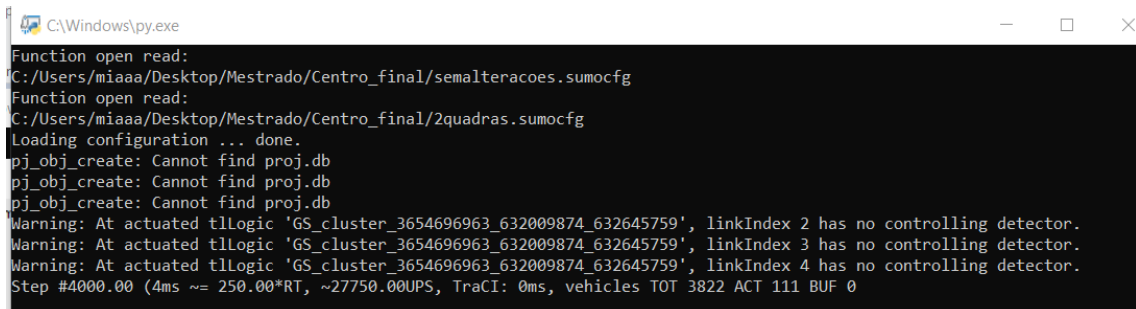
Figura 5.17 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.0. Fonte: autora

São gerados 7 arquivos a partir da execução da aplicação:

- 2 arquivos xml da emissão de poluentes (1 de cada arquivo de configuração)
- 2 arquivos xml de informação dos veículos da simulação (1 de cada arquivo de configuração)
- 2 arquivos xml com o resultado da análise de cada simulação (com a média de cada poluente, tempo de viagem, consumo de combustível)

- 1 xml arquivo com os resultados da comparação entre as 2 simulações

Na primeira versão da aplicação, durante a execução da aplicação, uma tela de terminal permanecia executando, onde era possível ver em que passo da simulação sendo executada está, visível na Figura 5.18.



```

C:\Windows\py.exe
Function open read:
C:/Users/miaaa/Desktop/Mestrado/Centro_final/semalteracoes.sumocfg
Function open read:
C:/Users/miaaa/Desktop/Mestrado/Centro_final/2quadras.sumocfg
Loading configuration ... done.
pj_obj_create: Cannot find proj.db
pj_obj_create: Cannot find proj.db
pj_obj_create: Cannot find proj.db
Warning: At actuated tlLogic 'GS_cluster_3654696963_632009874_632645759', linkIndex 2 has no controlling detector.
Warning: At actuated tlLogic 'GS_cluster_3654696963_632009874_632645759', linkIndex 3 has no controlling detector.
Warning: At actuated tlLogic 'GS_cluster_3654696963_632009874_632645759', linkIndex 4 has no controlling detector.
Step #4000.00 (4ms ~ = 250.00*RT, ~27750.00UPS, TraCI: 0ms, vehicles TOT 3822 ACT 111 BUF 0

```

Figura 5.18 – Aplicação desenvolvida em execução. Fonte: autora

A interface foi então atualizada, visível na Figura 5.19, para exibir os resultados na própria tela da aplicação. Em outra atualização da aplicação, foram adicionadas as informações sobre quanto que houve de diminuição ou aumento da emissão de poluentes e consumo de combustível para a área definida, com a mudança nos mapas, pode ser vista na Figura 5.20.

5.7 DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS

Após a realização dos experimentos, nesta sessão são discutidos os resultados obtidos com cada um destes.

5.7.1 Experimento 1

Com o experimento 1 foi possível analisar as mudanças com a alteração de fechamento da Rua do Acampamento, permitindo somente a passagem de transporte coletivo durante o dia. Como citado anteriormente, a Rua do Acampamento é um forte ponto de comércio na cidade, com um fluxo intenso de consumidores que passam por essa via diariamente. Com o experimento foi possível ver que, verificando a área central como um todo, o seu fechamento não vai gerar danos em termos das métricas avaliadas neste trabalho.

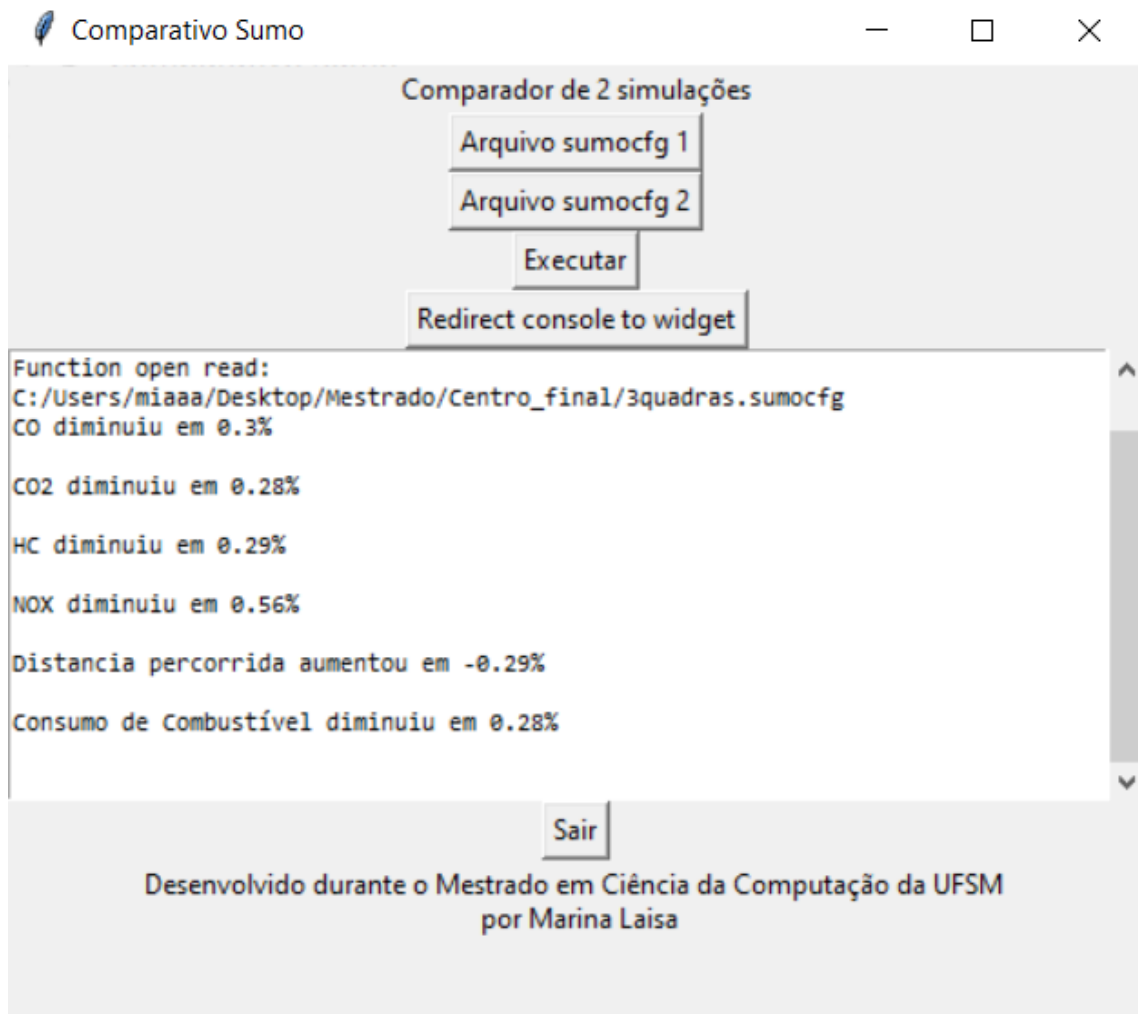


Figura 5.19 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.1. Fonte: autora

5.7.2 Experimento 2

No experimento 2, foi feita a implementação de forma gradual da expansão planejada no PMU para o Calçadão Salvador Isaía, na área central da cidade. Aqui foi trazida juntamente uma discussão dos motivos de estarmos avaliando cada uma destas métricas, e por quais motivos estas foram avaliadas. Como resultado deste experimento, fomos capazes de avaliar como a expansão gradual vai afetar as pessoas que estão realizando viagens dentro de toda área central (de acordo com o PMU). Foi possível visualizar nos resultados uma pequena variação em cada um dos cenários avaliados (todos sendo avaliados com relação ao cenário base, o cenário 1). A diferença entre eles é novamente, muito pequena, já que as simulações dos cenários são realizadas no mapa visto na Figura 5.1. A quantidade de ruas aqui alteradas são 2 no cenário 2, 4 no cenário 3, 5 no cenário 4, 9 no cenário 5 e 10 no cenário 6, ou seja, é uma quantidade muito pequena de ruas e rotas que foram alteradas, tendo em vista a área total central da cidade. Assim como no experimento anterior, então, concluímos que são pequenas as variações nas emissões de poluentes e consumo de combustível na área central, tendo em vista o benefício que é trazido para a

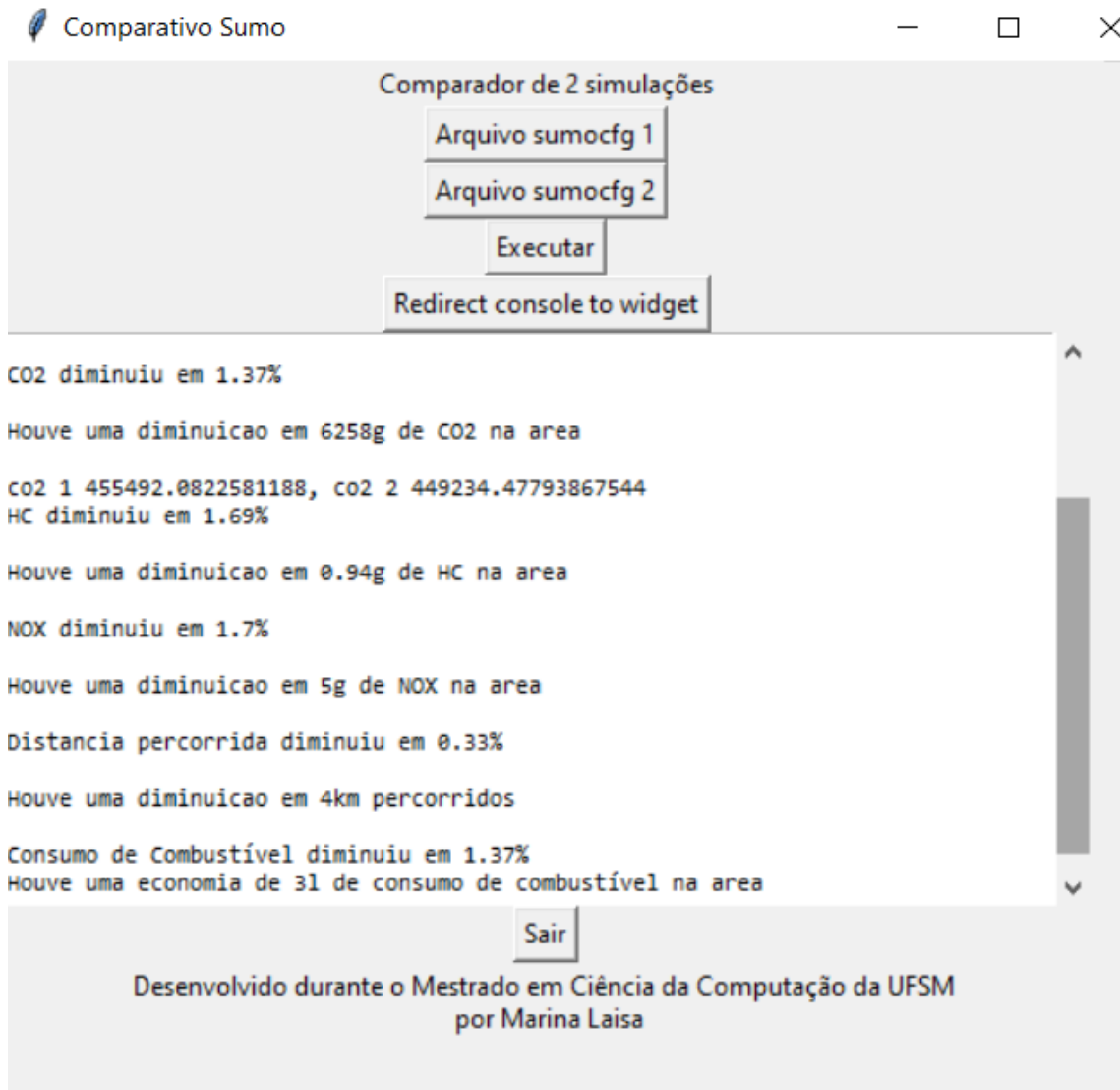


Figura 5.20 – Interface da aplicação desenvolvida. Versão 1.2 Fonte: autora

população.

5.7.3 Experimento 3

Com o experimento 3, o que aparentemente pode se constatar como óbvio que haveria uma intensa redução nas taxas, nos deixa claro na verdade o quanto de poluição que haverá de ser gerada em uma rua de comércio varejista tão grande como é a rua do Acampamento. Porém, é necessário lembrar que o trânsito que estaria nesta rua em específico será diluído para outras ruas, ou seja, a emissão de poluentes que deixa de ser gerada nessa rua estará acontecendo em outras ruas.

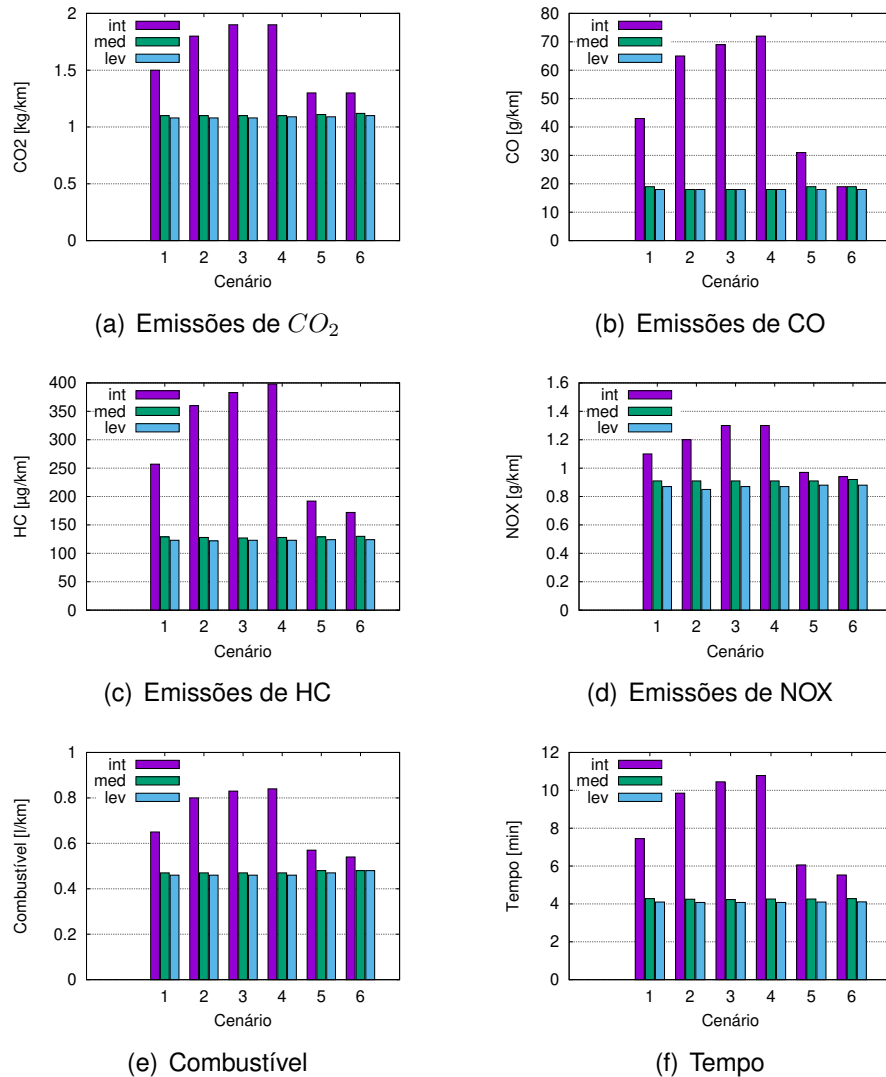


Figura 5.21 – Emissões de poluentes, consumo de combustível e tempo de viagens para os 6 cenários analisados, considerando os três fluxos de trânsito, no experimento 4.

5.7.4 Experimento 4

Já no experimento 4 foram analisados os mesmos cenários do experimento 2, porém neste o nosso foco é diferente do anterior: analisar estes cenários com diferentes intensidades de tráfego. Como resultado destes experimentos foram obtidos alguns resultados esperados: entre as variações de inserção de 1 e 2 segundos houveram poucas variações, entre 1% de variação nas métricas a quase 5%. Já na inserção a cada 0.5s é que foram obtidas enormes variações nos resultados, graças aos engarrafamentos vistos na figura 5.13 gerados pelo tráfego intenso. No cenário 5 é possível visualizar o grande benefício das alterações que são realizadas ao redor das áreas modificadas, com a alteração no sentido de algumas ruas. Mesmo nas mesmas situações dos cenários anteriores, há uma variação muito pequena nas métricas vistas. Na imagem 5.21 vemos graficamente a pouca diferença na variação dos cenários médio e leve.

5.7.5 Experimento 5

Por fim, com o experimento 5 foi analisado como as mudanças avaliadas aqui propostas no PMU afetam diretamente às pessoas que fazem deslocamentos no bairro Centro. Com o mapa menor, as viagens geradas pelo script RandomTrips são propositalmente menores. Foi possível visualizar a cada cenário um pequeno aumento, em relação ao cenário base. Já no último cenário é possível visualizar as maiores diferenças nas métricas, chegando a pouco mais de 30% de aumento na emissão de CO_2 . Como neste cenário foi utilizado um mapa muito menor do que nos experimentos anteriores, é possível visualizar ver de forma mais expressiva o aumento nas emissões, porém, ainda assim são números pequenos.

Alguns resultados obtidos foram contrários às expectativas prévias ao desenvolvimento deste trabalho, como a da diminuição de emissões entre o cenário base e o cenário 2 nos experimentos 2 e 5, por exemplo. Esperava-se que com o fechamento de uma rua, haveria o aumento das emissões, o que não ocorreu. Porém, é preciso de lembrar que todas as viagens simuladas neste trabalho tem seus pontos de partida e chegada gerados aleatoriamente, e suas rotas são geradas com o DUArouter, que utiliza do algoritmo de Dijkstra, calculando a menor rota possível. A simulação também não leva em conta por exemplo se nas vias há algum engarrafamento ou não, seguindo o que está definido no arquivo de rotas. Por isso, é possível que com o fechamento de certas ruas, com as novas rotas os veículos conseguem chegar aos destinos gerando menos poluentes e consumindo menos combustível.

5.7.6 Limitações do trabalho

Uma das limitações da simulação apresentada neste trabalho, dado que os dados de fluxo de transito foram gerados de forma automática (e randômica), é que o simulador não tem a capacidade de expressar a preferencia dos motoristas pelas ruas e avenidas principais na cidade. O gerador de rotas não sabe estas preferencias dos motoristas. Desta forma, durante a simulação, o fluxo de transito é distribuído de forma uniforme pelas ruas da cidade. E ainda, em particular, com o fechamento dos veículos que saíram da Rua do Acampamento vão gerar poluição em outros lugares.

Isso, além do fato de que as métricas foram avaliadas para uma área grade do centro da cidade, deve justificar o pouco impacto que causa no trânsito da cidade o fechamento para veículos privados de ruas como a movimentada Rua do Acampamento.

5.7.7 Desafios encontrados

Como foram executadas simulações de longos períodos de duração (entre 4 a 6 horas de duração), e os arquivos de log gerados pelas aplicações desenvolvidas compreendiam diversos dados para serem analisados, como os poluentes, tempo de viagem e consumo, e estes dados eram gerados por segundo de simulação e por cada veículo dentro desta, a média de tamanho de cada arquivo gerado era de aproximadamente 1GB. O total de arquivos finais gerados foram:

- 34 arquivos de configuração do SUMO (extensão sumocfg)
- 34 arquivos XML de rotas de veículos
- 6 arquivos XML de viagens de veículos
- 34 arquivos XML de emissões de poluentes
- 34 arquivos XML de informação de viagens
- aplicação cliente em Python com TraCI
- 3 scripts de análises dos resultados
- 1 aplicação em Python que realiza a análise comparativa entre 2 simulações e gera um relatório.

Não foram contabilizados os arquivos gerados de experimentos que foram alterados posteriormente, ou casos em que houve problemas na simulação, ou correção. O tempo de execução dos scripts de análise destes arquivos variavam de 5 minutos a 22 horas, sendo o último para os cálculos mais complexos, como a análise do desvio padrão. Foram necessárias diversas alterações nos códigos de análises e de cálculos para diminuir esse tempo de execução, inclusive uma melhoria de hardware no computador utilizado nos experimentos (um Notebook com processador Intel® Core I7 com 16gb de memória RAM), com a adição de outro pente de memória RAM. Cada simulação foi executada pelo menos 3 vezes para garantir a maior confiabilidade necessária aos resultados obtidos.

Algumas partes dos mapas exportados do Open Street Map com o JOSM resultaram em algumas inconsistências. Diversas ruas de 2 pistas acabaram sendo exportadas como ruas de somente 1 pista, tornando o mapa infiel ao mapa da cidade e causando engarrafamentos não compatíveis com a realidade. Isto causou a necessidade de uma reanálise manual de todo o mapa que foi utilizado neste trabalho para manter a fidelidade ao mapa da cidade. A solução encontrada para corrigir a rua manualmente, através do próprio JOSM.

Outro problema encontrado com a exportação do mapa pela aplicação JOSM foram que algumas sinaléticas estavam inoperantes, erro que era informado através do próprio

SUMO quando uma simulação era iniciada. Para a correção deste erro foi necessário alterar o arquivo da rede de cada cenário proposto. Para isso foi alterado o comando que estava sendo usado para fazer a conversão do arquivo osm em uma rede.

```
netconvert --geometry.remove --ramps.guess --junctions.join  
--tls.guess-signals --tls.discard-simple  
--tls.join --tls.default-type actuated  
--osm-files mapacalcao4quadras.osm  
-o mapacalcao4quadras.net.xml
```

Uma grande dificuldade deste projeto também foi a falta de um trabalho comparativo neste âmbito. Era necessário encontrar alguma outra simulação feita com alteração na cidade, e que fosse em uma cidade semelhante à Santa Maria, que tem uma população de 283 mil pessoas. Não foram encontrados outros trabalhos que utilizassem a simulação computacional neste contexto especificamente.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram simulados diferentes cenários em Santa Maria para avaliar o Plano de Mobilidade Urbana proposto pela Prefeitura de Santa Maria. O PMU traz propostas não somente de alteração no trânsito, como também é um instrumento eficaz na melhoria das cidades, e não apenas como um requisito legal. A simulação computacional permite avaliar cenários antes de colocá-los em prática. Primeiro, foi investigado o impacto das mudanças em uma rua que impacta significativamente o fluxo de tráfego na cidade, a Rua Acampamento. Com a implantação total do PMU, durante o dia, essa via será exclusiva para ônibus, táxis e embarque / desembarque de veículos.

Em seguida, foi avaliado o impacto da expansão da zona de pedestres no centro da cidade. Esta zona foi aumentada gradualmente e foi avaliada em uma série de cenários. Com base nos resultados, foi possível perceber que as mudanças não têm um impacto substancial em termos de métricas de desempenho de tempo de viagem, consumo de energia e emissão de poluentes. Particularmente no Experimento 3, foi observado como a mudança no trânsito na Rua do Acampamento pode afetar a emissão de poluentes em uma rua específica com a mudança proposta, e como a proibição de veículos privados afeta o tempo de viagem e o consumo de combustível dos veículos.

Todas as mudanças que foram simuladas e analisadas nos trouxeram o resultado de que haverá pouco aumento na geração de poluentes, tempo de viagem e consumo de combustíveis, porém, os benefícios que podem ser gerados com a urbanização da cidade, a expansão do Calçadão Salvador Isaías e do fechamento da Acampamento podem ser muito maiores do que os pequenos aumentos nas métricas. Assim como o Calçadão de Curitiba devolveu à população uma via pública sem tráfego de veículos automotores, espera-se que isso possa ocorrer também em Santa Maria, proporcionando segurança aos pedestres, que podem transitar livremente em um espaço reservado apenas para eles (com exceções para os moradores), e em uma área com uma qualidade do ar melhor para todos.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta opções interessantes para continuidade do estudo. As viagens simuladas neste trabalho são geradas de acordo com o algoritmo de Dijkstra, que calcula as menores rotas para as viagens. Podem ser simuladas viagens com diferentes tipos de rotas. Um grande desafio deste trabalho foi a ausência de dados reais para calibrar as simulações. Para executar as simulações, dados foram gerados de forma artificial usando informações disponíveis em sites da Web. Uma melhoria que pode ser realizada

na pesquisa seria com o uso de dados reais das rotas de ônibus, quantidades de veículos, velocidade média que os veículos percorrem na cidade e tipos de veículos (quanto à sua fabricação/emissão do veículo), para maior exatidão das simulações. Esses dados poderiam ser obtidos com o uso de aparelhos GPS. Alternativamente, se dados não podem ser obtidos através da disponibilidade de uma rede de sensores, em trabalhos futuros, um aplicativo de *crowdsourcing* pode ser usado, para coletar dados e tornar a simulação mais verídica. Através de um aplicativo, os usuários do sistema poderiam colaborar no provimento de dados, e aprimorar *datasets* de transporte e mobilidade. Entretanto, envolver as pessoas para resolver os problemas de mobilidade urbana ainda é um grande desafio em nosso país.

Quanto à aplicação desenvolvida para comparação, algumas melhorias podem ser realizadas. Atualmente, a aplicação é executada com a entrada de 2 arquivos de configuração do SUMO. Para facilitar o uso, a aplicação pode ser adaptada para receber como parâmetros de entrada os arquivos gerados pelo Open Street Map, para realizar as comparações e geração dos relatórios.

As alterações que serão provocadas com a remoção das vagas de estacionamento ao longo da rua Doutor Bozano e da rua Venâncio Aires não foram mensuradas no escopo deste trabalho, não sendo possível assim determinar os impactos que podem ser causados para o comércio na área. Abordar este tópico seria interessante em um desenvolvimento futuro deste trabalho.

APONTAMENTOS FINAIS

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CNPq através de uma bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU da SILVEIRA, F. L. A poética do vivido: uma etnografia do cotidiano na Cidade Baixa-Porto Alegre-RS. **ILUMINURAS**, v. 3, n. 5, 2002.

ALI, M. et al. Association between daily commute and subjective health complaints among the office workers in an urban community. **Heliyon**, Elsevier, v. 7, n. 8, p. e07841, 2021.

ALLIARDI, E. Mobilidade urbana de Cachoeirinha: impactos de uma faixa exclusiva para ônibus. 2016.

BARTH, M.; BORIBOONSOMSIN, K. Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. **Transportation Research Record**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2058, n. 1, p. 163–171, 2008.

BEHRISCH, M. et al. SUMO - simulation of urban mobility (an overview). In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 63–68.

Bike Anjo, Corrida Amiga, ITDP, LABMOB. **AVALIAÇÃO DE IMPACTO DA PAULISTA ABERTA NA VITALIDADE URBANA**. 2019. Last access: 29 jun. 2022. Disponível em: <http://www.labmob.proureb.fau.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/11/Relatorio_Avaliaçãoo-Impacto-Paulista-Aberta-Vitalidade-Urbana_090919.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2022.

BONTE, L.; ESPIÉ, S.; MATHIEU, P. Modélisation et simulation des usagers deux-roues motorisés dans ARCHISIM. **Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)**, v. 6, p. 17, 2006.

CASA CIVIL DO GABINETE DO PREFEITO. Prefeitura de São Paulo. **Institui o Programa Ruas Abertas, nos termos da Lei Federal nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012 - Política Nacional de Mobilidade Urbana**. 2016. Last access: 29 jun. 2022. Disponível em: <<https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-57086-de-24-de-junho-de-2016>>. Acesso em: 29 jun. 2022.

CASAS, J. et al. Traffic simulation with Aimsun. In: **Fundamentals of traffic simulation**. [S.l.]: Springer, 2010. p. 173–232.

CETESB - Governo do Estado de São Paulo. **Poluição Veicular - CETESB**. 2013. Last access: 30 jun. 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CODECA, L.; FRANK, R.; ENGEL, T. Luxembourg SUMO traffic (LUST) scenario: 24 hours of mobility for vehicular networking research. In: IEEE. **2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)**. [S.l.], 2015. p. 1–8.

COLVILE, R. N. et al. The transport sector as a source of air pollution. **Atmospheric environment**, Elsevier, v. 35, n. 9, p. 1537–1565, 2001.

COMMITTEE, T. E. **Transportation Benefit-Cost Analysis**. [s.n.], 2004. Disponível em: <<http://bca.transportationeconomics.org/benefits/travel-time>>.

COSTAL, G.; PICKUP, L.; MARTINO, V. D. Commuting—a further stress factor for working people: evidence from the European Community. **International archives of occupational and environmental health**, Springer, v. 60, n. 5, p. 377–385, 1988.

da FONSECA, F. L. Os calçadões e sua importância para a qualidade urbana na área central de Juiz de Fora. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, p. 162, 2012.

da SILVEIRA RIBEIRO, H.; FERREIRA de OLIVEIRA, M. J. A simulação como ferramenta de auxílio ao dimensionamento de frotas para o transporte público urbano. **VII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, p. 164–177, 2004.

DITTRICH, M. G. et al. O calçadão de Curitiba: sua história como espaço público social da cidade. **Revista Brasileira de Tecnologias Sociais**, Universidade do Vale do Itajaí, v. 2, n. 2, 2015.

Diário de Santa Maria. **Raio X na Mobilidade da Cidade**. 2015. Edição impressa.

dos Santos Bento, M. H. et al. Efeitos da poluição do ar causada por veículos automotores na saúde humana e no meio ambiente. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 4, n. 3, p. Páginas–19, 2012.

DRUMM, F. C. et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66–78, 2014.

ERBACH, P. B. N. Desafios na mobilidade urbana: Estudo de caso na cidade de Jaraguá do Sul-SC. **Trabalho de Conclusão de Curso. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**, 2011.

European Commission - Directorate-General for the Environment. **Reclaiming city streets for people Chaos or quality of life?** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: [s.n.], 2004. 52 p. ISBN 92-894-3478-3. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/streets_people.pdf>.

GEURS, K. T.; PAIX, L. L.; WEPEREN, S. V. A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. **European transport research review**, Springer, v. 8, n. 4, p. 25, 2016.

Governo Federal. **Estatuto da Cidade, LEI No 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001**. 2001. Last access: 29 jun. 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Acesso em: 29 jun. 2022.

_____. **Política Nacional de Mobilidade Urbana**. 2013. Last access: 29 jun. 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>. Acesso em: 29 jun. 2022.

GUEDES de SOUSA, V. F. Mobilidade urbana no centro da Cidade de João Pessoa: uma proposta sob um novo paradigma. In: **Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade Federal da Paraíba**. [S.l.: s.n.], 2017.

HALATI, A.; LIEU, H.; WALKER, S. CORSIM-corridor traffic simulation model. In: **Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities** Urban Transportation Division, ASCE; Highway Division; Federal Highway Administration, USDOT; and National Highway Traffic Safety Administration, USDOT. [S.l.: s.n.], 1997.

HODGES, T. **Public transportation's role in responding to climate change**. [S.l.]: Diane Publishing, 2010.

IPLAN Santa Maria. **Mapa de Santa Maria**. 2013. Last access: 07 jan. 2022. Disponível em: <http://iplan.santamaria.rs.gov.br/estatistica/mapas/mapa3d/mapa3d.php?id_bairro=3>. Acesso em: 07 jan. 2022.

KOVÁČIKOVÁ, T.; LUGANO, G.; POURHASHEM, G. From travel time and cost savings to value of mobility. In: SPRINGER. **International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication**. [S.l.], 2017. p. 35–43.

MATSIM. **MATSim | Multi-Agent Transport Simulation**. 2009. Disponível em: <<http://www.matsim.org>>. Acesso em: 20 set. 2021.

MENEZES, C. L. **Desenvolvimento urbano e meio ambiente: a experiência de Curitiba**. [S.l.]: Papirus Editora, 1996. 198–198 p.

MUSSE, L. de O.; LOPES, R. L.; TAVARES, J. L. Emissão de *co₂* pela frota de ônibus de transporte público da região metropolitana de Natal/rn. **Revista Ibero-Americana** – 350, 2018.

NESAMANI, K. S. Estimation of automobile emissions and control strategies in India. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 408, n. 8, p. 1800–1811, 2010.

NOTO, M.; SATO, H. A method for the shortest path search by extended dijkstra algorithm. In: IEEE. **Smc 2000 conference proceedings. 2000 ieee international conference on systems, man and cybernetics. cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions** (cat. no. 0. [S.l.], 2000. v. 3, p. 2316–2320.

Organização Mundial da Saúde (OMS). **9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action**. 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>>. Acesso em: 17 out. 2021.

PAIM, C. M. **Movimento Paulista Aberta: novas práticas urbanas em São Paulo**. 2013. Last access: 30 jun. 2022. Disponível em: <<https://conferencias.unb.br/index.php/ENANPARQ/ViENANPARQ/paper/view/21915>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

Prefeitura de Santa Maria. **LEI COMPLEMENTAR No 098, DE 10 DE JUNHO DE 2015, Institui o Plano Diretor de Mobilidade Urbana do Município de Santa Maria e dá outras providências**. 2015. Last access: 20 nov. 2020. Disponível em: <http://iplan.santamaria.rs.gov.br/legislacao/44_0.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

RIBEIRO de CARVALHO, C. H. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. 2011. ISSN 1415-4765. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>.

ROMAN, V. V. L. et al. Efeitos de poluentes do ar e doenças respiratórias utilizando dados estimados por modelo matemático. **Revista Ambiente & Água**, SciELO Brasil, v. 10, p. 825–831, 2015.

RÜGER, H. et al. Does perceived stress mediate the relationship between commuting and health-related quality of life? **Transportation research part F: traffic psychology and behaviour**, Elsevier, v. 50, p. 100–108, 2017.

Secretaria das Cidades. Governo do Estado do Ceará. **Plano de Mobilidade Urbana - Sobral, Produto III – Relatório da 1ª Audiência Pública**. 2017. Contrato 027/Cidades/2016. Disponível em: <https://www.sobral.ce.gov.br/images/planmob/relatorio_da_1_audiencia_publica.pdf>.

STEFANELLO, V. et al. Urban mobility planning for small cities: the case of Cachoeira do Sul, Brazil. **Ciência e Natura**, v. 42, n. 0, p. 20, 2020. ISSN 2179-460X. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/40588>>.

SUMO Wiki. **Duarouter**. Disponível em: <<https://sumo.dlr.de/docs/duarouter.html>>. Acesso em: 18 set. 2021.

WIEDENHOEFT, R. El hombre y la ciudad para peatones: cuestiones sobre espacios ciudadanos agradables para el hombre. **La Ciudad Peatonal**. Barcelona: G. Gilli, 1979.

YANG, Q.; KOUTSOPOULOS, H. N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 113–129, 1996.