



Dissertação de Mestrado

Avaliação de Desempenho de Tráfego Urbano Usando Simulação: Estudo de Caso em Maceió/AL

Flávio Vasconcelos Pais

fvp@ic.ufal.br

Orientadores:

Dr. Bruno Costa e Silva Nogueira

Dr. Rian Gabriel Santos Pinheiro

Maceió
Agosto 31, 2022

Flávio Vasconcelos Pais

Avaliação de Desempenho de Tráfego Urbano Usando Simulação: Estudo de Caso em Maceió/AL

Dissertação apresentada por Flávio Vasconcelos Pais em cumprimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Informática da Universidade Federal de Alagoas, Instituto de computação.

Orientadores:

Dr. Bruno Costa e Silva Nogueira

Dr. Rian Gabriel Santos Pinheiro

Maceió
Agosto 31, 2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 - 1767

P149a Pais, Flávio Vasconcelos.

Avaliação de desempenho do tráfego urbano usando simulação :
estudo de caso em Maceió/AL / Flávio Vasconcelos Pais. – 2022.
74 f. : il.

Orientador: Bruno Costa e Silva Nogueira.

Co-orientador: Rian Gabriel Santos Pinheiro.

Dissertação (mestrado em informática) - Universidade Federal de
Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 63-67.

Apêndices: f. 69-74.

1. Tráfego urbano - Maceió (AL). 2. Simulação (Computadores). 3.
Semáforos. 4. Simulador de Mobilidade Urbana. I. Título.

CDU: 004.383.4:656(813.5)

Agradecimentos

Aproveito esta oportunidade para expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha formação acadêmica e que contribuíram para a conclusão desta dissertação de mestrado.

Quero iniciar agradecendo a Deus por me conceder forças e direcionamento diante de todas as adversidades enfrentadas durante a vida, bem como aos meus familiares, por estarem sempre me estendendo a mão em todos os momentos, apoiando os meus sonhos e objetivos, sendo minha fonte inesgotável de generosidade, incentivo e amor.

Aos integrantes do Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal de Alagoas pela oportunidade de aprendizado, especialmente, aos professores e orientadores Dr. Bruno Nogueira e Dr. Rian Pinheiro por toda dedicação, motivação e aconselhamento que ofertaram, sem medir esforços, para o bom desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas de turma e do trabalho, que em muitos momentos contribuíram com palavras de apoio e incentivo ao estudo. Felizmente, estiveram sempre ao meu lado contribuindo para superação de todos os desafios que foram surgindo ao longo de uma das etapas mais importantes da minha vida.

E, por fim, um reconhecimento especial aos professores do Instituto Federal de Alagoas, unidade de ensino na qual pude iniciar a minha caminhada na área de tecnologia da informação através dos cursos técnico e graduação.

Resumo

As metrópoles brasileiras vêm enfrentando graves problemas de congestionamento de trânsito em consequência do rápido crescimento populacional, aumento do número de veículos e ineficiência das políticas públicas. A maioria das cidades não possui sistema de controle de tráfego urbano em tempo real para otimizar o fluxo de veículos. Nesse contexto, a utilização de softwares de simulação de tráfego surgem como alternativas de baixo custo para avaliar diversos problemas e promover possíveis melhorias no tráfego de veículos nas grandes cidades. Assim, por meio do Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO), este trabalho propôs avaliar o desempenho de tráfego urbano de uma via proeminente da cidade de Maceió, Alagoas, Brasil. A via escolhida foi a avenida Fernandes Lima, por representar um dos mais importantes corredores viários da cidade. A abordagem de simulação de tráfego proposta permitiu entender o comportamento do fluxo de veículos da via, que possui peculiaridades, como a faixa azul (exclusiva para o transporte coletivo) e três trechos com semáforos de pedestre. A validação da simulação foi feita considerando dados obtidos a partir de observações reais, e os resultados indicam que é capaz de prover estimativas com erros menores que 5% relacionados ao volume de tráfego de veículos nas interseções semaforizadas e menores que 10% relacionados ao tempo médio de viagem total dos veículos que percorrem toda a avenida. Por fim, comparando os resultados experimentais dos 8 estudos de caso propostos: atual (1), sem faixa azul (2), sem semáforos de pedestre (3), sem faixa azul e semáforos de pedestre (4), acidente trecho 1 (5), acidente trecho 2 (6), semáforos com ajuste de -5 segundos (7) e semáforos com ajuste de +5 segundos (8), foi possível obter melhorias nos indicadores de eficiência (tempo de viagem, tempo de espera, consumo de combustíveis e emissão de gás carbônico) e ganhos volumétricos no tráfego de veículos, com destaque para os cenários 2, 3, 4 e 8, que alcançaram ganhos no volume de tráfego de veículos de, respectivamente, 9,95%, 7,88%, 10,77% e 1,21%.

Palavras-chave: Tráfego Urbano, Simulação, Semáforos, SUMO.

Abstract

Brazilian metropolises have been facing serious traffic congestion problems as a consequence of rapid population growth, the increasing vehicles number and inefficient public policies. Most cities do not have a real-time urban traffic control system to optimize the flow of vehicles. In this context, the use of traffic simulation software appears as low-cost alternatives to evaluate various problems and promote possible improvements in vehicle traffic in large cities. Thus, through the Urban Mobility Simulator (SUMO), this paper proposed to evaluate the urban traffic performance of a prominent road in the city of Maceió, Alagoas, Brazil. The chosen road was Fernandes Lima Avenue, as it represents one of the most important road corridors of the city. The proposed traffic simulation approach allowed us to understand the behavior of the flow of vehicles on the road, which has peculiarities, such as the blue lane (exclusive for public transport) and three sections with pedestrian traffic lights. The simulation validation was performed considering data obtained from real observations, and the results indicate that it is capable of providing estimates with errors lower than 5% and 10% for, respectively, the vehicle traffic volume and the total travel time. Finally, comparing the experimental results of the 8 proposed case studies: current (1), no blue lane (2), no pedestrian traffic lights (3), no blue lane and pedestrian traffic lights (4), accident section 1 (5), accident section 2 (6), traffic lights with adjustment of -5 seconds (7) and traffic lights with adjustment of +5 seconds (8), it was possible to obtain improvements in the efficiency indicators (travel time, waiting time, consumption of fuels and carbon dioxide emissions) and volumetric gains in vehicle traffic, with emphasis on scenarios 2, 3, 4 and 8, which achieved gains in vehicle traffic volume of, respectively, 9.95%, 7.88% , 10.77% and 1.21%.

Keywords: Urban Traffic, Simulation, Traffic-Lights, SUMO.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Quadros	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Estrutura do Trabalho	3
2 Informações sobre Tráfego de Veículos e a Avenida Fernandes Lima	4
2.1 Área Geográfica de Estudo	6
2.2 Eixos Viários	6
2.3 Desastre Ambiental	7
2.4 Avenida Fernandes Lima	9
2.5 Frota e Densidade Demográfica	9
2.6 Tempo de Deslocamento para o Trabalho e Qualidade de Vida	11
2.7 Transporte Público	12
2.7.1 Pontos de Parada de Ônibus na Avenida Fernandes Lima	12
2.7.2 Faixa Exclusiva (Faixa Azul)	13
3 Fundamentação Teórica	14
3.1 Programação Semafórica	14
3.1.1 Conceitos Básicos	14
3.1.2 Ciclo Semafórico	15
3.2 Princípios da Simulação	16
3.2.1 Classificação dos Modelos de Simulação	16
3.2.2 Vantagens dos Modelos de Simulação	19
3.3 Ferramentas Computacionais	19
3.3.1 OpenStreetMap (OSM)	20
3.3.2 Simulation of Urban Mobility (SUMO)	21
3.4 Contagem Volumétrica de Veículos	23
4 Trabalhos Relacionados	24
5 Metodologia	27
5.1 Metodologia de Pesquisa	27
5.2 Formulação do Problema	27
5.3 Definição dos Objetivos e Conceituação do Modelo	28
5.4 Coleta de Dados e Tradução do Modelo	29

5.5	Verificação e Validação	29
5.6	Projeto Experimental, Documentação e Relatórios	30
6	Modelo Proposto	31
6.1	Simulação de Tráfego Urbano	31
6.2	Definição do Corredor Viário	33
6.3	Coleta e Tratamento dos Dados Geométricos	35
6.4	Coleta e Tratamento dos Dados de Tráfego Urbano	35
7	Resultados Experimentais	38
7.1	Infraestrutura Computacional e Viária	38
7.2	Calibração do Modelo	39
7.3	Validação do Modelo	41
7.4	Estudos de Caso	42
7.4.1	Cenários 1, 2, 3 e 4 - Simulação de Remoção de Faixa Azul e Semáforos de Pedestre	43
7.4.2	Cenários 5 e 6 - Simulação de Acidentes de Veículos	50
7.4.3	Cenários 7 e 8 - Simulação de Ajuste no Tempo do Ciclo Semafórico	56
8	Conclusão	60
8.1	Considerações Finais	60
8.2	Limitações do Estudo	62
8.3	Trabalhos Futuros	62
	Referências	63
A	Diagramas de Intervalos Luminosos	68

Lista de Figuras

2.1	Frota de Veículos no Estado de Alagoas em 2021.	5
2.2	Crescimento Populacional do Município de Maceió (2010-2021).	6
2.3	Principais Eixos Viários em Maceió.	7
2.4	Interdição no Eixo Bebedouro - Av. Major Cícero de Góes Monteiro.	8
2.5	Avenida Fernandes Lima, a principal via de acesso da cidade de Maceió.	9
3.1	Diagrama de Intervalos Luminosos do Ciclo Semafórico Completo da Interseção Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary.	16
3.2	Interpretação Gráfica dos Modelos de Simulação Contínuos e Discretos.	17
3.3	Interpretação Gráfica dos Períodos do Modelo de Simulação Dinâmica Transiente e Estacionário (Rubinstein and Kroese, 2017).	18
3.4	Classificação dos Modelos de Simulação.	19
3.5	Importação do Mapa Viário do OpenStreetMap para o SUMO.	21
3.6	Tela do Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) com Dados Geométricos de Maceió/AL.	22
5.1	Fluxograma do Modelo de Simulação Dinâmica.	28
6.1	Representação do Simulador de Mobilidade Urbana SUMO	32
6.2	Diagrama de Intervalos Luminosos do Ciclo Semafórico da Interseção Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary em operação das 4h30 às 14h59.	33
6.3	Semáforos presentes na avenida Fernandes Lima.	34
6.4	Demonstração da configuração do fluxo dos veículos no ambiente de simulação.	36
6.5	Demonstração da configuração de ponto de ônibus no ambiente de simulação.	37
7.1	Interseções Semafóricas Utilizadas para Calibração do Modelo.	40
7.2	Comparativo do Cenário 1 (Atual) x Cenário 2 (Sem Faixa Azul)	44
7.3	Remoção dos Semáforos de Pedestre na Avenida Fernandes Lima.	45
7.4	Semáforos de pedestre existentes na avenida Fernandes Lima.	45
7.5	Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).	47
7.6	Simulação de Acidentes - Cenário 5 (Trecho 1).	51
7.7	Simulação de Acidentes - Cenário 6 (Trecho 2).	52
7.8	Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos simulando acidentes (cenários 1, 5 e 6).	54
7.9	Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos simulando ajuste no tempo do ciclo semafórico (cenários 1, 7 e 8).	58
A.1	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Camaragibe (FACIMA)	68
A.2	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Retorno FACIMA	68
A.3	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Retorno Big Bompreço	69

A.4	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Dr Abelardo Pontes Lima	69
A.5	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Equatorial Energia (Pedestre)	70
A.6	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Hospital Veredas (Pedestre)	70
A.7	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Tereza de Azevedo	71
A.8	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary .	71
A.9	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Cel Lima Rocha	71
A.10	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Miguel Palmeira	72
A.11	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Bompreço Farol (Pedestre)	72
A.12	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Prof Guedes de Miranda	73
A.13	Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Desembargador Tenório	73
A.14	Interseções Semafóricas presentes na avenida Fernandes Lima observadas na ferramenta Netedit.	74

Lista de Tabelas

2.1	Série histórica da estimativa populacional do município de Maceió (2010-2021).	10
2.2	Série histórica da frota de veículos do município de Maceió (2010-2021).	11
2.3	Tempo médio de deslocamento para o trabalho	12
2.4	Referências dos pontos de ônibus presentes na avenida Fernandes Lima.	13
7.1	Calibração volumétrica do tráfego de veículos nas interseções semaforizadas	41
7.2	Validação por tempo médio harmônico de viagem	42
7.3	Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).	46
7.4	Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).	47
7.5	Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos simulando acidentes (cenários 5 e 6)	52
7.6	Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando acidentes (cenários 5 e 6).	55
7.7	Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos simulando ajustes no ciclo semaforizado (cenários 7 e 8).	56
7.8	Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando ajustes no ciclo semaforizado (cenários 7 e 8).	58

Lista de Quadros

4.1	Comparativo dos trabalhos relacionados encontrados na literatura.	26
-----	---	----

1

Introdução

Nos últimos anos, as grandes metrópoles brasileiras vêm enfrentando graves problemas de congestionamento de tráfego urbano devido ao crescente número de veículos que estão trafegando pelas ruas a cada dia. De forma paliativa, as vias urbanas vem sofrendo constantes adaptações para atender a crescente demanda, seja por expansão da malha viária ou por técnicas de otimização de tráfego. No entanto, nem sempre é possível realizar essas adaptações devido à impossibilidade de encontrar espaço físico ou pelo alto custo de implantação de infraestrutura de engenharia e utilização de aparatos tecnológicos (Gonzaga, 2016).

Pouco tempo atrás, as pessoas acreditavam que o congestionamento de veículos nas vias urbanas era apenas motivo de irritação, acidentes e perda de tempo. Nos dias atuais, muitos estudos demonstram que a maior parte da poluição gerada nos centros urbanos é causada pelo excesso de veículos automotores, causando prejuízos de ordem social e econômica (Santos, 2003; de Carvalho, 2011). Assim, o congestionamento do tráfego urbano traz como consequência um grande impacto negativo ao meio ambiente, uma vez que os veículos que estão parados no trânsito ou em baixa velocidade acabam criando poluição atmosférica desnecessária através da emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono, considerado o grande vilão do aquecimento global (Aleko and Djahel, 2020).

Um dos fatores que contribuíram para o aumento do congestionamento nas últimas duas décadas foi a melhoria no padrão de vida dos brasileiros. Nesse período foram concedidos muitos incentivos, como a redução dos impostos sobre a venda de veículos automotores, que impulsionou o aumento da frota, saturando as vias urbanas e acarretando sérios problemas de congestionamento (Gonzaga, 2016; Albuquerque et al., 2017).

A implementação de boas configurações viárias é decisiva no planejamento do tráfego urbano a fim de evitar congestionamentos e situações indesejadas. No intuito de mitigar os problemas associados à circulação de veículos, diversas formas de controle de tráfego vêm sendo utilizadas há muito tempo de forma eficaz. Para subsidiar essas formas de controle, as técnicas

de simulação são comumente aplicadas para reproduzir o desempenho de um sistema a ser desenvolvido ou existente, a fim de compreender o seu comportamento (Santos, 2003).

O planejamento do tráfego urbano deve ser enxergado com muita responsabilidade. Nesse sentido, Stolfi and Alba (2015) citam que um dos métodos utilizados para aprimorar ainda mais a eficiência e a segurança do trânsito, resultando em um impacto positivo no fluxo do tráfego de veículos é a otimização do ciclo semafórico. Complementando, Ferrer et al. (2019) afirmam que na maioria das cidades, o controle semafórico em tempo real não é viável principalmente por dificuldades financeiras e questões técnicas. No entanto, como alternativa encontrada para melhoraria do fluxo do tráfego de veículos e redução da poluição, a utilização de ferramentas de simulação de tráfego urbano podem contribuir para que sistemas complexos do mundo real possam ser otimizados.

A utilização de simulação de tráfego urbano possui amplas funcionalidades e pode contribuir como um mecanismo de baixo custo para tomada de decisão em relação ao planejamento de trânsito, avaliando a adequação do corredor viário, da programação semafórica, assim como a sua confiabilidade. Essas soluções de simulação de tráfego estão amplamente disponíveis na literatura e possuem maturidade para contribuir com a entrega de bons resultados. Nesse contexto, softwares de simulação de tráfego urbano surgem como uma alternativa econômica para avaliar diversos problemas e promover possíveis melhorias a fim de aumentar o volume de tráfego de veículos nas vias. Esses softwares, quando bem configurados e calibrados, podem ser utilizados posteriormente para otimizar ciclos de semáforos (Hu et al., 2016; Ferrer et al., 2019), remover semáforos (Floriani et al., 2017), redirecionar o fluxo do tráfego de veículos (Mattei et al., 2019), simular acidentes de veículos (Smith et al., 2014), implantar restrições nas faixas de rolamento da via com a finalidade de favorecer o transporte coletivo (Silva et al., 2020) e para muitos outros projetos de melhoria sem comprometer os recursos financeiros, humanos e de infraestrutura.

Diante dos problemas de congestionamento evidenciados, é de suma importância a realização de estudos de tráfego urbano visando a melhoria do fluxo de veículos na avenida Fernandes Lima, principal corredor viário da capital do Estado de Alagoas. Na literatura, foi encontrado apenas um modelo de simulação para o cenário estudado, utilizando o software de simulação Vissim, que possui licença comercial. Entretanto, esse modelo possui limitações, como a omissão da configuração da defasagem do ciclo semafórico e também não está disponível publicamente para outros pesquisadores promoverem novos estudos.

Este trabalho propõe avaliar o desempenho de tráfego urbano usando simulação como alternativa econômica para avaliar problemas e promover melhorias no fluxo de veículos em Maceió/AL. Para isso, foi adotado o Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) por ser um software *opensource* bastante utilizado na literatura (Panovski and Zaharia, 2016; Ferrer et al., 2019; Celtek et al., 2020), que possui extensa documentação, fácil utilização e que disponibilizou uma visão detalhada do comportamento individual dos veículos, permitindo a simulação de intervenções na via como a remoção dos semáforos de pedestre e faixa azul,

bem como simulação de acidentes e ajustes do ciclo semafórico. O código dessa abordagem é público e está disponível através do link <https://github.com/flaviovasconcelos/simulation-urban-traffic-scenery-maceio>.

1.1 Objetivos

Os objetivos gerais e específicos serão descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Promover uma simulação computacional de tráfego urbano para a avenida Fernandes Lima como alternativa econômica para avaliar diversos problemas e promover possíveis melhorias no tráfego de veículos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados e identificar o fluxo do tráfego de veículos na avenida Fernandes Lima.
- Implementar uma simulação de tráfego de veículos próximo da realidade utilizando o simulador de mobilidade urbana SUMO.
- Comparar o volume do tráfego de veículos nos cenários hipotéticos propostos.
- Avaliar os indicadores de desempenho dos veículos nos cenários hipotéticos propostos, como tempo de viagem, tempo de espera em congestionamento, emissão de gás carbônico e consumo de combustível.
- Avaliar os resultados obtidos e sugerir mudanças na via em função do volume de tráfego de veículos alcançados nas interseções semafóricas.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em 8 capítulos, sendo esta introdução o primeiro capítulo. No capítulo 2 são apresentadas informações sobre o tráfego de veículos e a avenida Fernandes Lima. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica. No Capítulo 4 são descritos os trabalhos relacionados encontrados na literatura. No capítulo 5 é descrita a metodologia adotada para alcançar os objetivos. No capítulo 6 são descritos os passos realizados para a construção do ambiente de simulação de tráfego urbano proposto. No capítulo 7 são descritos os resultados experimentais dos cenários simulados de tráfego urbano. Por último, o capítulo 8 apresenta a conclusão do trabalho e aponta direções futuras.

2

Informações sobre Tráfego de Veículos e a Avenida Fernandes Lima

Assim como as capitais de todo o país, a cidade de Maceió apresenta sérios problemas de congestionamento. O crescimento populacional em decorrência da verticalização desenfreada, bem como o aumento de veículos, ano após ano, torna o futuro ainda mais desafiador. Segundo [Fausto Filho et al. \(2018\)](#), o aumento de veículos na cidade de Maceió deixará os principais eixos viários supersaturados nos horários de pico, dificultando a locomoção das pessoas no desempenho de suas atividades. E, para que isso não aconteça, será necessário que as autoridades adotem medidas a fim de mitigar os problemas.

A deficiência no sistema de transportes é um dos maiores problemas da sociedade. É um problema antigo, decorrente de falta de planejamento dos órgãos de controle e investimentos inadequados que tem interferido na qualidade de vida da população. No entanto, o desenvolvimento de políticas de melhoria na mobilidade urbana promovem o desenvolvimento da sociedade ([Albuquerque et al., 2017](#)).

O governo federal entende que a Mobilidade Urbana Sustentável é definida como o resultado de uma coleção de políticas de transporte e circulação, tendo como objetivo proporcionar acesso amplo e democrático ao espaço urbano, priorizando o transporte público e meios de transporte não-motorizados de forma sustentável ([Brasil, 2007](#)). Na cidade de Maceió, o transporte público é prioritário, pois conta com a efetiva implantação da faixa exclusiva (Faixa Azul) nas avenidas Fernandes Lima, Durval de Góes Monteiro, Dona Constança e Comendador Leão. A faixa azul foi implementada por meio da Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) e é um dos principais marcos da mobilidade urbana na capital ([Maceió, 2021](#)).

Após realizar estudos sobre o fluxo do tráfego de veículos, [Fausto Filho et al. \(2018\)](#) chegaram a conclusão que o trecho que compreende a avenida Fernandes Lima possui uma tendência de piora para os próximos 5 anos, tornando o trânsito da região bastante caótico caso as autoridades competentes não apresentem soluções de melhoria.

Na Figura 2.1 são apresentados dados do DETRAN/AL apontando que o Estado de Alagoas alcançou em 2021 o total de 981.823 veículos. Maceió possui grande parte desse montante, são 377.115 veículos cadastrados. É importante também salientar que as pessoas residentes em cidades vizinhas necessitam ir à capital para utilizar os serviços públicos e privados, na maioria das vezes inexistentes no interior.

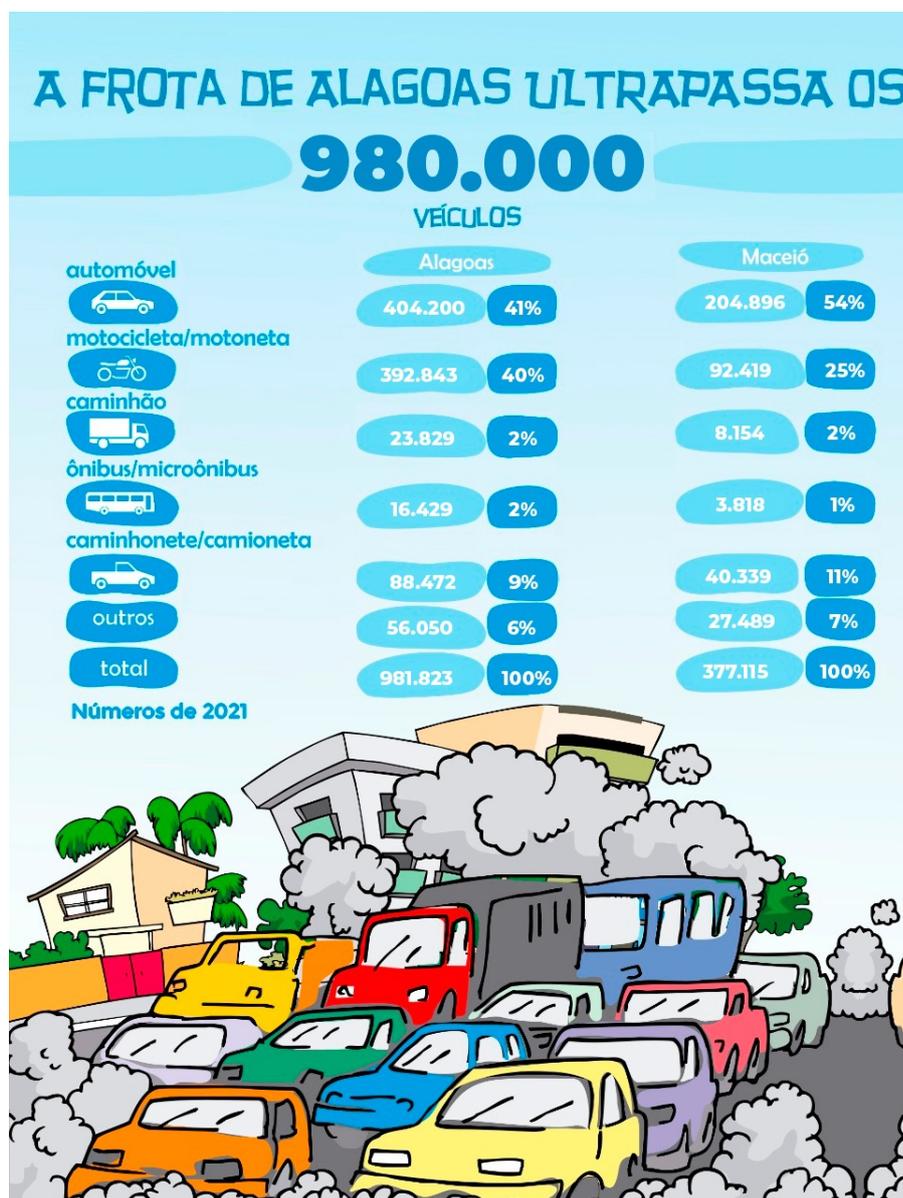


Figura 2.1: Frota de Veículos no Estado de Alagoas em 2021. Adaptado do DETRAN/AL (2021a).

2.1 Área Geográfica de Estudo

O município de Maceió é a capital do Estado de Alagoas, o segundo menor Estado do Brasil. De acordo com dados do IBGE¹, em 2021, a cidade possui área territorial de 509.320 km² e população estimada em 1.031.597 pessoas, sendo 1.854,10 habitantes por km². O último senso realizado pelo IBGE foi em 2010, que demonstrou que a população era de 932.748 pessoas, 17ª cidade mais populosa do país. Comparando com os dados estimativos disponibilizados, houve um aumento populacional de 10,58% nos últimos 12 anos.

A Figura 2.2, demonstra os dados do censo demográfico realizado pelo IBGE onde é possível observar que Maceió está posicionada entre as cidades que possuem maior densidade demográfica do Estado de Alagoas com mais de 1 milhão de habitantes. O crescimento populacional no período de 2010 a 2021 foi de 10,58%.

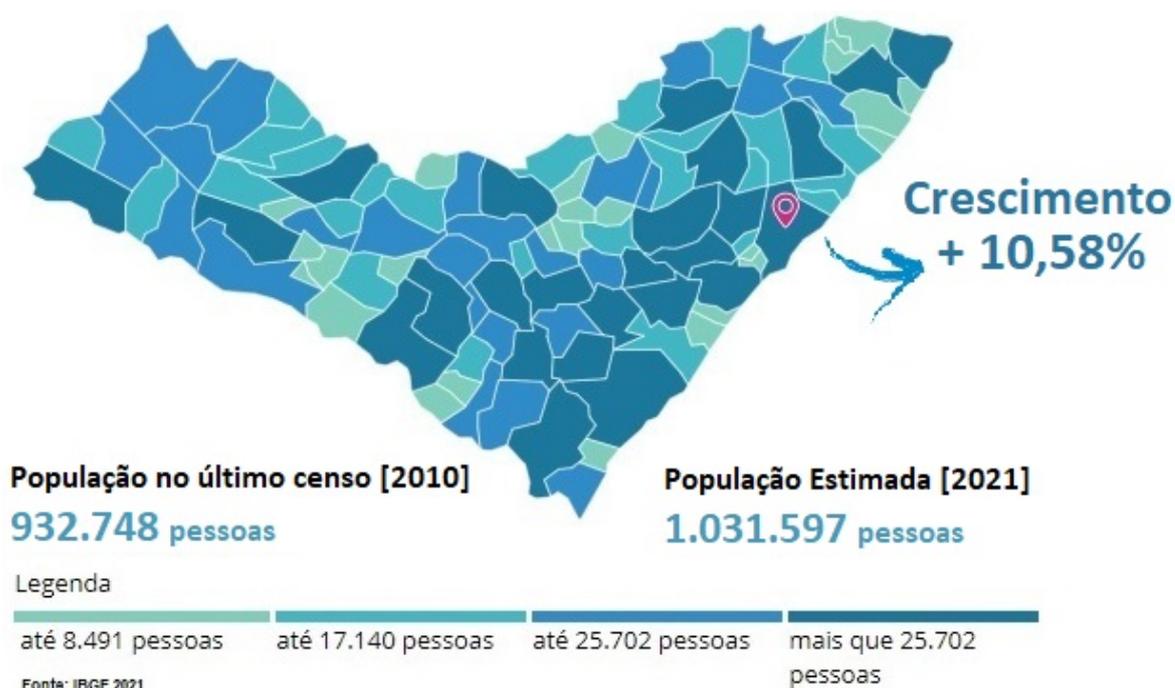


Figura 2.2: Crescimento Populacional do Município de Maceió (2010-2021). Adaptado do IBGE (2010).

2.2 Eixos Viários

Em Maceió existem três eixos viários que interligam a parte alta e baixa da cidade. São eles: Eixo Farol (composto pela avenida Durval de Góes Monteiro e avenida Fernandes Lima), Eixo Bebedouro e Eixo Serraria. Esses trechos possuem acentuados fluxos de veículos com alto potencial de influenciar a eficiência do tráfego de veículos na cidade. Na Figura 2.3, pode-se

¹Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>

observar que os Eixos Bebedouro e Serraria possuem, além da conexão com a parte baixa da cidade, conexão com o principal Eixo que é o Farol.



Figura 2.3: Principais Eixos Viários em Maceió.

2.3 Desastre Ambiental

Outro ponto importante que deve ser considerado é que, desde 2020, a avenida Major Cícero de Góes Monteiro, uma das três importantes vias de acesso que conectam a parte alta (UFAL) à parte baixa (Centro) da cidade, foi interrompida devido à ocorrência de processos geológicos nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro. Esses processos surgiram em 2018, por motivo da atividade de extração de sal-gema na região, segundo o relatório síntese de resultados do [Serviço Geológico do Brasil \(2019, volume I\)](#), gerando ainda mais fluxo veicular na avenida Fernandes Lima, conforme podemos observar na Figura 2.4.

A avenida Major Cícero de Góes Monteiro foi interdita pela SMTT no bairro do Mutange, pois encontra-se na área de risco delimitada no mapa da Defesa Civil de Maceió. O motivo da interdição é devido ao avanço na instabilidade no solo e também para preservar a segurança das



Figura 2.4: Interdição no Eixo Bebedouro - Av. Major Cícero de Góes Monteiro.

peças durante o fechamento dos poços de mineração e a realização de obras nas encostas (SMTT, 2020). Com isso, existe uma expectativa que o fluxo de veículos na avenida Fernandes Lima gerado pela interdição da avenida Major Cícero de Góes Monteiro seja ainda maior.

2.4 Avenida Fernandes Lima

Localizada na região central da cidade de Maceió, a avenida Fernandes Lima faz parte do Eixo Farol junto com a avenida Durval de Góes Monteiro. Devido a maior proximidade com a parte baixa da cidade, a avenida Fernandes Lima é a que possui o tráfego de veículos mais intenso do eixo ao longo dos seus 4,6 km de extensão. Na Figura 2.5, pode-se observar um grande volume de veículos na avenida Fernandes Lima no período da manhã, por volta das 9h, onde o fluxo acentuado ocorre no sentido Tabuleiro-Centro, pista direita.



Figura 2.5: Avenida Fernandes Lima, a principal via de acesso da cidade de Maceió.

2.5 Frota e Densidade Demográfica

Anualmente, de acordo com o artigo 102 da Lei nº 8.443, de 16 de julho de 1992, o IBGE (2021) divulga estimativas do total da população presente nos municípios brasileiros. Essas estimativas servem de base para o cálculo da tendência de crescimento populacional. No ano

de 2021, os estudos apontaram um total de 3.365.351 habitantes no Estado de Alagoas, sendo que somente em sua capital Maceió havia 1.031.597 de habitantes, cerca de 30,65% do total de habitantes do Estado. Este fato demonstra uma relativa concentração de habitantes na capital visto que o Estado de Alagoas possui 102 municípios.

Analisando os dados populacionais de Maceió, é possível observar que o número de moradores vem crescendo. A Tabela 2.1 traz o crescimento percentual anual da população residente no município nos últimos 12 anos. No ano de 2010, havia 932.748 habitantes. Já em 2021, esse número alcançou a marca de 1.031.597 habitantes. Entre 2010 e 2021, houve um aumento do número de habitantes na cidade de cerca de 10,20%, demonstrando assim uma tendência de alta no longo prazo.

Tabela 2.1: Série histórica da estimativa populacional do município de Maceió (2010-2021).

População Residente Estimada em Maceió/AL		
Ano	Quantidade	Crescimento/ano
2021	1.031.597	+0,61 %
2020	1.025.360	+0,62 %
2019	1.018.948	+0,65 %
2018	1.012.382	-1,65 %
2017	1.029.129	+0,73 %
2016	1.021.709	+0,78 %
2015	1.013.773	+0,84 %
2014	1.005.319	+0,86 %
2013	996.733	+4,56 %
2012	953.393	+1,09 %
2011	943.110	+1,11 %
2010	932.748	-
Total		+10,20%

Fonte: [IBGE \(2021\)](#)

À medida que o crescimento populacional avança, um maior número de veículos são utilizados em Maceió. Nesse sentido, observando a série histórica da frota de veículos disponibilizada pelo [DETRAN/AL \(2021b\)](#), pode-se verificar que o número de veículos vem apresentando crescimento ano a ano. A Tabela 2.2 demonstra a quantidade da frota de veículos registrados no Município de Maceió entre os anos de 2010 a 2021. No período, houve um acréscimo de 62,32% de veículos na região, muito acima do aumento populacional de 10,58%. Assim, comparando os dados populacionais e de frota veicular, a proporção de veículos por habitante saltou de 0,22 em 2010 para 0,37 em 2021, número bastante expressivo. Como é possível observar, as projeções e estimativas populacionais e de veículos são fundamentais para o cálculo de indicadores sociodemográficos, bem como para otimização do tráfego urbano.

Tabela 2.2: Série histórica da frota de veículos do município de Maceió (2010-2021).

Frota de Veículos em Maceió/AL		
Ano	Quantidade	Crescimento/ano
2021	377.115	+3,36 %
2020	364.866	+4,24 %
2019	350.039	+5,49 %
2018	331.816	+6,68 %
2017	311.051	+1,74 %
2016	305.745	+3,38 %
2015	295.751	+4,65 %
2014	282.600	+6,11 %
2013	266.320	+7,69 %
2012	247.294	+8,56 %
2011	227.798	+10,42 %
2010	206.297	-
Total		+62,32%

Fonte: [DETRAN/AL \(2021b\)](#)

2.6 Tempo de Deslocamento para o Trabalho e Qualidade de Vida

Segundo os dados probabilísticos apontados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, [IBGE \(2019\)](#), considerando os trajetos de ida e volta, o tempo médio de deslocamento para o trabalho das pessoas que residem na cidade de Maceió e que tem, no mínimo, 15 anos de idade é de 5,7 horas por semana. Em comparação com as capitais da região nordeste do país, que possuem média de deslocamento de 5,8 horas por semana, Maceió está um pouco abaixo da média, ocupando a 4^a posição no ranking das capitais em que os moradores levam mais tempo para realizar o deslocamento ao trabalho, ficando à frente apenas de capitais como Salvador, Recife e Fortaleza, nas quais os trabalhadores perdem respectivamente, 6,9h, 6,1h e 5,8h por semana. Já em relação a todas as capitais do Brasil, Maceió também está abaixo da média nacional que é de 6,4 horas por semana, conforme observado na Tabela 2.3 que apresenta dados disponibilizados pelo [IBGE \(2019\)](#), coletados através da Pesquisa Nacional de Saúde (PNS), cujo objetivo foi entender melhor a situação de saúde e os estilos de vida da população brasileira.

Nesse sentido, [Araújo et al. \(2011\)](#) relatam que, em muitos países, os problemas relacionados ao trânsito causam implicações na qualidade de vida da população. Esses problemas são estudados observando duas vertentes: o meio ambiente e a saúde pública. Portanto, dedicar pouco tempo para o deslocamento ao trabalho representa qualidade de vida. Assim, diante da importância da avenida Fernandes Lima para os habitantes da cidade de Maceió, na qual um grande número de veículos trafegam de forma cotidiana, bem como da acentuada quanti-

Tabela 2.3: Tempo médio de deslocamento para o(s) trabalho(s), em horas, por semana, considerando tempo de ida e volta, das pessoas de, no mínimo 15 anos de idade nas capitais da região nordeste.

	Deslocamento (horas/semana)	Tempo médio	Intervalo de confiança de 95%	
			Limite inferior	Limite superior
	Capitais do Brasil	6,4	6,2	6,6
	Região Nordeste	5,8	5,6	6,0
1º	Salvador	6,9	6,4	7,5
2º	Recife	6,1	5,4	6,7
3º	Fortaleza	5,8	5,1	6,4
4º	Maceió	5,7	5,0	6,3
5º	Aracajú	5,4	5,0	5,9
6º	São Luís	4,8	4,3	5,3
7º	João Pessoa	4,8	4,3	5,2
8º	Natal	4,7	4,2	5,3
9º	Teresina	4,5	4,0	5,0

Fonte: Adaptado do 5º volume da Pesquisa Nacional de Saúde (PNS), [IBGE \(2019\)](#).

dade de linhas de transporte público alocada, cerca de 54,35% da cidade, pode-se afirmar que a otimização do tráfego urbano pode contribuir para redução dos índices de deslocamento ao trabalho, pois é esperada maior fluidez no trânsito local.

2.7 Transporte Público

Direcionar investimentos ao transporte público é contribuir para a redução dos impactos negativos ambientais e sociais ocasionados pela mobilidade urbana motorizada nos grandes centros. Em contraponto, a falta de investimentos no transporte público causa uma má prestação de serviços, desinteresse na utilização dos ônibus e, conseqüentemente, incentiva a utilização do transporte individual, acentuando ainda mais o congestionamento ([Albuquerque et al., 2017](#)).

O principal meio de transporte coletivo da cidade de Maceió é o ônibus, que faz a cobertura de mais de 90% dos bairros da cidade. Os principais problemas apontados para esse modal são os intervalos irregulares das linhas e a sua escassez, que, conseqüentemente, ocasiona superlotações nos horários de grande demanda ([Santos et al., 2017](#)).

2.7.1 Pontos de Parada de Ônibus na Avenida Fernandes Lima

Analisando o trecho da Fernandes Lima, foram encontrados 19 pontos de ônibus em todo o seu percurso. A Tabela 2.4 demonstra os locais de referência onde estão localizados os abrigos para a parada de ônibus. Para essa análise, foi utilizado o sistema Google Maps² que permite

²Serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite da terra gratuito na web fornecido e desenvolvido pela empresa estadunidense Google.

a visualização dos locais por imagem sem a necessidade de deslocamento físico.

Tabela 2.4: Referências dos pontos de ônibus presentes na avenida Fernandes Lima.

SENTIDO	
CENTRO-TABULEIRO	TABULEIRO-CENTRO
Ponto Igreja Paz e Vida	Ponto FACIMA
Ponto Hiper Bompreço	Ponto Hiper Bompreço
Ponto Diamantes	Ponto Equatorial
Ponto CEPA	Ponto Casa Vieira
Ponto Quartel Exército	Ponto Quartel Exército
Ponto Banco do Nordeste	Ponto CEPA
Ponto Hospital Veredas	Ponto IZP
Ponto Equatorial	Ponto Palato
Ponto Big Bompreço Gruta	Ponto Posto Jardins
Ponto FACIMA	-

2.7.2 Faixa Exclusiva (Faixa Azul)

A implantação da faixa exclusiva para o transporte público em Maceió, no ano de 2014, foi uma das alternativas encontradas pelo município para reduzir o tempo de viagem dos transportes coletivos. Dos três eixos com maior fluxo de veículos (Farol, Bebedouro e Serraria), apenas o eixo Farol, no qual está localizada a avenida Fernandes Lima, dispõe da faixa exclusiva para o transporte público (Albuquerque et al., 2017).

A faixa exclusiva percorre toda a avenida Fernandes Lima, demarcada com a cor azul, à direita da via, está disposta nos dois sentidos, sendo proibido a sua utilização por condutor de carro ou motocicleta, salvo quando for acessar um estabelecimento comercial as suas margens, bem como realizar o contorno de quadra, entrar ou sair da avenida. O acesso do transporte coletivo é exclusivo das 6h às 20h, de segunda a sexta-feira. Nos demais dias e horários, o trânsito está liberado para todos os veículos (SMTT, 2021).

À medida que o tempo de viagem do transporte coletivo diminuiu, o realizado pelo transporte individual no mesmo percurso aumentou, confirmando que o objetivo da implantação da faixa exclusiva para o transporte público foi alcançado. O sistema de transporte coletivo transporta mais pessoas e ocupa menos espaço, conseqüentemente, reduz o tempo de viagem e polui menos o meio ambiente (Silva et al., 2020).

3

Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados conceitos importantes para o entendimento dos métodos e análises que serão propostos neste trabalho. O referencial teórico discorrerá sobre os conceitos básicos da programação semafórica, princípios da simulação e apresentação do software de simulação de mobilidade urbana SUMO, citando alguns autores que balizam o assunto proposto.

3.1 Programação Semafórica

Os semáforos são instrumentos de controle de tráfego que revezam a permissão de acesso às vias a partir de sinais luminosos. Por padrão, são acionadas as cores verde para seguir e vermelho para parar. Existe também a cor amarela que alerta o condutor ou pedestre sobre a proximidade da mudança para o estado vermelho. Essa mudança é muito importante para evitar acidentes, pois orienta o condutor a parar o veículo com antecedência, bem como o pedestre acelerar o próprio ritmo e concluir o trajeto (Gonzaga, 2016). Assim, a programação semafórica é uma técnica que compreende a definição dos estágios luminosos verde, amarelo e vermelho nos semáforos. O tempo total do ciclo é o somatório do tempo de cada um dos estágios configurados (CONTRAN, 2014).

3.1.1 Conceitos Básicos

Para um melhor entendimento de como funciona a programação semafórica, é necessário compreender seus conceitos básicos, visto as peculiaridades delimitadas à área de estudo tratada neste trabalho. Alguns conceitos e definições, segundo o CONTRAN (2014) são:

- **Ciclo:** é a sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica, ou seja, é o tempo em que a sequência verde, amarelo e vermelho aparece por completo.

- **Fase:** é a parte do ciclo reservada a uma combinação qualquer de movimentos de tráfego que recebem, simultaneamente, o direito de passagem. Basicamente, representa a combinação de luzes em um lado da via.
- **Entreverdes:** compreende o intervalo de tempo entre o final do sinal verde de um estágio e o início do sinal verde do estágio subsequente.
- **Estágio:** compreende o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.
- **Defasagem (*Offset*):** é o intervalo de tempo decorrido entre o início do sinal verde de uma corrente de tráfego que passa por dois locais semaforizados pertencentes à mesma rede, ou seja, é a diferença entre os sinais verdes de dois semáforos consecutivos de uma mesma via e está relacionado com o sincronismo dos semáforos.

A configuração de Defasagem (*Offset*) no ambiente de simulação é muito importante visto que o deslocamento dos veículos entre os semáforos são regularmente projetados com base no tempo de viagem do trecho, no qual é feita uma configuração de acordo com o comprimento da via e a velocidade dos veículos. Essa ação visa permitir o deslocamento mais eficiente dos veículos em todo o percurso, pois proporciona que o veículo receba o direito de passagem assim que chegar no próximo semáforo.

3.1.2 Ciclo Semafórico

Realizar uma adequada programação do ciclo semafórico é muito importante para efetividade do fluxo do tráfego urbano, uma vez que o semáforo mal configurado é capaz de provocar sérios transtornos à sociedade, como acidentes e congestionamentos. Isso ocorre com frequência devido o aumento do número de veículos e de pessoas que passaram a compartilhar os mesmos espaços urbanos. No entanto, o semáforo quando bem configurado funciona como um ótimo controlador de tráfego, organizando o trânsito nas interseções, diminuindo os conflitos, aumentando a capacidade de escoamento e reduzindo a frequência de acidentes (Araújo, 2006).

A avenida Fernandes Lima possui 4 programas semafóricos, o primeiro é configurado para atender um fluxo de veículos das 04h30 às 14h59 (Manhã), o segundo das 15h00 às 22h59 (Tarde), o terceiro das 23h00 às 00h59 (Noite) e, por último, o quarto das 01h00 às 04h29 (Madrugada). Para demonstrar como funciona a programação semafórica completa, foi elaborado o diagrama de intervalos luminosos para os 4 programas semafóricos configurados na interseção da avenida Fernandes Lima com a avenida Rotary, de acordo com pesquisa de campo e dados fornecidos pela SMTT, órgão regulador. Na Figura 3.1 é possível observar o diagrama de intervalos luminosos do ciclo semafórico completo da interseção avenida Fernandes Lima x avenida Rotary referente aos dias da semana de segunda-feira a sexta-feira.

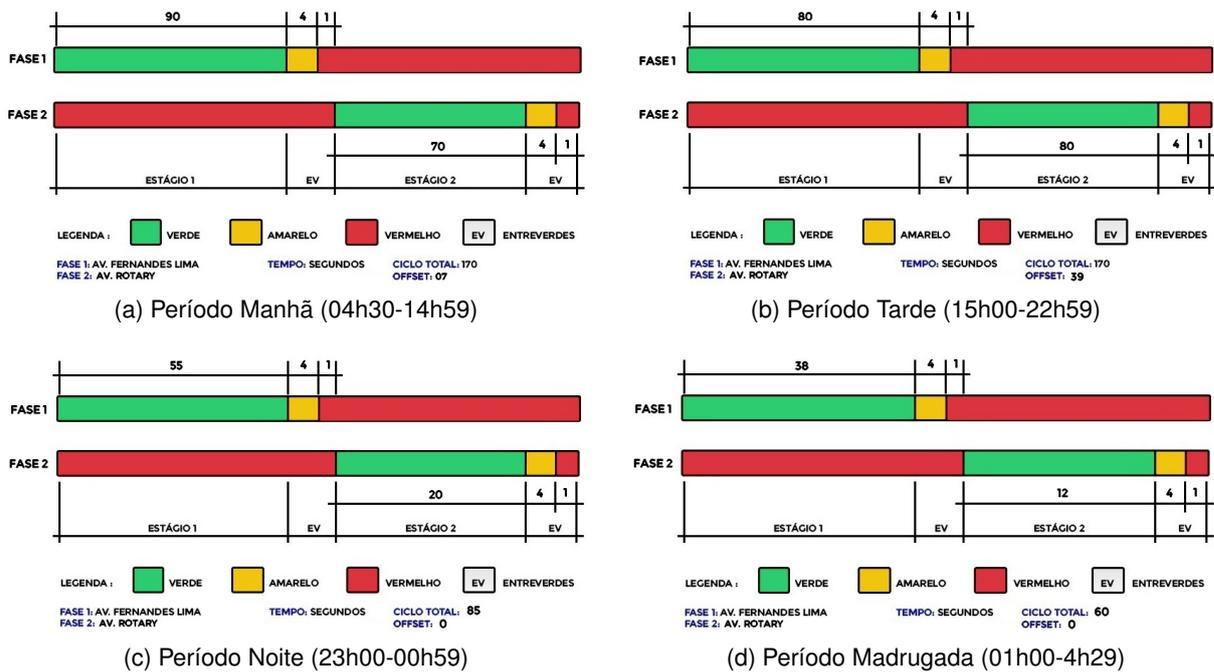


Figura 3.1: Diagrama de Intervalos Luminosos do Ciclo Semafórico Completo da Interseção Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary.

3.2 Princípios da Simulação

Simulação computacional corresponde a um método utilizado para buscar a abstração da realidade através de modelos computacionais. Nesse sentido, modelo é uma simplificação da realidade que, em linhas gerais, trata-se de uma técnica que propõe reproduzir um ambiente de simulação próximo do mundo real a fim de estudar o seu comportamento (Chwif and Medina, 2010).

Na literatura, muitos estudiosos abordam sobre o tema, um deles é Banks (1998) que afirma que simulação é a reprodução da operação de um processo ou sistema existente ao longo do tempo, sendo utilizada para descrever e analisar suas ações e reações diante das interações propostas. Law et al. (2000) complementam que um modelo de simulação bem elaborado e com níveis de maturidade pode trazer respostas consistentes para um grande número de questões realistas.

3.2.1 Classificação dos Modelos de Simulação

Analisando as entradas de uma simulação, Chung (2003) afirma que existem duas possibilidades: Determinísticas ou Estocásticas. Na simulação Determinística, considera-se como entrada valores constantes, ou seja, são valores que não sofrem alteração. Com isso, não possuem variáveis com comportamento aleatório. Nesse sentido, o evento envolvendo os dados determinísticos ocorre da mesma maneira ou de maneira previsível todas as vezes. Assim, os valores

são constantes mas as consequências não. Já na simulação Estocástica temos variáveis com probabilidade de acontecer, pois não ocorre com o mesmo tipo de regularidade como na determinística. Assim, possuem variáveis com comportamento aleatório.

Analisando o tempo de uma simulação, existem duas possibilidades: Estática e Dinâmica. Na simulação Estática os eventos são independentes e não existe relação com o que ocorreu na simulação passada e nem com a próxima, portanto não depende do tempo. Em simulações Dinâmicas os eventos ocorrem ao longo do tempo, onde as situações passadas influenciam o presente. De acordo com as mudanças de variáveis de estado, o modelo de simulação Dinâmica pode ainda ser dividido em dois grupos: Contínuos e Discretos. No modelo Contínuo, as mudanças ocorrem de maneira contínua no tempo, ou seja, o estado do sistema muda continuamente em função do tempo, incidindo, por exemplo, sobre os parâmetros como posição do veículo e velocidade. Já no modelo Discreto, as mudanças ocorrem de maneira descontínua no tempo, ou seja, o estado do sistema muda somente no instante que ocorre um evento, não considerando alterações contínuas (Law et al., 2000).

A Figura 3.2 demonstra a interpretação gráfica dos modelos de simulação Contínuos e Discretos. Na Figura 3.2a é possível observar o gráfico de velocidade do veículo por hora. Já na Figura 3.2b é possível observar o gráfico do volume de veículos que passaram em uma interseção semaforizada.

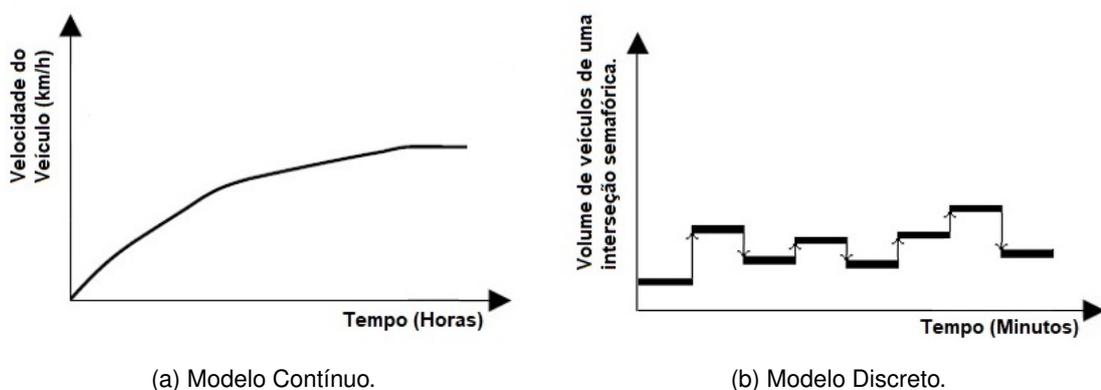


Figura 3.2: Interpretação Gráfica dos Modelos de Simulação Contínuos e Discretos.

Em relação à análise estatística dos dados de saída de uma simulação, segundo [Altiok and Melamed \(2007\)](#), a simulação pode ser classificada em dois tipos: Transiente (Terminal) e Estacionária (Não-Terminal). O tipo de simulação transiente ocorre quando o tempo de parada de uma simulação é determinado de forma arbitrária visando definir o tamanho da amostra. Já o tipo de simulação estacionária ocorre quando não é definido o tempo de parada, ou seja, não há um tempo exato para terminar a simulação, podendo ocorrer quando uma determinada métrica ou variável entrar em estado de equilíbrio ([Rubinstein and Kroese, 2017](#)). Nesse sentido, o tipo de simulação proposta por este estudo é transiente porque busca avaliar o desempenho do tráfego urbano de veículos da avenida Fernandes Lima no horário específico das 6h45 às 7h45.

A Figura 3.3 demonstra os períodos do modelo de simulação dinâmica transiente e estacionário, no qual é possível observar a oscilação inicial no gráfico que corresponde ao período transiente, bem como a região de equilíbrio do período estacionário. Assim, pode-se entender que o sistema terá primeiro um estado transiente inicial antes que se torne equilibrado e alcance o estado estacionário.

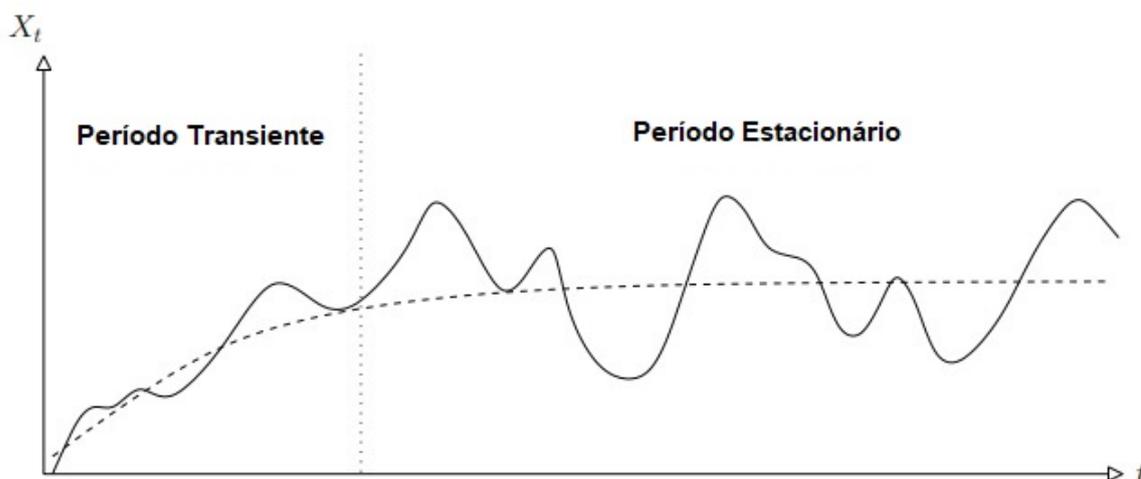


Figura 3.3: Interpretação Gráfica dos Períodos do Modelo de Simulação Dinâmica Transiente e Estacionário (Rubinstein and Kroese, 2017).

Outro ponto importante que deve ser destacado é que simulações podem começar em um estado inicial distante da realidade, por isso, exigem a definição de um período *warm up*, que representa o período temporário em que uma determinada variável apresenta oscilação estatística, no qual é chamado de período de aquecimento (Chung, 2003). Dessa forma, o período de simulação transiente ocorre no espaço de tempo em que os veículos estão sendo inseridos da via, momento em que acabam apresentando oscilações estatísticas, tanto em relação ao volume de veículos nas interseções quando em seus indicadores de desempenho. Esse período ocorre até o momento em que o cenário de simulação apresenta o volume de veículos conforme o observado no mundo real. É neste ponto que o período de simulação passa a ser estacionário (permanente). No período de simulação estacionário a variável apresenta medida de desempenho estável, que neste estudo tem como objetivo dar início à simulação em um estado próximo daquele esperado no que ocorre na realidade. Assim, para alcançar resultados satisfatórios foi eliminado o período de simulação transiente, uma vez que configurar um ambiente de simulação de tráfego urbano de veículos com início de forma estacionária seria muito custoso em relação ao tempo, dado à necessidade de ajustar muito bem todas as variáveis de um sistema tão complexo como é o trânsito nas grandes cidades.

A Figura 3.4 demonstra a classificação dos modelos de simulação discutidos. O modelo de simulação proposto neste trabalho utiliza o Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO), que é determinístico por padrão, mas permite a implementação de algoritmos para gerar número

aleatórios. Em relação ao tempo de simulação, os movimentos dos veículos ocorrem em espaço contínuo e tempo discreto. Em relação ao tipo, a simulação é transiente.



Figura 3.4: Classificação dos Modelos de Simulação.

3.2.2 Vantagens dos Modelos de Simulação

A utilização de um modelo de simulação é capaz de proporcionar uma série de benefícios e não apenas uma interpretação do futuro. Com a simulação, por exemplo, o pesquisador pode testar todos pontos proporcionados por uma alteração ou acréscimo sem comprometer os recursos do projeto trabalhado (Pegden et al., 1995). Ainda assim, a modelagem da simulação pode ser utilizada como um instrumento de análise para prever o efeito das mudanças nos sistemas existentes.

Uma das vantagens da simulação é a possibilidade de comprimir ou expandir o tempo. Assim, é possível utilizar o poder computacional disponível para simular um período longo de tráfego urbano, com distintas variáveis, reduzindo o prazo de testes de horas para questão de segundos. Isso facilita a investigação de situações que por ventura estejam ocorrendo no ambiente de simulação computacional proposto. Por isso, o ambiente de simulação é um item indispensável para realizar estudos hipotéticos, visto que através dele é possível aproximar o verdadeiro comportamento do sistema.

Contudo, é possível afirmar que ambientes de simulação computacional podem fornecer dados preciosos, tonando-se um mecanismo de baixo custo e de forte contribuição à tomada de decisão, principalmente onde o objetivo é auxiliar a construção de projeto de sistemas reais ou conceituais.

3.3 Ferramentas Computacionais

Utilizar ferramentas computacionais para produzir um ambiente de simulação é essencial. Nos dias atuais, uma gama de opções estão disponíveis para os pesquisadores. Na maioria das

vezes são softwares livres de custos, restando às empresas o investimento em capacitação técnica. Nesse sentido, a simulação de tráfego urbano pode ser implementada com o apoio de ferramentas computacionais, visto que um ambiente próximo da realidade pode ser construído a fim de servir como base para testes e homologação de novas funcionalidades, como a promoção de ajustes na via estudada.

Segundo [Galvan-Correa et al. \(2020\)](#), a utilização adequada da sincronização nos semáforos tem demonstrado ser uma opção viável para apoiar a melhoria do fluxo dos veículos nas vias urbanas. Entretanto, é necessário utilizar ferramentas computacionais que possam dar suporte para encontrar boas soluções para o problema em um tempo razoável. Neste trabalho são utilizadas as ferramentas OpenStreetMap para obtenção do mapa da rede viária, Google Maps para visualização do fluxo das vias urbanas e o Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) para simular o tráfego urbano.

3.3.1 OpenStreetMap (OSM)

O OpenStreetMap (OSM) é uma base de dados geográfica aberta mantida por voluntários do mundo todo. A plataforma fornece a possibilidade de exportação de mapas de relevância através de mapeamento colaborativo semelhante ao Wikipédia no que tange a possibilidade de edição ([Neis et al., 2012](#)).

Segundo [Garcia-Nieto et al. \(2013\)](#), o OSM fornece a possibilidade de exportação de mapas digitais, sendo um dos mais populares, pois possui compatibilidade com simuladores de tráfego e fornece dados geográficos, além de dados da programação de semáforos válidos.

Em relação a sua estrutura, [Feyh and Spohn \(2018\)](#) afirmaram que essa plataforma colaborativa disponibiliza os modelos dos mapas em XML, sendo os dados distribuídos em tags, modelo de dados bastante simples e flexível a fim de permitir que sejam ajustados de forma trivial. Com isso, o OSM possui três tipos de dados:

- **Nós:** são representados por um identificador (ID) e a localização (Latitude e Longitude).
- **Caminhos/formas:** são representados por uma lista ordenada de nós, por exemplo, a depender do contexto, uma rua ou área.
- **Relações:** contém um número arbitrário de outras primitivas (incluindo outras relações) e podem ser utilizados para modelar estruturas mais complexas.

A Figura 3.5 ilustra o mapa da região da avenida Fernandes Lima sendo coletado na ferramenta OpenStreetMap, conforme Figura 3.5a e, posteriormente, sendo importado para o simulador de mobilidade urbana, conforme observado na Figura 3.5b.



Figura 3.5: Importação do Mapa Viário do OpenStreetMap para o SUMO.

3.3.2 Simulation of Urban Mobility (SUMO)

O Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) é uma plataforma de código aberto desenvolvido pelo Instituto de Sistemas de Transportes do Centro Aeroespacial Alemão (DLR) para realizar simulação de fluxo de tráfego microscópico. A plataforma de simulação possui ferramentas de suporte, principalmente para importação de rede e modelagem de demanda, tornando-se um mecanismo de apoio à investigação de uma grande variedade de tópicos de pesquisa, principalmente no contexto de gerenciamento de tráfego e comunicações veiculares (Krajzewicz et al., 2012; Behrisch et al., 2011; Lopez et al., 2018).

Segundo Feyh and Spohn (2018), o simulador disponibiliza diversas ferramentas que ajudam o pesquisador na integração, preparação e manipulação de mapas de regiões para simulação de tráfego de veículos, como citam os principais:

- **netconvert**: aplicativo de linha de comando para importação de mapas de outras fontes como, por exemplo: OpenStreetMap (OSM).
- **netedit**: editor gráfico das redes de tráfego do SUMO que possibilita edição do mapa ou a criação de um mapa sintético.
- **netgenerate**: aplicativo de linha de comando para geração de três tipos de mapas sintéticos (Grade, Teia de Aranha Circular e Aleatório).

Essa tecnologia de simulação suporta uma série de arquivos de entrada que buscam descrever os dados estáticos da topologia da área importada, bem como as combinações válidas de fases dos semáforos como, por exemplo: número de veículos, percursos, fluxo de tráfego e características do veículo (Lopez et al., 2018).

Em relação a captura de dados, Ferrer et al. (2019) afirmam que é possível utilizar simuladores de tráfego como o SUMO para representar uma malha viária e obter diversas medidas detalhadas de qualidade do tráfego, por exemplo: tempo de atraso, tempo de viagem, tempo de parada, velocidade média global e consumo de combustível, permitindo assim o estudo de cenários realistas de acordo com padrões de mobilidade das cidades do mundo real.

No simulador, uma viagem representa o deslocamento do veículo de um ponto a outro que é definido pelo percurso (partida/destino). Uma rota é uma jornada estendida, contendo não apenas a primeira e a última arestas (ruas), mas também todas as arestas pelas quais o veículo realizará o deslocamento. O SUMO processa as rotas que são armazenadas em um arquivo de demanda (.rou.xml), seja por meio de um gerador de rotas fornecido pelo próprio simulador, rotas existentes importadas de outro software ou manualmente. Existe ainda a opção de substituir ou editar informações do mapa ou ciclos de semáforos através da manipulação de arquivos adicionais (.add.xml) e o arquivo da rede gerada (.net.xml). E, por fim, é utilizado o algoritmo nativo do simulador, SUMO Cycle Program Generator (SCPG) (Garcia-Nieto et al., 2013).

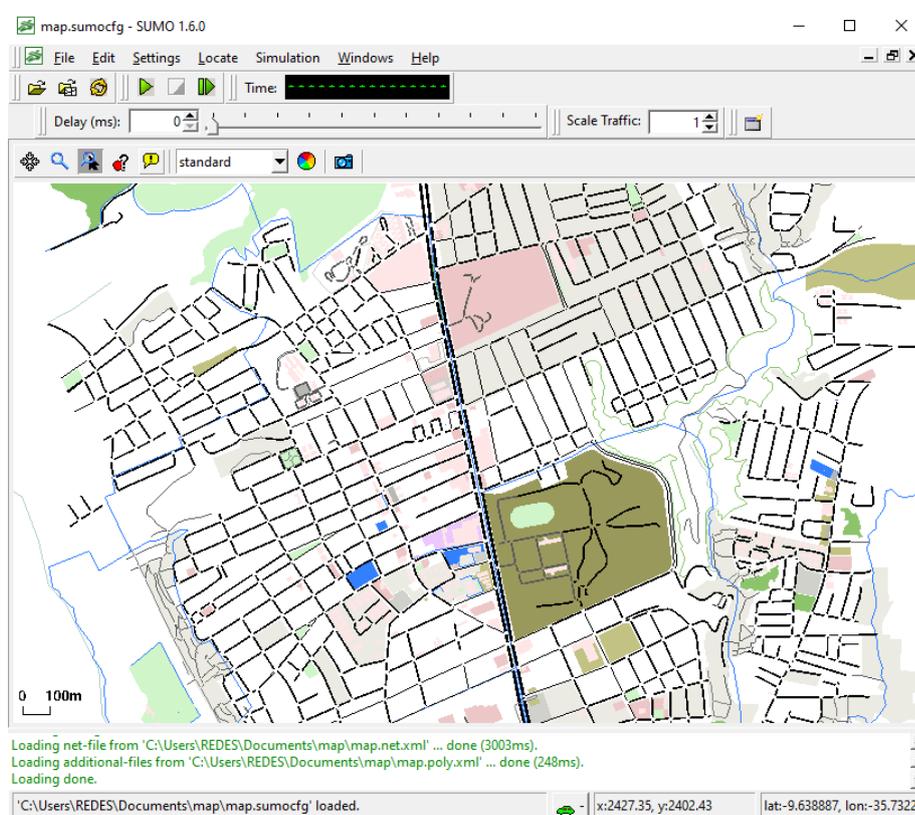


Figura 3.6: Tela do Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) com Dados Geométricos de Macaíó/AL.

Na Figura 3.6, é possível observar a ilustração do simulador SUMO, representando a tela onde os experimentos são simulados. Na imagem, pode-se observar uma região previamente importada através da ferramenta OpenStreetMap, compreendendo o cenário real e as vias por onde os veículos irão trafegar.

3.4 Contagem Volumétrica de Veículos

Em linhas gerais, a Contagem Volumétrica pode ser entendida como um método utilizado para coletar a quantidade de veículos em uma determinada região e espaço de tempo. Essa contagem é comumente utilizada para determinar o volume de tráfego de uma região (Feitosa, 2012).

De acordo com o Manual de Estudos de Tráfego disponibilizado pelo DNIT (2006), as contagens volumétricas podem ser classificadas de três formas:

- **Globais:** Registra o número de veículos que trafegam em um trecho pré-estabelecido e não leva em consideração o sentido. Essa forma de classificação é muito utilizada para calcular o volume diário de uma região.
- **Direcionais:** Registra o número de veículos levando em consideração o sentido do fluxo. Essa forma de classificação é muito utilizada para definição do ciclo semaforico.
- **Classificatórias:** Registra o número de veículos com base nos tipos ou classes de veículos, como carro, ônibus, caminhão, entre outros. Pode ser utilizada para sugerir um novo dimensionamento da pista e interseções.

Em relação aos métodos de contagem volumétricas, o mesmo manual de tráfego aponta a existência de 4 formas, conforme é possível observar:

- **Manuais:** Realizado por pesquisadores através de fichas e contadores manuais. Quando utilizada, o profissional busca adotar critérios classificatórios, como carros, ônibus e caminhões.
- **Automáticas:** Realizado por contadores automáticos onde os veículos são detectados através de dispositivos como tubos pneumáticos, sonoros, radar, fotoelétricas, entre outros.
- **Vídeo:** Realizado através de câmeras e sistemas de processamento de vídeo.
- **Observador Móvel:** Realizado para coleta do número de veículos em um determinado trecho de estudo utilizando um veículo-teste.

Dados de contagem volumétrica foram fundamentais para este projeto, visto que para realizar uma simulação de tráfego urbano próximo da realidade foi necessário inserir dados reais para obtenção de resultados consistentes.



Trabalhos Relacionados

Ferramentas de simulação de tráfego urbano, em ambiente computacional, podem ser utilizadas como um mecanismo de baixo custo visando alcançar uma abstração da realidade. Essa abstração permite o teste e a avaliação do comportamento de todos os pontos propostos de um projeto de melhoria sem comprometer os recursos ([Pegden et al., 1995](#)). Nesse sentido, nos últimos anos, esforços têm sido empreendidos para buscar a melhoria do tráfego de veículos nos centros urbanos. Vários pesquisadores tentam encontrar soluções otimizadas utilizando ferramentas de simulação para resolver problemas específicos de sua região. Muitas são as abordagens utilizadas:

- Na Argentina e Espanha, [Garcia-Nieto et al. \(2013\)](#) apresentaram uma abordagem de otimização de trânsito utilizando o simulador SUMO, na qual foram capazes de encontrar programas de ciclo de semáforos bem-sucedidos para cenários de duas grandes e heterogêneas áreas metropolitanas: Bahía Blanca na Argentina (estilo americano) e Málaga na Espanha (estilo europeu). Como resultado, apresentaram melhorias quantitativas referente ao número de veículos que chegam ao seu destino e o tempo total da viagem.
- Na França, [Panovski and Zaharia \(2016\)](#) abordaram a gestão do fluxo de tráfego em áreas urbanas de forma econômica através de modelos de simulação de tráfego, apresentando como solução um método de otimização de semáforos utilizando o SUMO. Como resultado, os autores obtiveram melhorias significativas em relação ao aumento do número de veículos que chegam ao seu destino final e redução do tempo médio de viagem.
- No Marrocos, [El Hatri and Boumhidi \(2016\)](#) desenvolveram um modelo de simulação de tráfego microscópico composto de uma rede com nove interseções semaforicas utilizando o SUMO. A justificativa para a escolha de um simulador foi a dificuldade em aplicar os estudos em um sistema de controle de tráfego real. No modelo proposto, os pesquisadores promoveram a ocorrência de incidentes na via para simular congestionamentos e desenvolveram um novo algoritmo que propõe a redução dos impactos no fluxo de tráfego.

- Na Índia, [Siddharth and Ramadurai \(2013\)](#) apresentaram um método para análise de sensibilidade e calibração automática de tráfego urbano utilizando o simulador VISSIM, no qual foram utilizados dados de uma interseção em Chennai, cidade que possui fluxos intensos em horários de pico. Como resultado, descobriram que ajustes nos parâmetros do simulador de tráfego são capazes de afetar o comportamento dos veículos em condições heterogêneas e obter ganhos no volume de veículos, bem como melhoria em outros indicadores de eficiência.
- Na Espanha, [Ferrer et al. \(2019\)](#) apresentaram um amplo estudo de caso na cidade de Málaga utilizando ferramentas de simulação onde o controle em tempo real não é possível. Para alimentar o ambiente de simulação construído com o SUMO, os pesquisadores obtiveram dados de sensores dispostos na via que continham o volume de tráfego de veículos. Os resultados apresentados foram a otimização global dos programas de semáforos alcançados através de algoritmos.
- No México, [Galvan-Correa et al. \(2020\)](#) utilizaram o SUMO para simular os efeitos da programação dos semáforos obtidos através do desenvolvimento de uma nova meta-heurística bioinspirada. O resultado obtido foi a otimização do fluxo veicular em uma região da Cidade do México.
- Na Irlanda, [Smith et al. \(2014\)](#) utilizaram o SUMO para avaliar o impacto de incidentes rodoviários aleatórios no tempo de viagem dos passageiros e no nível geral de congestionamento de tráfego em vários cenários. Em seguida, propuseram uma extensão de tráfego para permitir o reencaminhamento de veículos afim de contornar a estrada bloqueada devido a um incidente.
- No Brasil, [Silva et al. \(2020\)](#) utilizaram um ambiente de simulação para avaliar a velocidade média operacional do transporte coletivo proporcionado pela adoção da faixa exclusiva no corredor viário Fernandes Lima/Durval de Góes Monteiro na cidade de Maceió.

Como é possível observar, pesquisadores espalhados pelo globo estão utilizando ambiente de simulação de tráfego para compreender a situação do fluxo de veículos e propor soluções de melhoria. Dos estudos apresentados, o trabalho de [Silva et al. \(2020\)](#) é o que mais se assemelha à pesquisa aqui proposta uma vez que considera a avenida Fernandes Lima, na qual por meio de simulação avaliou os ganhos de desempenho dos ônibus proporcionados pela implantação da faixa azul. No entanto, o seu estudo foi limitado aos ganhos de velocidade e tempo de viagem, não disponibilizando o código. Além disso, não considerou na programação semafórica os dados de defasagem do ciclo, que é uma varável relacionada ao sincronismo dos semáforos. Entre as principais contribuições deste trabalho está a disponibilização de uma solução de simulação de tráfego urbano, mais precisa, de baixo custo e aberta, com dados atualizados da avenida Fernandes Lima, incluindo faixa azul, fluxos e programação semafórica

oficial com dados de defasagem, capaz de prover estimativas com erros menores que 5% para o volume dos veículos e 10% para o tempo médio de viagem. Além disso, a disponibilização de estudos de caso simulando 8 cenários com intervenções na via, nos quais foram possíveis obter ganhos quantitativos em relação ao aumento do volume de veículos, redução do tempo de viagem, tempo de espera em congestionamento, consumo de combustíveis e emissões de gás carbônico.

Estudo	Intervenção	Faixa Azul	Cenário Real	Sinalização Real	Código Aberto	Simulador
Garcia-Nieto et al. (2013)			✓	✓	✓	SUMO
Panovski and Zaharia (2016)				✓		SUMO
El Hatri and Boumhidi (2016)	✓					SUMO
Siddharth and Ramadurai (2013)			✓	✓		VISSIM
Ferrer et al. (2019)			✓	✓	✓	SUMO
Galvan-Correa et al. (2020)			✓	✓		SUMO
Smith et al. (2014)	✓					SUMO
Silva et al. (2020)		✓	✓			VISSIM
Modelo Proposto	✓	✓	✓	✓	✓	SUMO

Quadro 4.1: Comparativo dos trabalhos relacionados encontrados na literatura.

No Quadro 4.1 são comparados os trabalhos relacionados encontrados na literatura. A primeira coluna apresenta o estudo relacionado, a segunda demonstra se o estudo promoveu intervenções na via, como acidentes ou mudança de tráfego, a terceira demonstra se o estudo possui faixa exclusiva para transporte coletivo, a quarta demonstra se o cenário de simulação é validado e comparado com dados reais, a quinta demonstra se a sinalização utilizada foi real, a sexta demonstra se o código utilizado está disponível para outros pesquisadores e, por fim, a sétima coluna demonstra o tipo de simulador utilizado. Como é possível observar, a pesquisa proposta neste trabalho dispõe de estudos de caso contendo intervenção na avenida, faixa exclusiva para transporte público (faixa azul), cenário próximo da realidade, configuração com dados oficiais de sinalização semafórica, dispõe de código aberto e utiliza simulador de tráfego por meio do Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO).

5

Metodologia

Neste capítulo é demonstrada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos deste trabalho.

5.1 Metodologia de Pesquisa

Este estudo baseia-se em uma estratégia quantitativa de pesquisa, de caráter descritivo e natureza aplicada, por meio de um experimento simulado. A simulação será constituída a partir de estudos de caso para avaliar o desempenho de tráfego urbano compreendendo um cenário realista para o qual o controle em tempo real não é possível. Assim, neste ponto são demonstrados os procedimentos metodológicos do tipo de pesquisa utilizado, abordando os critérios para construção do universo de estudo, o método de coleta de dados, a forma de tratamento desses dados e, por fim, as limitações do método escolhido.

O presente trabalho está fundamentado na metodologia de um processo de simulação introduzida em [Banks \(1998\)](#). Na Figura 5.1, é demonstrado o fluxograma contendo o conjunto de etapas do processo de simulação que será seguido.

5.2 Formulação do Problema

O estudo teve início com a necessidade de construção de um ambiente de simulação de trânsito para situações em que não exista a possibilidade de controle em tempo real. Para demonstrar a usabilidade do modelo, foram promovidos três estudos considerando oito cenários diferentes: O primeiro estudo compara quatro cenários: atual (1), sem faixa azul (2), sem semáforos de pedestre (3) e sem faixa azul e semáforos de pedestre (4); o segundo estudo compara três cenários: atual (1), acidente trecho 1 (5) e acidente trecho 2 (6); e, por fim, o terceiro estudo compara mais três cenários: atual (1), semáforos com menos 5 segundos (7) e semáforos com mais 5 segundos (8). Estes cenários simulam possíveis intervenções na via, como a remoção

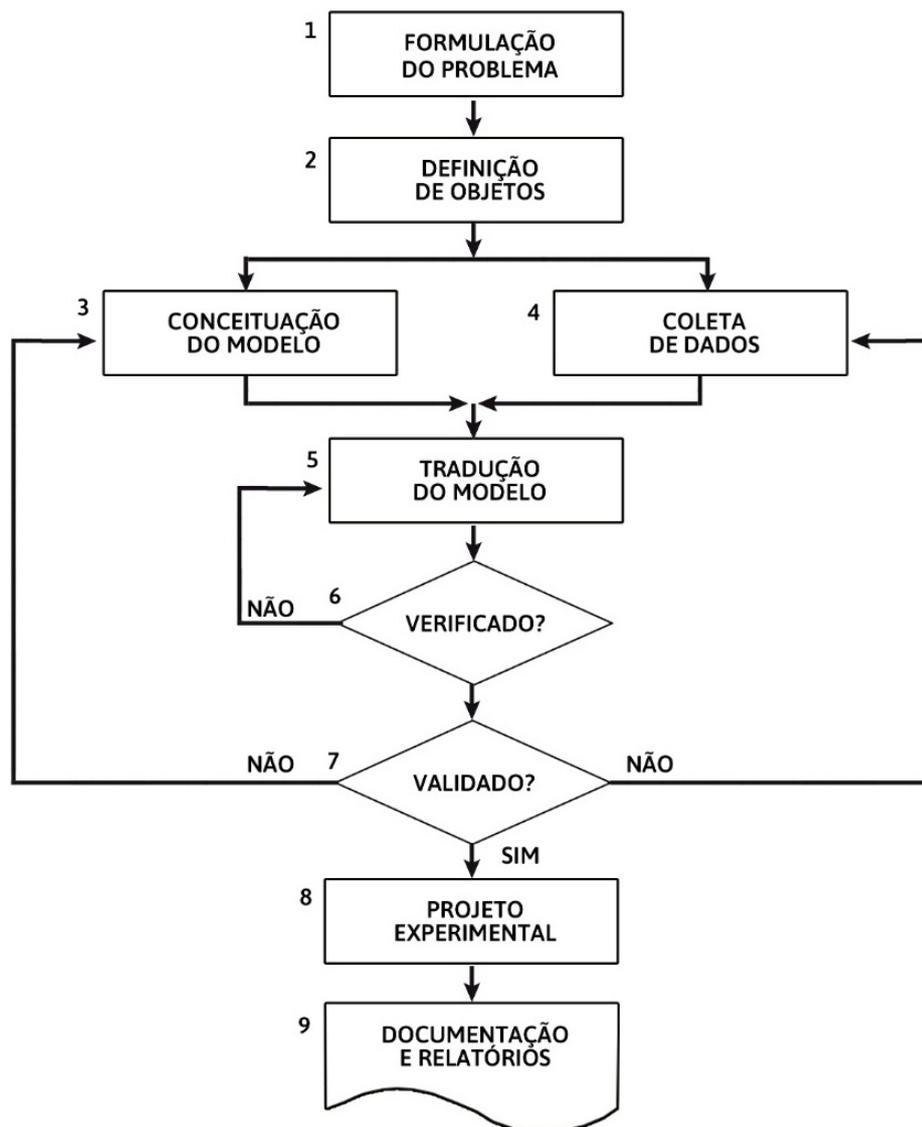


Figura 5.1: Fluxograma do Modelo de Simulação Dinâmica. Adaptado de Banks (1998).

de semáforos de pedestre e da faixa azul, bem como simulação de acidentes de trânsito e ajuste linear no tempo do ciclo semaforico.

5.3 Definição dos Objetivos e Conceituação do Modelo

Nesta etapa foi elaborado o plano geral do projeto contendo os objetivos que propõem um modelo de simulação de tráfego urbano próximo da realidade e a realização de intervenções na via, como a remoção dos semáforos de pedestre e faixa azul, simulação de acidentes e promoção de ajustes no tempo do ciclo semaforico, a fim de alcançar melhorias quantitativas em relação ao aumento do fluxo de veículos, redução do tempo de viagem, consumo de combustíveis e emissões de gás carbônico.

O sistema que conhecemos deve ser transformado em um modelo conceitual. Neste caso,

foi feita a importação do mapa com os dados geométricos da via a partir de dados abertos. Em seguida, o modelo foi delimitado de acordo com os objetivos do trabalho, resultando em cenário de tráfego urbano da avenida Fernandes Lima.

5.4 Coleta de Dados e Tradução do Modelo

O ambiente de simulação necessita de dados de entrada. Neste ponto é necessário entender quais são as variáveis de entrada suportadas pelo simulador de mobilidade urbana. Devido à dinamicidade de um ambiente de simulação de trânsito, Lopez et al. (2018) apontam que é necessário compreender rotas, velocidades, ciclo semafórico e quantidade de veículos que trafegam pela via para que a simulação esteja próxima da realidade. Nesse sentido, para dados de tráfego de veículos nas interseções semaforizadas, foi utilizada a contagem volumétrica presente em Silva et al. (2020). A programação semafórica foi disponibilizada através de solicitação formal feita à Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) da prefeitura de Maceió. Foram também coletados os dados de transporte público, horários e rotas das linhas de ônibus que transitam na avenida Fernandes Lima e vias transversais, através do website da SMTT¹ e, posteriormente, foram conferidos através do aplicativo web Moovit². Para estabelecer o local correto das paradas de ônibus foram realizadas pesquisa de campo, além de observações através do sistema Google Maps³. Dessa forma, o modelo conceitual se tornou operacional com a utilização do simulador de mobilidade urbana.

5.5 Verificação e Validação

A verificação proposta nesta etapa é realizada sobre o modelo operacional. No ambiente de simulação foram checados todos os sentidos de entrada e saída das vias, a posição dos semáforos, o ciclo semafórico, a disposição da faixa azul, a posição dos pontos de ônibus, as linhas de transporte público e a implantação da 4ª faixa nos pontos de parada de ônibus.

Entende-se por validação, a constatação que o modelo conceitual é uma representação precisa do sistema real. Nesse sentido, a métrica estabelecida para validar o modelo corresponde ao tempo médio de viagem dos veículos (modal ônibus e carros) em toda a avenida Fernandes Lima no sentido Tabuleiro-Centro. Para isso, foi utilizado o indicador estatístico erro relativo, no qual foi assumida uma taxa mínima aceitável de 10%. Os dados foram comparados com estudos anteriormente realizados por Silva et al. (2020), pois não há conhecimento da existência de

¹Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito - Dados de Itinerários e Horário dos ônibus. Link: <https://transportes.smtt.maceio.al.gov.br>

²Aplicativo de mobilidade urbana com foco em informações de transporte público e de navegação. Link: https://moovitapp.com/index/pt-br/transporte_p%C3%BAblico-Maceio-4466

³Serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite da terra. Link: <https://maps.google.com>

outro disponível na literatura. Em relação à programação semafórica, uma pesquisa de campo foi realizada para validar os tempos dos sinais disponibilizados.

5.6 Projeto Experimental, Documentação e Relatórios

Nesta etapa, foi definida a duração da simulação, número de execuções e a forma de inicialização. O período de simulação definido foi de 1 hora e 30 minutos. No entanto, foram descartados os primeiro 15 minutos que são utilizados para iniciar o ambiente e os últimos 15 minutos que é o período em que a via é desafogada. Foi definido ainda o total de execução de 30 simulações para cada cenário proposto, utilizando sementes distintas onde os comportamentos dos veículos são aleatórios. Por fim, foi concluída a metodologia com a elaboração da documentação das ações realizadas no desenvolvimento do trabalho e a emissão de relatórios.

6

Modelo Proposto

Neste capítulo são demonstrados os passos realizados para construção do ambiente de simulação de tráfego urbano proposto.

6.1 Simulação de Tráfego Urbano

Esta etapa descreve os passos realizados para construção do ambiente de simulação de tráfego urbano. O estudo iniciou com a definição da topologia e geometria da rede que compreende a avenida Fernandes Lima, que possui predominantemente três faixas de rolamento nos dois sentidos (Tabuleiro-Centro e Centro-Tabuleiro). A avenida conta ainda com uma quarta faixa lateral em alguns pontos com destinação à parada de transporte coletivo (Silva et al., 2020). Dentre outras peculiaridades encontradas, a via possui uma faixa exclusiva para o transporte coletivo (faixa azul), localizada na lateral direita em toda a sua extensão, possui 13 semáforos, sendo 3 semáforos de pedestre.

Os dados do ciclo semafórico da avenida Fernandes Lima foram obtidos através da Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) da prefeitura de Maceió. Após a análise dos dados, foi constatado que a avenida Fernandes Lima possui quatro programas semafóricos distintos em toda sua extensão: O primeiro está configurado para operar das 04h30 às 14h59 (Manhã), o segundo das 14h30 às 22h59 (Tarde), o terceiro das 23h às 00h59 (Noite) e, o último, das 01h00 às 04h29 (Madrugada). Neste estudo, foi utilizado o programa semafórico que abrange o horário da manhã por apresentar horário de pico no sentido Tabuleiro-Centro. Desta forma, o ambiente de simulação proposto pode ser utilizado para estudos que compreendam a simulação de tráfego urbano no horário das 04h30 às 14h59 devido à configuração da programação semafórica.

A Figura 6.1 demonstra o SUMO executando uma simulação no cenário da avenida Fernandes Lima. Na imagem é possível notar o fluxo de veículos distintos, como Carros (branco),

Táxis (amarelo), Ônibus (vermelho) e Caminhões (azul). Além de detectores (amarelos) que foram utilizados para coletar os resultados volumétricos do tráfego de veículos nas interseções semafóricas.

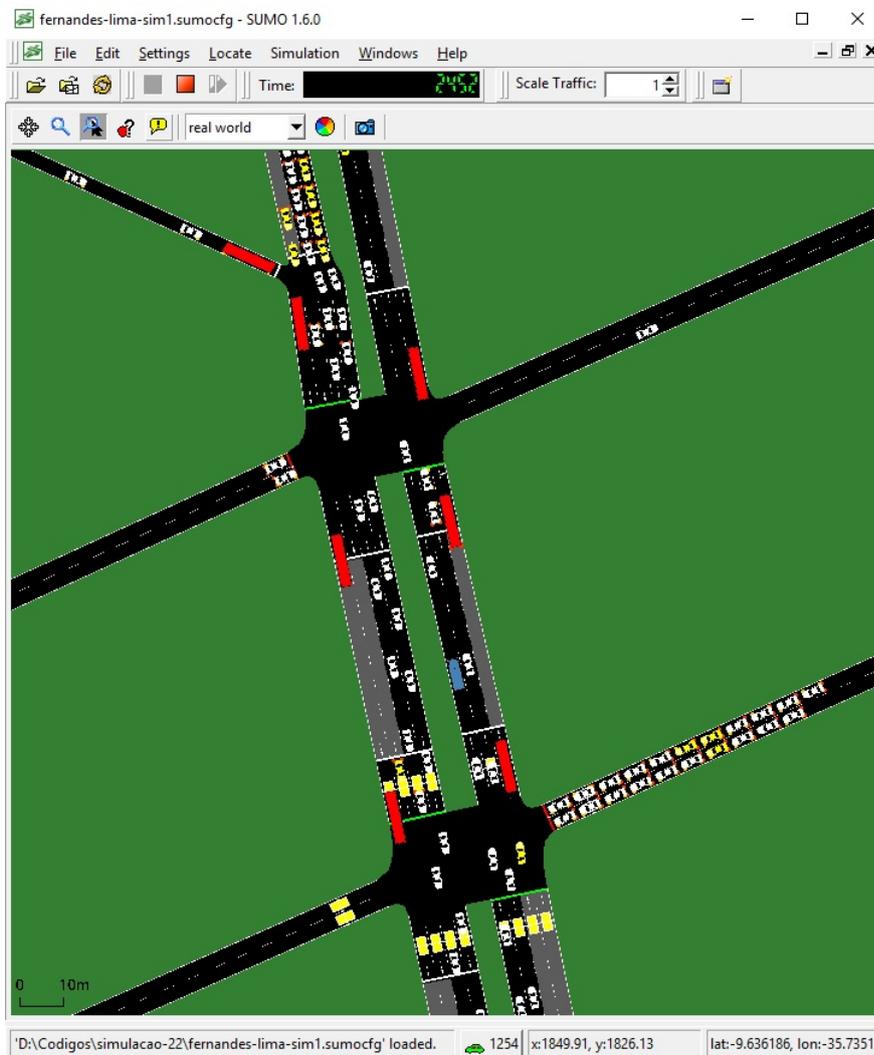


Figura 6.1: Representação do Simulador de Mobilidade Urbana SUMO de um trecho da Av. Fernandes Lima.

A Figura 6.2 apresenta o ciclo semafórico da interseção Av Fernandes Lima x Av Rotary compreendendo o programa semafórico do horário da manhã. O ciclo dessa interseção é de 170 segundos, sendo 90 segundos para a Fase 1, que concede o direito de passagem para os veículos que estão trafegando na avenida Fernandes Lima, 5 segundos, que corresponde ao tempo de Entreverdes (amarelo + vermelho), 70 segundos para a Fase 2, que corresponde ao direito de passagem para os veículos que estão na avenida Rotary e, por fim, temos mais 5 segundos de Entreverdes, completando o ciclo. O tempo de defasagem (*offset*) dessa interseção é de 7 segundos, que representa o tempo utilizado para sincronizar os dados da programação semafórica com o semáforo subsequente.

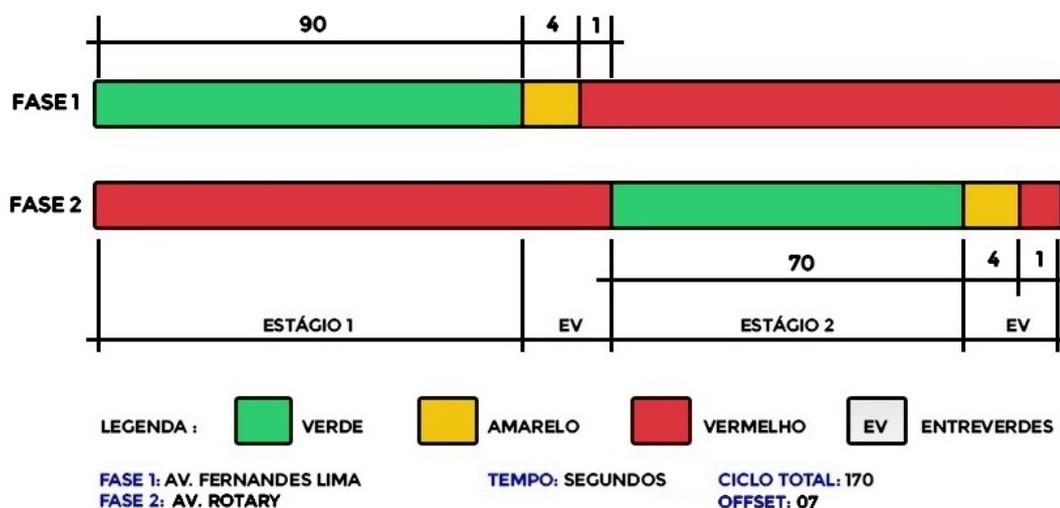


Figura 6.2: Diagrama de Intervalos Luminosos do Ciclo Semafórico da Interseção Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary em operação das 4h30 às 14h59.

6.2 Definição do Corredor Viário

A avenida Fernandes Lima foi definida como corredor viário para este trabalho devido a sua importância para a cidade de Maceió. É uma via que possui aproximadamente 4,6 quilômetros de extensão, interligando a parte alta a parte baixa da cidade, na qual milhares de pessoas transitam para realizar suas atividades cotidianas.

O primeiro passo para criação do ambiente de simulação foi delimitar a área de interesse de estudo na ferramenta *OpenStreetMap*. Assim, foi selecionado o trecho que compreende a avenida Fernandes Lima que tem início logo após a Praça Centenário e percorre até a interseção com a rua Camaragibe, cuja referência principal é a Faculdade da Cidade de Maceió (FACIMA). Ao exportar o mapa da Fernandes Lima, os dados ainda não são compreendidos pelo Simulador de Mobilidade Urbana SUMO. Então, foi preciso executar um comando de conversão para a plataforma do SUMO. Em seguida, feito todo o procedimento de importação, foi necessário corrigir todas as inconsistências detectadas, como sinais duplicados, interseções sem sinais, vias com o sentido de entrada e saída opostos e número de faixas inadequados.

Na Figura 6.3 são demonstradas as localizações dos semáforos presentes na avenida Fernandes Lima. Ao todo, a via possui 13 semáforos, sendo 10 nas interseções e 3 de pedestre. O primeiro semáforo está localizado na interseção com a rua Camaragibe, o segundo está localizado no retorno da Faculdade da Cidade de Maceió/FACIMA. Como esses dois primeiros semáforos estão muito próximos, possuem a mesma configuração de ciclo semafórico e estão inseridos no mesmo plano semafórico, estando sincronizados. O terceiro semáforo está localizado no retorno do supermercado Big Bompreço, o quarto semáforo está localizado na interseção com a rua Abelardo Pontes Lima. Da mesma forma que os dois primeiros semáforos, o terceiro e o quarto estão muito próximos, possuem o mesmo ciclo e estão inseridos no mesmo plano semafórico. O quinto semáforo está localizado em frente ao prédio da empresa Equatorial



Figura 6.3: Semáforos presentes na avenida Fernandes Lima.

Energia e é destinado aos pedestres, o sexto semáforo está localizado em frente ao Hospital Veredas, igualmente destinado aos pedestres, o sétimo semáforo está localizado na interseção com a avenida Tereza de Azevedo, o oitavo semáforo está localizado na interseção com a avenida Rotary. O sexto, sétimo e oitavo semáforos possuem ciclo semaforico diferentes, mesmo estando relativamente próximos, no entanto, são sincronizados pelo mesmo plano semaforico. O nono semáforo está localizado na interseção com a rua Coronel Lima Rocha, o décimo semáforo está localizado na interseção com a rua Miguel Palmeira. Os semáforos nono e décimo possuem o mesmo ciclo semaforico devido a sua proximidade e estão configurados no mesmo plano semaforico. O décimo primeiro semáforo é de pedestre e está localizado em frente ao supermercado Bompreço Farol. O décimo segundo semáforo está localizado na interseção com a rua Professor Guedes de Miranda e, por último, o décimo terceiro semáforo está localizado na interseção com a rua Desembargador Tenório. Esses dois últimos estão configurados com o mesmo ciclo semaforico devido a sua proximidade. O décimo primeiro, décimo segundo e décimo terceiro semáforos estão inseridos no mesmo plano semaforico.

6.3 Coleta e Tratamento dos Dados Geométricos

Para realizar a simulação de tráfego de veículos em uma cidade é necessário conhecer de forma preliminar os dados do ambiente de simulação. Dessa forma, deve-se dispor de dados da rede, como por exemplo: topologia da área de tráfego, bem como dados referentes a quantidade e localização dos semáforos (Lopez et al., 2018).

Nesse sentido, dentre as peculiaridades da avenida Fernandes Lima, observou-se que a avenida é dividida por um canteiro central com aproximadamente oito metros de largura, contendo árvores e uma ciclovia prevista para inaugurar em 2022. A via delimitada possui três faixas de rolamento nos dois sentidos (Tabuleiro-Centro e Centro-Tabuleiro). No entanto, existe uma quarta faixa lateral em alguns pontos da avenida com destinação à parada de transporte coletivo (Silva et al., 2020).

Para coletar os dados da topologia da região e alimentar o ambiente de simulação de tráfego foi utilizada a ferramenta OpenStreetMap.org que é uma base de dados geográfica aberta mantida por voluntários presentes no mundo todo. A plataforma permitiu a exportação do mapa digital com dados geográficos precisos e informações de semáforos do trecho selecionado que puderam ser importados utilizando scripts nativos do Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) (Neis et al., 2012; Garcia-Nieto et al., 2013).

Após a importação dos dados geométricos para o ambiente de simulação, foi utilizada a ferramenta Netedit para edição, por meio do qual foi possível configurar o sentido do fluxo dos veículos nas faixas da via (entrada e saída), a implantação da faixa azul, faixas de rolamento, dados semaforicos, entre outros recursos para deixar o modelo próximo da realidade. Outro serviço importante utilizado para observação do sentido do fluxo dos veículos foi o Google Maps, por meio do qual permitiu a navegação por imagens, sem necessidade de deslocamento físico, contribuindo para ter uma orientação acertada dos pontos de parada de transporte público.

6.4 Coleta e Tratamento dos Dados de Tráfego Urbano

Concluído o processo de modelagem proveniente dos dados geométricos, é iniciada a etapa da coleta de dados de tráfego. Neste ponto é necessário entender quais são as variáveis de entrada suportadas pelo simulador de mobilidade urbana. O ambiente de simulação de tráfego proposto para Maceió tem suas peculiaridades, a maior delas é a implantação da faixa exclusiva para o transporte público. Para atender esse requisito, foi adicionado em toda a via a configuração para permitir apenas o tráfego de ônibus e Táxi nas faixas exclusivas.

Devido à dinamicidade de um ambiente de simulação de trânsito, Lopez et al. (2018) apontam que é necessário compreender a quantidade de veículos, rotas, velocidades e ciclo semaforico que trafegam pela via para que a simulação esteja próxima da realidade. Nesse sentido, em relação ao volume dos veículos que trafegam na avenida Fernandes Lima, Silva et al. (2020) realizaram a contagem volumétrica classificada a partir de filmagens gravadas em dias úteis do

mês de novembro de 2019, no qual registrou o volume de tráfego de veículos no horário das 6h45 às 7h45. Como resultado, identificou que há um certo balanceamento no volume de veículos que entram e que saem da avenida, sendo que as vias transversais semaforizadas apresentam elevado fluxo, fato que esclarece a estabilidade observada. Assim, este estudo utiliza os dados volumétricos disponibilizados no modelo de simulação.

Em relação à programação semaforizada, os dados foram obtidos através do órgão regulador que é a Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) da prefeitura de Maceió. Após o recebimento dos dados foi feita ainda uma pesquisa de campo para validar se os ciclos semaforizados disponibilizados eram coerentes com os encontrados em operação na via. O único ponto que deve ser salientado é que os três semáforos de pedestre existentes na avenida não alteravam o tempo do ciclo, mesmo após o pressionamento do botão de acionamento (botoeira), dando a impressão que o acionamento não estava funcionando adequadamente.

Em relação à configuração do sentido fluxo dos veículos na avenida Fernandes Lima, ao realizar a importação do mapa viário do OpenStreetMap para o Simulador de Mobilidade Urbana, foi necessário analisar o sentido do fluxo de tráfego de entrada e saída dos veículos em todas as ruas e interseções semaforizadas. A ferramenta utilizada para realizar os ajustes no sentido do fluxo no mapa foi a NetEdit, que é um editor gráfico de mapas do SUMO. Na Figura 6.4, pode-se observar o fluxo dos veículos configurados no Simulador de Mobilidade Urbana SUMO. A Figura 6.4a ilustra o software de edição do mapa, NetEdit. Já a Figura 6.4b ilustra o Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) em processo de execução. Para entender o sentido do fluxo de entrada e saída das vias da avenida Fernandes Lima foi necessário realizar observações por imagem através da ferramenta Google Maps.

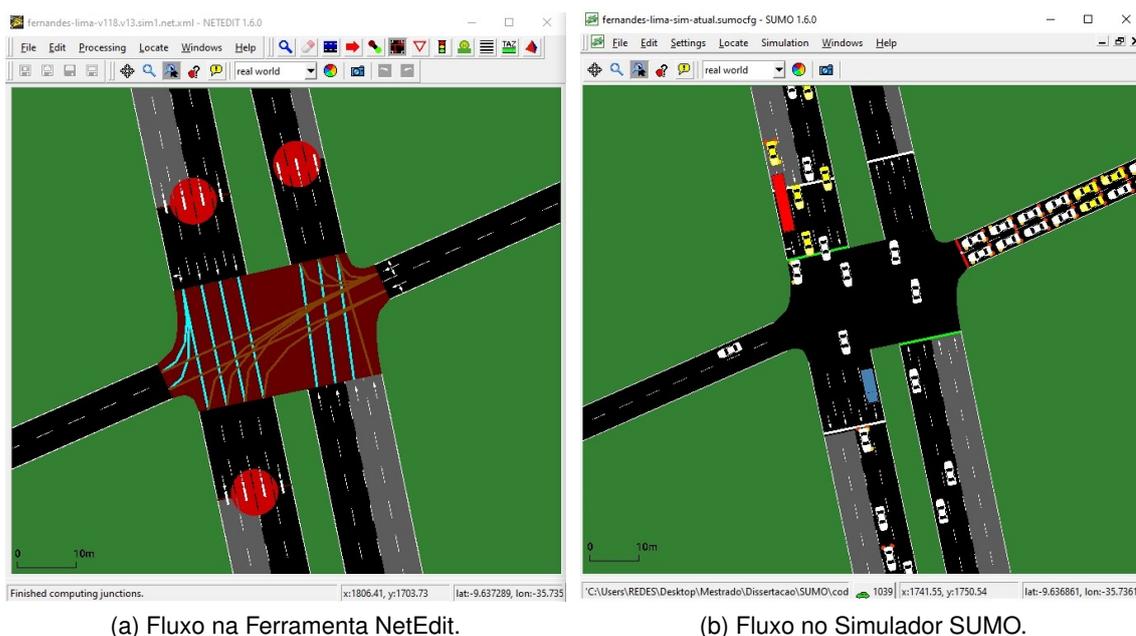


Figura 6.4: Demonstração da configuração do fluxo dos veículos no ambiente de simulação.

Em relação aos dados de transporte público, foram coletados os horários de partida e rotas das linhas dos ônibus que transitam na avenida Fernandes Lima através do website da Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) e, em seguida, conferidos através do aplicativo web Moovit. Para estabelecer o local correto das paradas de ônibus foi realizada uma pesquisa de campo, além de observações através do sistema Google Maps.

Pontos de Ônibus

Outro tópico importante que deve ser destacado é a inserção dos pontos de ônibus no simulador. Como o tamanho padrão do ônibus é 12 metros de comprimento, para cada ponto foi necessário configurar mais 2 metros de margem de segurança para que houvessem mais de um local de parada. Esse fato ocorre em pontos de ônibus próximos de locais que apresentam grande número de pessoas, como no Centro de Pesquisas Aplicadas (CEPA), local que possui mais de um abrigo, que é a estrutura física presente no ponto de ônibus.

A quantidade de abrigo dos locais de parada de ônibus, foi a métrica utilizada para determinar quantos ônibus podem efetuar a parada. No caso, o ponto do CEPA possui três abrigos. Então, a quantidade de paradas simultâneas configuradas foram três. Dessa forma, o tamanho destinado a parada de ônibus na via configurado foi de 42 metros, sendo 36 metros referentes ao tamanho dos ônibus e 6 metros de margem de segurança, 2 metros para cada ônibus. A Figura 6.5 demonstra a configuração ponto de ônibus do CEPA. A Figura 6.5a ilustra o ponto de ônibus no programa nativo de configuração NetEdit. E, a Figura 6.5b ilustra o Simulador de mobilidade Urbana (SUMO) em execução, na qual é possível observar a presença de 4 ônibus vermelhos realizando a parada no espaço destinado ao ponto de ônibus.

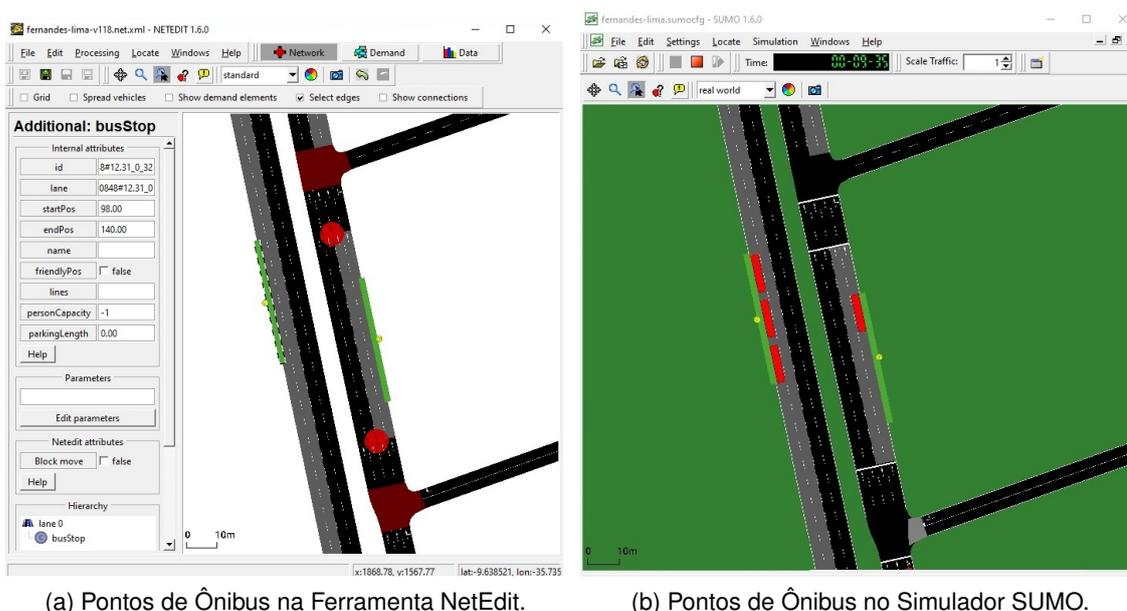


Figura 6.5: Demonstração da configuração de ponto de ônibus no ambiente de simulação.

7

Resultados Experimentais

Neste capítulo são demonstrados os resultados dos experimentos computacionais realizados. Na Seção 7.1 é descrita a infraestrutura computacional e viária, na qual os experimentos foram executados, na Seção 7.2 estão os passos realizados para efetuar a calibração do modelo, na Seção 7.3 estão os passos realizados para validação do modelo e, por último, na Seção 7.4, estão os estudos de diferentes cenários nos quais foram realizadas intervenções na avenida Fernandes Lima, como a remoção da faixa azul e dos semáforos de pedestre, simulação de acidentes e ajuste no tempo do ciclo semafórico.

7.1 Infraestrutura Computacional e Viária

Para execução do Simulador de Mobilidade Urbana e seus programas nativos de configuração foi necessário contar com os seguintes componentes de hardware e software para implementação dos experimentos:

- **Computador:** Notebook
- **Processador:** *Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30GHz 2.40 GHz*
- **Sistema Operacional:** Microsoft Windows 10 Pro 64 Bits
- **Memória:** 8 GB
- **Tempo de Execução da Simulação:** 90 minutos.

Dados do cenário da avenida Fernandes Lima coletados a partir de observações do OpenStreetMap e de observações realizadas por imagens através do Google Maps:

- **Interseções:** 10

- **Semáforos:** 13
- **Faixa de Pedestres com semáforos:** 3
- **Quantidade de vias transversais:**
 - Sentido Centro-Tabuleiro: 27
 - Sentido Tabuleiro-Centro: 29
- **Quantidade de Pontos de Ônibus:**
 - Sentido Centro-Tabuleiro: 10
 - Sentido Tabuleiro-Centro: 9

7.2 Calibração do Modelo

A etapa de calibração possui a finalidade de deixar o modelo de simulação com valores próximos aos encontrados no mundo real. Nesse ponto, três variáveis foram configuradas com o objetivo de realizar a calibração volumétrica dos veículos nas interseções semaforicas, são elas: *carFollowModel*, *minGap* e *speedFactor*.

A primeira corresponde ao modelo comportamental do motorista (*carFollowModel*), na qual foram testados dois modelos: Krauss e Wiedemann. O modelo que obteve melhores resultados volumétricos foi o Krauss, que é o padrão do SUMO. O modelo Wiedemann, utilizado por [Silva et al. \(2020\)](#), apresentou performance abaixo do esperado, com expressiva redução do volume de tráfego de veículos transitando nas interseções semaforicas. Por isso, foi utilizado neste trabalho o modelo comportamental Krauss.

A segunda variável comportamental configurada foi a *minGap* que corresponde ao espaçamento mínimo, em metros, de um veículo para outro quando para na via, sendo também o valor que precisa ser alcançado após a manobra de frenagem. Os valores padronizados pelo SUMO para carros, ônibus e caminhões são, respectivamente, 2m, 2.5m e 2.5m. Entretanto, para alcançar resultados próximos à realidade, após vários testes, os valores foram ajustados para, respectivamente, 1.25m, 2.3m e 2.3m.

A terceira e última variável configurada corresponde ao fator de velocidade (*speedFactor*). Essa variável permite que o veículo ultrapasse a velocidade máxima estipulada na via em uma taxa percentual. Em toda a extensão da avenida Fernandes Lima, a velocidade máxima permitida é de 60 quilômetros por hora. No entanto, frequentemente, essa velocidade não é respeitada pelos motoristas. Nesse sentido, para calibrar o modelo e encontrar valores próximos aos observados na via, foi estabelecido o valor de 1.20, possibilitando assim que o veículo ultrapasse em até 20% o valor máximo permitido, ou seja, 72 quilômetros por hora. Com isso, por ser uma via tipicamente congestionada, o valor proposto é coerente para que o veículo alcance picos de aceleração e ultrapassagem, como ocorre na realidade. Assim, é finalizada a etapa de

calibração, promovida de forma manual, utilizando o método de resolução de problemas onde múltiplas tentativas são feitas para alcançar a uma solução aceitável.

A Figura 7.1 destaca as interseções semaforizadas utilizadas como parâmetro para calibrar o modelo de simulação. A primeira interseção está situada na rua Camaragibe (FACIMA), a segunda na Rua Dr Aberlardo Pontes de Lima, a terceira na Rua Tereza de Azevedo, a quarta na avenida Rotary, a quinta na rua Miguel Palmeira e, por último, a sexta interseção está situada na Rua Desembargador Tenório. Essas interseções englobam a programação semaforizada da avenida Fernandes Lima que possui 13 semáforos distribuídos. Alguns semáforos possuem a mesma configuração por estarem muito próximos. Por exemplo, o semáforo presente na Rua Desembargador Tenório possui a mesma programação do semáforo que está alocado na Rua Guedes de Miranda.



Figura 7.1: Interseções Semaforizadas Utilizadas para Calibração do Modelo.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados do experimento de calibração volumétrica dos veículos nas interseções semaforizadas no sentido Tabuleiro-Centro. A primeira coluna representa a interseção semaforizada, a segunda demonstra o volume de tráfego de veículos simulado pelo modelo proposto, a terceira demonstra o volume de tráfego de veículos observado através de pesquisa de campo realizada por [Silva et al. \(2020\)](#), a quarta demonstra a diferença entre o valor observado e o simulado pelo modelo proposto, a quinta revela o erro relativo alcançado

pelo modelo proposto, a sexta revela o erro relativo alcançado por [Silva et al. \(2020\)](#) e a sétima coluna apresenta o Intervalo de Confiança de 95% referente ao volume de tráfego de veículos simulado da segunda coluna.

Tabela 7.1: Calibração volumétrica do tráfego de veículos nas interseções semaforizadas sentido Tabuleiro-Centro das 06h45 às 7h45.

INTERSEÇÕES FERNANDES LIMA	VOLUME DO TRÁFEGO / HORA			ERRO RELATIVO	ERRO RELATIVO (Silva et al., 2020)	INTERVALO DE CONFIANÇA 95%
	SIMULADO	OBSERVADO (Silva et al., 2020)	DIFERENÇA			
1 Rua Camaragibe (FACIMA)	2455	2473	-18	0,7%	16,9%	(2433 - 2477)
2 Rua Dr. Abelardo Pontes Lima	2353	2439	-86	3,5%	-	(2327 - 2379)
3 Rua Tereza de Azevedo	1908	1939	-31	1,6%	-	(1882 - 1934)
4 Avenida Rotary	2968	2956	12	0,4%	10,5%	(2936 - 3000)
5 Rua Miguel Palmeira	2825	2804	21	0,8%	3,2%	(2790 - 2860)
6 Rua Desembargador Tenório	2892	2830	62	2,2%	4,6%	(2869 - 2915)
TOTAL	15401	15441	-40	1,5%	8,8%	-

Para esse experimento foram executadas 30 simulações usando sementes distintas, e os resultados da Tabela 7.1 são as médias dessas simulações. O indicador estatístico Erro Relativo foi aplicado para comparar os dados referentes ao volume de veículos, observados no mundo real, que trafegam nas interseções semaforizadas. A margem de erro mínima aceitável definida para o indicador foi de 5%, tanto para mais quanto para menos, para que o modelo de simulação seja mais preciso em comparação ao encontrado na literatura. O volume de tráfego de veículos observado no mundo real corresponde ao horário das 6h45 às 7h45 por apresentar a um acentuado tráfego no sentido estudado e por haver estudo disponível na literatura.

Em síntese, os valores calibrados conseguiram resultados bastantes expressivos em comparação aos encontrados por [Silva et al. \(2020\)](#). Após alcançar a média proveniente das simulações, o erro relativo proporcionado por este estudo foi de apenas 1,5% ante 8,8% de estudos anteriores. Comparando o intervalo de confiança de 95% do volume de tráfego de veículos simulado com o observado é possível compreender que esses valores estão dentro da margem de erro estabelecida. Outro ponto importante que deve ser destacado é que [Silva et al. \(2020\)](#) não considerou o fluxo das interseções 2 e 3, que possuem juntas um volume relevante de tráfego de veículos acessando à avenida Fernandes Lima.

7.3 Validação do Modelo

Em seguida, foi realizada a etapa de validação do modelo estabelecendo a métrica do tempo médio de viagem dos veículos que percorrem toda a avenida Fernandes Lima no sentido Tabuleiro-Centro. O modelo foi executado 30 vezes utilizando sementes diferentes para obtenção de comportamentos aleatórios. O período de simulação foi de 1 hora e 30 minutos. No entanto, foram descartados os primeiros 15 minutos que foram utilizados para estressar o ambiente, bem como os últimos 15 minutos que é o período em que a via é desafogada. Desse modo, foi utilizado o indicador estatístico erro relativo assumindo o valor equivalente a 10% de

taxa de erro aceitável para validar o modelo. Assim, os resultados da Tabela 7.2 apresentam a média das 30 repetições realizadas.

Tabela 7.2: Validação por tempo médio harmônico de viagem em todo o percurso da avenida Fernandes Lima no sentido Tabuleiro-Centro.

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM TOTAL (min)	SIMULADO	OBSERVADO (Silva et al., 2020)	ERRO RELATIVO	INTERVALO DE CONFIANÇA 95%
CARRO	18,75	20,60	9,87%	(18,50 - 19,00)
ÔNIBUS	16,11	15,90	1,32%	(15,94 - 16,28)

A Tabela 7.2 compara o tempo médio harmônico de viagem dos veículos para o modal carro e ônibus em todo o percurso da avenida Fernandes Lima. A primeira coluna apresenta o tipo de veículo, a segunda coluna o tempo médio de viagem obtido pelo modelo de simulação proposto, a terceira coluna o tempo médio de viagem observado por Silva et al. (2020), a quarta coluna a taxa de erro relativo e a quinta coluna apresenta o Intervalo de Confiança de 95% do tempo médio de viagem total simulado pelo modelo proposto. Em síntese, a tabela compara os resultados obtidos pelo modelo proposto com os dados observados através de pesquisa de campo por Silva et al. (2020), no qual utilizou o transporte público e um carro particular para cronometrar o tempo e obter uma média em dois dias de observação no horário de 6h45 e 7h15. Em relação ao modal Carro, o tempo médio de viagem encontrado foi de 20,6 minutos, enquanto o modal Ônibus foi de 15,90 minutos. A simulação realizada neste trabalho apresentou resultado de 18,75 minutos para o modal Carro, atendendo a margem proposta com erro relativo de 9,87%. Já para o modal ônibus, o tempo médio harmônico de viagem foi de 16,11 minutos, atendendo a margem proposta com erro relativo de apenas 1,32%, bem próximo da realidade. Assim como no processo de calibração, foi também utilizado o método estatístico Intervalo de Confiança de 95% para conhecer a amplitude do valor com probabilidade de conter o tempo médio de viagem total real simulado. Assim, comparando o intervalo de confiança do tempo médio de viagem total simulado com o observado é possível compreender que esses valores estão dentro da margem de erro estabelecida.

7.4 Estudos de Caso

Nesta etapa, foram promovidas intervenções em um cenário de simulação da avenida Fernandes Lima, a fim de estudar o comportamento do fluxo do tráfego dos veículos, tempo de viagem, tempo de espera em congestionamento, consumo de combustível e emissões de gás carbônico. Ao todo foram simulados 8 cenários, que foram escolhidos para demonstrar que é possível realizar diversas intervenções no modelo de simulação para avaliar o desempenho do tráfego urbano e, para cada cenário, foram realizadas 30 execuções. Para realizar essas execuções de forma automática foi utilizada a linguagem de programação python para criação dos scripts devido à compatibilidade com o Simulador de Mobilidade Urbana.

O primeiro cenário corresponde ao cenário atual. Trata-se de um ambiente que busca proximidade com o que é encontrado no mundo real. Assim, os cenários seguintes utilizam o cenário atual como base para realização de intervenções. O segundo cenário busca entender o comportamento da avenida Fernandes Lima com a remoção da restrição da faixa exclusiva para o transporte coletivo. O terceiro cenário promove a remoção dos três semáforos de pedestre presentes na via. O quarto cenário promove a remoção da restrição da faixa exclusiva para o transporte coletivo e também dos três semáforos de pedestre. O quinto e sexto cenários promovem incidentes em dois trechos da avenida com a finalidade de interromper o fluxo de tráfego dos veículos em uma das três faixas de rolamento e, por fim, o sétimo e oitavo cenários promovem ajustes no tempo de sinal no ciclo semaforico de toda a avenida, uma oscilação de 5 segundos para o cenário atual.

Para efetuar a contagem volumétrica do tráfego de veículos de todos os cenários foram adicionados detectores nas seguintes interseções: Rua Camaragibe, Rua Dr Abelardo Pontes Lima, Rua Tereza de Azevedo, Avenida Rotary, Rua Miguel Palmeira e Rua Desembargador Tenório. Os resultados gerados em todos os cenários correspondem ao volume de tráfego de veículos referente apenas ao sentido Tabuleiro-Centro devido à falta de dados volumétricos do sentido Centro-Tabuleiro disponíveis na literatura, bem como da falta de recursos tecnológicos e humanos para auferir a contagem volumétrica e demais indicadores.

7.4.1 Cenários 1, 2, 3 e 4 - Simulação de Remoção de Faixa Azul e Semáforos de Pedestre

Neste ponto são comparados 4 cenários de simulação de tráfego urbano, são eles: Atual (1), Sem Faixa Azul (2), Sem Semáforos de Pedestre (3) e Sem Faixa Azul e Semáforos de Pedestre (4). Os cenários hipotéticos foram simulados com o objetivo de conhecer os ganhos volumétricos de tráfego de veículos que passam pelas interseções semaforizadas, bem como os indicadores de desempenho (tempo de viagem, tempo de espera, consumo de combustíveis e emissão de gás carbônico) dos veículos que trafegam na avenida Fernandes Lima.

O Cenário 1 (Atual) é a representação do que ocorre nos dias atuais na avenida Fernandes Lima, que conta com 13 semáforos, sendo três de pedestres e a delimitação da faixa azul, que é um espaço exclusivo para o transporte coletivo. Este é o cenário que serviu como base para criação dos demais cenários hipotéticos de simulação de tráfego urbano propostos neste trabalho, no intuito de implementar possíveis intervenções na via. Dessa forma, todos os cenários propostos são comparados ao cenário atual.

O Cenário 2 (Sem Faixa Azul) promove a remoção da faixa exclusiva para o transporte coletivo a fim de comparar os dados coletados com os demais cenários hipotéticos propostos. A Figura 7.2 demonstra um trecho da avenida Fernandes Lima correspondente aos cenários 1 (Atual) e 2 (Sem Faixa Azul), no qual é possível observar a remoção da faixa exclusiva para o transporte público. No Cenário 1, Figura 7.2a, a faixa exclusiva para o transporte coletivo

é representada pela cor cinza, padrão do simulador SUMO. Nessa faixa exclusiva, os únicos veículos que podem trafegar são os ônibus e táxis, salvo quando os demais veículos forem efetuar a entrada ou saída da avenida, para isso foi estabelecido um espaço de 15 metros. Já no Cenário 2, Figura 7.2b, não há qualquer tipo de restrição de utilização das faixas.

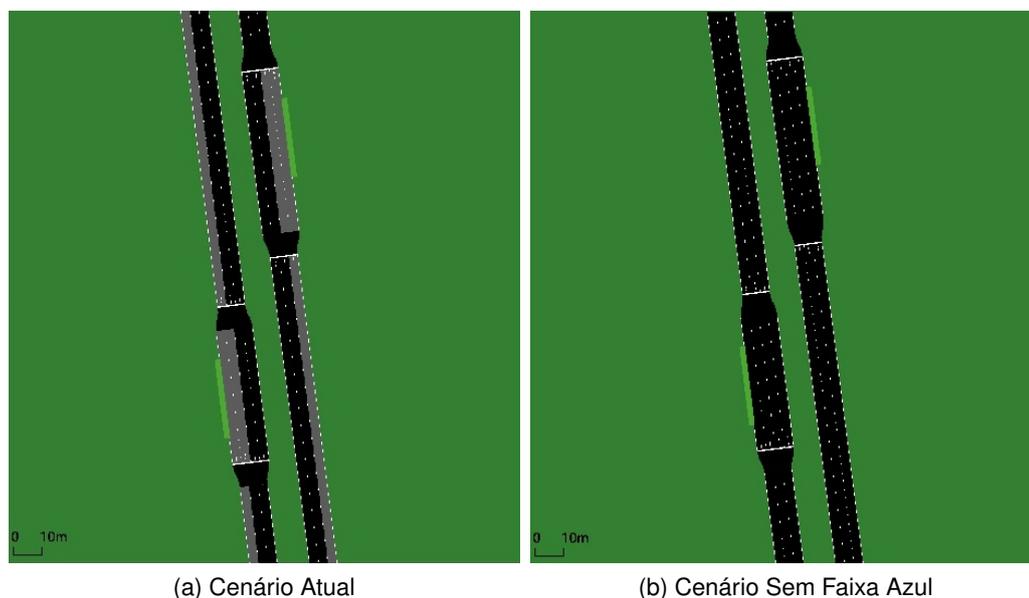


Figura 7.2: Comparativo do Cenário 1 (Atual) x Cenário 2 (Sem Faixa Azul)

O Cenário 3 (Sem Semáforos de Pedestre) promove a remoção dos três semáforos de pedestre presentes na avenida Fernandes Lima. A Figura 7.3 demonstra o localização dos semáforos de pedestre que estão inseridos em três trechos da avenida. O primeiro está localizado em frente ao prédio da empresa Equatorial Energia. O segundo está localizado em frente ao Hospital Veredas. O terceiro está localizado em frente ao Supermercado Bompreço Farol. Este cenário foi proposto para que fosse possível conhecer os ganhos volumétricos do tráfego de veículos, bem como os seus indicadores de eficiência após a remoção dos semáforos de pedestre da avenida.

A Figura 7.4 ilustra os três semáforos de pedestre no simulador de mobilidade urbana. Na imagem é possível observar o contorno da avenida, a implantação da faixa azul, a faixa de pedestre e os semáforos posicionados corretamente.

A implementação do cenário 3 no mundo real exigiria ações adicionais do governo para garantir a acessibilidade e segurança no trânsito de pedestres, como a implantação de passarelas de pedestres, que são pontes ou viadutos destinados ao tráfego exclusivo de pedestres com a finalidade de proporcionar uma travessia segura de pessoas em locais que apresentam considerável volume de tráfego de veículos automotores em áreas urbanas, como é o caso da avenida Fernandes Lima. Além de contribuir para a melhoria do tráfego de veículos, a implantação de passarelas poderia contribuir com a redução do número de acidentes de trânsito por atropelamento (Floriani et al., 2017).



Figura 7.3: Remoção dos Semáforos de Pedestre na Avenida Fernandes Lima.

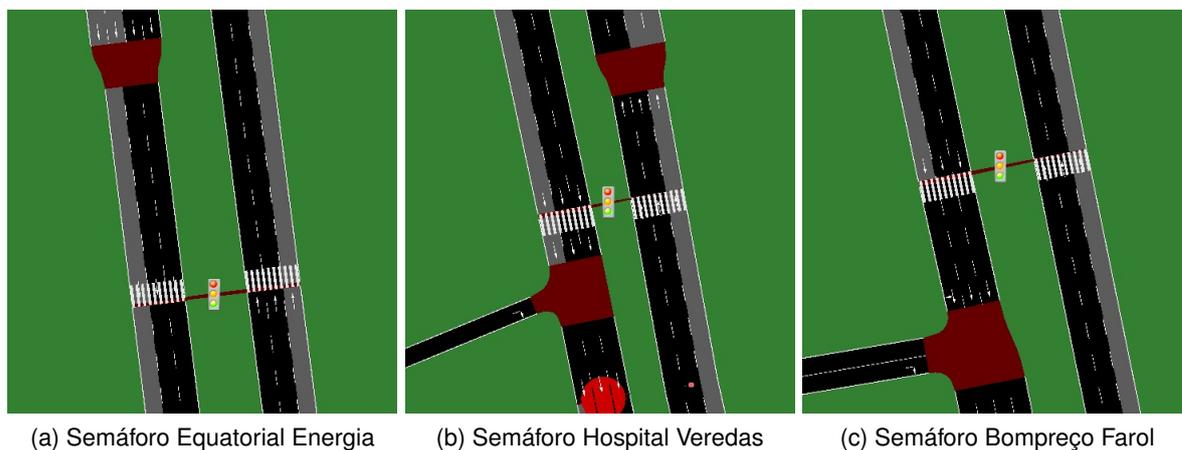


Figura 7.4: Semáforos de pedestre existentes na avenida Fernandes Lima.

O Cenário 4 (Sem Faixa Azul e Semáforos de Pedestre) promove a remoção da faixa exclusiva para o transporte coletivo e a remoção dos semáforos de pedestre a fim de comparar os dados coletados com os demais cenários hipotéticos propostos. Nesse cenário é proposta uma combinação dos cenários anteriores.

A Tabela 7.3 demonstra o resultado comparativo do ganho volumétrico do tráfego de veículos nas interseções semaforizadas coletadas após a simulação dos 4 cenários citados. A primeira

coluna corresponde à interseção semafórica, a segunda e terceira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 1 (atual), a quarta, quinta, sexta e sétima colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho, o percentual volumétrico e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 2 (sem faixa azul), a oitava, nona, décima e décima primeira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho, o percentual volumétrico e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 3 (sem semáforos de pedestre), a décima segunda, décima terceira, décima quarta e décima quinta colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho, o percentual volumétrico e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 4 (sem faixa azul e semáforos de pedestre). Nessa tabela, todas colunas que apresentam dados de ganho e porcentagem volumétrica estão sendo comparadas ao cenário 1 (atual).

Tabela 7.3: Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos nas interseções semafóricas simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).

VOLUME DO TRÁFEGO (FLUXO TABULEIRO - CENTRO)	CENÁRIO 1 ATUAL			CENÁRIO 2 SEM FAIXA AZUL			CENÁRIO 3 SEM SEMÁF. DE PEDESTRE			CENÁRIO 4 SEM FAIXA AZUL E SEMÁF. PEDESTRE					
	GANHO	%	IC 95%	GANHO	%	IC 95%	GANHO	%	IC 95%	GANHO	%	IC 95%			
1- RUA CAMARAGIBE	2455	± 22,34		2641	186	7,58%	± 1,21	2647	192	7,82%	± 1,42	2639	184	7,49%	± 1,31
2- RUA DR. ABEL. PONTES LIMA	2353	± 25,79		2592	239	10,16%	± 1,17	2594	241	10,24%	± 3,32	2591	238	10,11%	± 1,95
3- RUA TEREZA DE AZEVEDO	1908	± 25,89		2159	251	13,16%	± 1,17	2117	209	10,95%	± 8,09	2143	235	12,32%	± 1,32
4- AVENIDA ROTARY	2968	± 32,18		3279	311	10,48%	± 4,28	3175	207	6,97%	± 8,20	3206	238	8,02%	± 3,35
5- RUA MIGUEL PALMEIRA	2825	± 35,37		3159	334	11,82%	± 7,01	3031	206	7,29%	± 8,89	3212	387	13,70%	± 2,85
6- RUA DES. TENÓRIO	2892	± 23,16		3104	212	7,33%	± 5,18	3051	159	5,50%	± 7,61	3268	376	13,00%	± 3,53
TOTAL	15401	-		16934	1533	9,95%	-	16615	1214	7,88%	-	17059	1658	10,77%	-

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7.3, que demonstra o resultado comparativo do ganho volumétrico do tráfego de veículos nas interseções semafóricas, o cenário 1, que simula o que ocorre na realidade, apresentou um volume de tráfego de veículos de 15.401. O cenário 2, que propôs a remoção da faixa azul, apresentou um volume de tráfego de veículos de 16.934, representando um percentual de ganho volumétrico de 9,95%. O cenário 3, que propôs a remoção dos semáforos de pedestre, apresentou um volume de tráfego de veículos de 16.615, representando um percentual de ganho volumétrico de 7,88%. O cenário 4, que propôs a remoção da faixa azul e semáforos de pedestre, apresentou um volume de tráfego de veículos de 17.059, representando um percentual de ganho volumétrico de 10,77%. Como foi possível observar, todos os cenários apresentaram ganhos volumétricos de tráfego nas interseções semafóricas em comparação com o cenário 1, sendo o cenário 4 apresentando melhores resultados, proporcionando um aumento do volume de tráfego de veículos de 1.658.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.3, pode-se observar que os intervalos obtidos em cada um dos cenários não se sobrepõem, ou seja, não existem valores em comum. Então, tem-se (pelo menos) 95% de confiança de que as verdadeiras médias alcançadas através do processo de simulação, no que tange ao volume de tráfego de veículos nas interseções, possui uma diferença estatisticamente significativa entre os cenários simulados para a avenida Fernandes Lima.

A Fig. 7.5 apresenta o gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções da avenida Fernandes Lima dos 4 cenários estudados, sentido Tabuleiro-Centro. O cenário

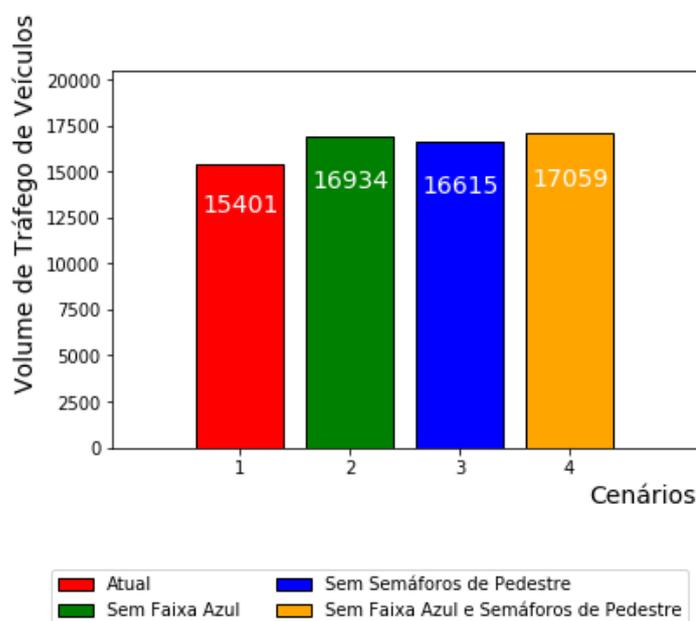


Figura 7.5: Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções semaforizadas simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).

que apresentou melhor desempenho foi o que propôs a remoção da restrição da faixa azul e remoção dos semáforos de pedestre com o volume de tráfego de veículos de 17.059. Portanto, os resultados apresentados demonstram que, por meio do modelo de simulação proposto, é possível realizar diversas intervenções na avenida sem comprometer os recursos disponíveis e alcançar bons resultados capazes de promover a melhoria do tráfego de veículos na região de estudo.

Os resultados dos indicadores de eficiência dos veículos obtidos com a execução das 4 simulações propostas são demonstrados na Tabela 7.4. A primeira coluna corresponde ao tipo de veículo, a segunda coluna ao indicador de desempenho (Tempo de Viagem, Tempo de Espera, Emissão de CO₂ e Consumo de Combustível) e as demais colunas correspondem aos resultados de cada cenário proposto de acordo com o indicador e seus respectivos intervalos de confiança de 95%.

Tabela 7.4: Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando remoção de faixa azul e semáforos de pedestre (cenários 1, 2, 3 e 4).

VEÍCULO	INDICADOR	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		CENÁRIO 3		CENÁRIO 4	
		ATUAL	IC 95%	SEM FAIXA AZUL	IC 95%	SEM SEMÁF. DE PEDESTRE	IC 95%	SEM FAIXA AZUL E SEMÁF. DE PEDESTRE	IC 95%
Carro	Tempo de Viagem (min)	18,75	± 0,25	10,19	± 0,09	12,47	± 0,17	7,64	± 0,02
	Tempo de Espera (min)	7,74	± 0,13	2,80	± 0,03	4,39	± 0,10	2,01	± 0,01
	Emissão de CO ₂ (g)	2649,71	± 25,49	1656,26	± 8,84	1947,32	± 18,77	1398,30	± 3,87
	Consumo de Combustível (l)	1,14	± 0,01	0,71	± 0,01	0,84	± 0,01	0,60	± 0,01
Ônibus	Tempo de Viagem (min)	16,11	± 0,17	18,15	± 0,19	14,91	± 0,11	14,54	± 0,06
	Tempo de Espera (min)	3,72	± 0,09	4,77	± 0,09	3,29	± 0,05	3,54	± 0,04
	Emissão de CO ₂ (g)	11448,60	± 33,03	11792,90	± 34,34	10915,60	± 26,02	10036,49	± 21,55
	Consumo de Combustível (l)	4,88	± 0,01	4,90	± 0,01	4,65	± 0,01	4,28	± 0,01

Analisando os resultados dos indicadores de eficiência dos veículos disponibilizados na Ta-

bela 7.4, foi possível estabelecer uma comparação de eficiência de carros e ônibus nos 4 cenários até aqui estudados. É importante destacar ainda que os dados de desempenho de eficiência exibidos são apenas referentes aos veículos que percorrem todo o trajeto no sentido Tabuleiro-Centro, ou seja, os dados dos veículos que entram ou saem de vias paralelas não são avaliados, pois o trajeto curto e aleatório do modelo de simulação pode distorcer os indicadores de eficiência.

O cenário 2 (sem faixa azul) apresentou os seguintes resultados: Em relação ao modal Carro, o tempo de viagem simulado passou de 18,75 para 10,19 minutos, redução de 45,65%. O tempo de espera em congestionamento passou de 7,74 para 2,80 minutos, redução de 63,82%. A emissão de gás carbônico passou de 2.649,71 para 1.656,26 gramas, redução de 37,49% e o consumo de combustível passou de 1,14 para 0,71 litros, redução de 37,72%. Já em relação ao modal ônibus, o tempo de viagem passou de 16,11 para 18,15 minutos, aumento de 12,66%, o tempo de espera em congestionamento passou de 3,72 para 4,77 minutos, aumento de 28,23%, a emissão de gás carbônico passou de 11.448,60 para 11.792,90 gramas, aumento de 3,01% e o consumo de combustível passou de 4,88 para 4,90 litros, aumento de 0,41%. Os dados apresentados para o modal Carro foram bastante expressivos, houve melhora substancial em todos os indicadores de eficiência, em especial, para o tempo de espera em congestionamento que alcançou uma redução de 63,82%. Como já esperado, os dados referentes ao modal Ônibus apresentaram uma relativa piora em seus indicadores de eficiência, pois passaram a compartilhar o espaço que até então era exclusivo. O indicador que sofreu maior redução de eficiência foi também o tempo de espera em congestionamento que registou um aumento de 28,23%. Além disso, o modal Ônibus registrou um aumento de 12,66% no tempo de viagem. Contudo, com os dados apresentados é possível perceber que a remoção da faixa azul trouxe benefícios aos carros em detrimento ao transporte coletivo.

O cenário 3 (sem semáforos de pedestre) apresentou os seguintes resultados: Em relação ao modal Carro, o tempo de viagem passou de 18,75 para 12,47 minutos, redução de 33,49%. O tempo de espera em congestionamento passou de 7,74 para 4,39 minutos, redução de 43,28%. A emissão de gás carbônico passou de 2.649,71 para 1.947,32 gramas, redução de 26,51% e o consumo de combustível passou de 1,14 para 0,84 litros, redução de 26,32%. Já em relação ao modal Ônibus, o tempo de viagem passou de 16,11 para 14,91 minutos, redução de 7,45%, o tempo de espera em congestionamento passou de 3,72 para 3,29 minutos, redução de 11,56%, a emissão de gás carbônico passou de 11.448,60 para 10.915,60 gramas, redução de 4,66% e o consumo de combustível passou de 4,88 para 4,65 litros, redução de 4,71%. Os dados apresentados para o modal Carro foram bastante expressivos, houve melhora substancial em todos os indicadores de eficiência, em especial, para o tempo de duração da viagem que alcançou uma redução de 33,49%. Os dados referentes ao modal Ônibus também apresentaram uma relativa melhora em seus indicadores de eficiência, o tempo de viagem obteve uma redução de 7,45%. Assim, diferentemente do que ocorreu no cenário que propôs a remoção da faixa azul, os dois modais foram beneficiados com a remoção dos semáforos de pedestre. Contudo, ana-

lisando os dados é possível perceber que a remoção dos três semáforos de pedestre é capaz de trazer benefícios tanto para os carros quanto para os ônibus. Uma conclusão preliminar que pode ser efetuada é que a remoção dos semáforos de pedestre pode compensar a perda do volume de veículos ocasionada pela implantação da faixa azul que foi de 9,53%. Dessa forma, a remoção dos semáforos de pedestre pode recuperar 8,32% do volume de tráfego de veículos na avenida Fernandes Lima.

O cenário 4 (sem faixa azul e semáforos de pedestre) apresentou os seguintes resultados: Em relação ao modal Carro, o tempo de viagem passou de 18,75 para 7,64 minutos, redução de 59,25%. O tempo de espera em congestionamento passou de 7,74 para 2,01 minutos, redução de 74,03%. A emissão de gás carbônico passou de 2.649,71 para 1.398,30 gramas, redução de 47,23% e o consumo de combustível passou de 1,14 para 0,60 litros, redução de 47,37%. Já em relação ao modal Ônibus, o tempo de viagem passou de 16,11 para 14,54 minutos, redução de 9,75%, o tempo de espera em congestionamento passou de 3,72 para 3,54 minutos, redução de 4,84%, a emissão de gás carbônico passou de 11.448,60 para 10.036,49 gramas, redução de 12,33% e o consumo de combustível passou de 4,88 para 4,28 litros, redução de 12,30%. Os dados analisados no cenário proposto com a remoção da faixa azul e semáforos de pedestre são ainda mais expressivos do que os apresentados nos outros cenários estudados, principalmente para o modal Carro. No Cenário 4 houve uma melhora relevante nos indicadores, no qual foi possível perceber que a remoção da faixa azul e dos três semáforos de pedestre trouxe benefícios, tanto para os carros quanto para os ônibus. Apenas um indicador do modal ônibus não obteve o melhor resultado, que foi o tempo de espera em congestionamento que registrou 3,54 minutos, perdendo para o cenário 3 (sem semáforo de pedestre) nesse quesito que obteve tempo parada de 3,29 minutos. No entanto, o resultado faz sentido devido à perda da exclusividade dos ônibus que passaram a dividir os espaços com os carros. Assim, os resultados apontam que o melhor cenário seria a remoção da faixa azul e dos três semáforos de pedestre.

Porém, apesar do Cenário 4 apresentar os melhores resultados, deve ser encarado com bastante cautela porque este estudo não leva em consideração um possível aumento do número de linhas de transporte coletivo e veículos pesados, que poderia afetar o tráfego de toda a rede. O motivo é que os ônibus são veículos mais lentos quando estão em congestionamento e tendem a piorar o trânsito, principalmente quando estão com acesso livre as outras faixas da via. O cenário 4 apresentou melhores resultados devido ao volume calibrado que foi limitado ao fluxo de veículos requeridos pelo cenário 1. Dessa forma, a via reduziu o congestionamento fazendo com que carros e ônibus trafegaram livremente. O cenário 3 apresentou indicadores positivos para os dois modais, mantendo a restrição da faixa exclusiva para o transporte coletivo, sendo portanto o cenário mais preparado para suportar um possível acentuado aumento no fluxo sem prejudicar o transporte coletivo.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.4, da mesma forma que ocorreu com os dados volumétricos de tráfego de veículos, os intervalos de confi-

ança apresentados pelos indicadores de eficiência dos veículos obtidos em cada um dos cenários também não se sobrepõem. Então, tem-se (pelo menos) 95% de confiança de que as verdadeiras médias alcançadas através do processo de simulação dos cenários hipotético propostos, não são iguais, uma vez que os valores apresentados estão dentro da margem de erro estabelecida. Assim, utilizando o modelo de simulação é possível obter melhores indicadores de eficiência para os veículos que transitam na avenida Fernandes Lima.

7.4.2 Cenários 5 e 6 - Simulação de Acidentes de Veículos

O intuito dessa simulação é promover incidentes em dois trechos da avenida Fernandes Lima, a fim de observar o comportamento do volume do tráfego de veículos e alguns indicadores de eficiência. Entende-se por incidente qualquer situação que possa interromper o fluxo do tráfego de veículos, como colisões e manutenções na pista. Os cenários 5 e 6 propõem acidentes de trânsito em dois trechos da avenida Fernandes Lima visando avaliar os impactos causados pelos acidentes no congestionamento do tráfego rodoviário.

Para [Smith et al. \(2014\)](#), existem três opções no Simulador de Mobilidade Urbana (SUMO) para reproduzir incidentes na pista. A primeira opção é forçar a parada de um veículo, em um ponto da pista, por um período predeterminado a fim de bloquear a passagem dos demais veículos na faixa de rolamento. A segunda opção é ajustar o ciclo semafórico de forma que o sinal fique vermelho por um período de tempo anormal, fazendo com que os veículos enfrentem congestionamento e, por fim, a terceira opção é regular a velocidade limite dos veículos para dificultar o seu tráfego. Dentre as opções relatadas, foi escolhida a primeira opção para simular um acidente devido à facilidade de implementação, como um carro quebrado no meio da pista. Para isso, foi utilizado o cenário 1 (atual) como referência para criação dos cenários 5 e 6, nos quais foram escolhidos dois pontos estratégicos na avenida Fernandes Lima que pudessem ocasionar congestionamento.

O método estabelecido para simular o acidente partiu da utilização do cenário atual e da configuração de um veículo adicional para percorrer toda a avenida Fernandes Lima, fazendo uma parada forçada na faixa de rolagem central do local do acidente por 15 minutos. No entanto, para manter os resultados confiáveis, os registros de percurso desse veículo não foram contabilizados nos resultados de indicadores de tempo de viagem, tempo de espera, emissão de gás carbônico e consumo de combustível. Os resultados dos indicadores contemplam apenas os registros dos veículos que percorrem todo o trajeto da avenida Fernandes Lima.

A Figura 7.6 ilustra o mapa de semáforos da avenida Fernandes Lima e demonstra a localização do trecho escolhido para simular o acidente de veículo do cenário 5. Observando a imagem, é possível notar dois trechos da avenida mais amplos onde não há semáforos. Foi justamente esses trechos escolhidos para simular os acidentes de trânsito. O primeiro trecho fica localizado entre os semáforos de pedestre da Equatorial Energia e do Hospital Veredas, no qual está representado por dois veículos colidindo.



Figura 7.6: Simulação de Acidentes - Cenário 5 (Trecho 1).

O tempo de partida definido para que o veículo entre no ambiente de simulação foi de 30 minutos, já considerando o tempo de simulação de 15 minutos que são descartados por conta do período de saturação de fluxo de veículos da via. Então, para fins de contabilização de resultado, o início da aplicação do acidente ocorre após os 15 minutos. Em relação à definição do tempo de parada, de acordo com [Smith et al. \(2014\)](#), um veículo urbano acidentado permanece geralmente de 10 a 20 minutos parado impactando o trânsito da via e gerando congestionamentos, porém acidentes graves podem durar muito mais tempo, mas são raros de acontecer em ambientes urbanos de baixa velocidade, como é o caso da avenida Fernandes Lima. Então, seguindo esse raciocínio, foi definido o tempo de parada de 15 minutos para ambos os cenários com o objetivo de simular um acidente realista.

A construção do Cenário 6 seguiu a mesma metodologia adotada para o cenário 5, modificando apenas a localização do acidente. O trecho escolhido não possui semáforo próximo, da mesma forma que o cenário 5. Assim, após a execução do modelo de simulação dos cenários 5 e 6, foram obtidos os resultados volumétricos de tráfego de veículos, bem como os resultados dos indicadores de tempo de viagem, tempo de espera em congestionamento, emissão de gás carbônico e consumo de combustíveis.

A Figura 7.7 ilustra o mapa de semáforos da avenida Fernandes Lima e demonstra a locali-



Figura 7.7: Simulação de Acidentes - Cenário 6 (Trecho 2).

zação do trecho escolhido para simular o acidente de veículo do cenário 6. O acidente simulado ocorre no trecho entre os semáforos da avenida Fernandes Lima e Rua Cel Lima Rocha, precisamente em frente ao batalhão do exército, sentido Tabuleiro-Centro.

Tabela 7.5: Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos nas interseções semaforicas simulando acidentes (cenários 5 e 6).

VOLUME DO TRÁFEGO (FLUXO TABULEIRO - CENTRO)	CENÁRIO 1			CENÁRIO 5				CENÁRIO 6			
	ATUAL	IC 95%		ACIDENTE TRECHO 1	GANHO	%	IC 95%	ACIDENTE TRECHO 2	GANHO	%	IC 95%
1- RUA CAMARAGIBE	2455	± 22,34		2254	-201	-8,19%	± 3,76	2377	-78	-3,18%	± 18,03
2- RUA DR. ABEL. PONTES LIMA	2353	± 25,79		2163	-190	-8,07%	± 3,57	2273	-80	-3,40%	± 17,87
3- RUA TEREZA DE AZEVEDO	1908	± 25,89		1830	-78	-4,09%	± 5,65	1900	-8	-0,42%	± 9,13
4- AVENIDA ROTARY	2968	± 32,18		2937	-31	-1,04%	± 8,49	2962	-6	-0,20%	± 8,86
5- RUA MIGUEL PALMEIRA	2825	± 35,37		2781	-44	-1,56%	± 6,26	2807	-18	-0,64%	± 7,17
6- RUA DES. TENÓRIO	2892	± 23,16		2866	-26	-0,90%	± 5,90	2879	-13	-0,45%	± 7,72
TOTAL	15401	-		14831	-570	-3,70%	-	15198	-203	-1,32%	-

A Tabela 7.5 demonstra o resultado comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções semaforicas coletadas após a simulação dos cenário 1 (Atual), cenário 5 (Acidente trecho 1) e cenário 6 (Acidente trecho 2). A primeira coluna corresponde à interseção semaforica, a segunda e terceira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos e o intervalo de confiança de 95% do cenário 1, a quarta, quinta, sexta e sétima colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho volumétrico, o percentual volumétrico e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 5, a oitava, nona, décima

e décima primeira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho volumétrico, o percentual volumétrico e o intervalo de confiança de 95% do cenário 6. Nessa tabela, todas colunas que apresentam dados de ganho e porcentagem volumétrica estão sendo comparadas ao cenário 1.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7.5, que demonstra o resultado comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções semaforizadas para os cenários 1, 5 e 6, em que foram promovidos acidentes de trânsito, observa-se que, em comparação ao cenário 1 (atual), o cenário 5, que propôs acidente no trecho 1, apresentou uma redução no volume de tráfego de veículos de 14.831, representando um percentual de -3,70%. O cenário 6, que propôs a acidente no trecho 2, apresentou uma redução no volume de tráfego de veículos de 15.198, representando um percentual de -1,32%. Como foi possível notar, todos os cenários hipotéticos propostos apresentaram redução no volume de tráfego de veículos nas interseções semaforizadas em comparação ao cenário 1, sendo o cenário 5 o que apresentou os piores resultados, ocasionando uma redução do volume de tráfego de veículos de -570, enquanto o cenário 6 ocasionou uma redução de apenas -203.

Outro ponto que deve ser destacado é que o cenário 5 apresentou redução do volume de tráfego de veículos em todas as interseções, com destaque para as Ruas Camaragibe(1), que foi a mais penalizada e teve o volume de tráfego de veículos afetado em -8,19% e Desembargador Tenório(6) que foi a menos penalizada, na qual apresentou volume de tráfego de veículos afetado em apenas -0,90%. Assim, foi possível notar que quanto mais no início da via, sentido Tabuleiro-Centro, mais afetado foi o volume de tráfego dos veículos simulado nesse cenário. Já no cenário 6, também foi possível observar que todas as interseções apresentaram uma redução no volume de tráfego de veículos. No entanto, a perda de volume foi bem menor em comparação ao apresentado no cenário 5. A interseção mais penalizada foi a Rua Dr Abelardo Pontes Lima(2) que obteve uma redução de -3,40% e a menos penalizada foi a Avenida Rotary(4) que obteve uma redução de -0,20%. Acredita-se que a Avenida Rotary(4) foi menos penalizada que as demais interseções devido ao elevado tráfego de veículos que ingressam na avenida Fernandes Lima a partir dela. Deste modo, o fato de conhecer os dados de piora de tráfego em caso de acidentes nas interseções da avenida, possibilita que os órgãos reguladores possam planejar soluções para recuperação do tráfego urbano rapidamente em caso de acidentes.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.5, é possível observar que o cenário 5 possui duas das seis interseções estudadas apresentando dados sobrepostos, são elas: avenida Rotary e rua Desembargador Tenório. Já no cenário 6, quatro das seis interseções apresentaram dados sobrepostos, são elas: rua Tereza de Azevedo, avenida Rotary, rua Miguel Palmeira e rua Desembargador Tenório. Em ambos os cenários, também é possível notar que os dados obtidos referentes às ruas Camaragibe e Dr Abelardo Pontes Lima não se sobrepõem. Com isso, é possível demonstrar que o cálculo de intervalos de confiança para as médias dos dois cenários possuem algumas interseções em que os dados estão so-

brepostos, porém isso não implica que as médias são iguais. Na soma do volume de tráfego de veículos dos dois cenários, as médias podem ser significativamente diferentes e mesmo assim seus intervalos de confiança se sobreporem. Outro ponto importante, que justifica o maior número de interseções com intervalo de confiança sobreposto ocorrida no cenário 6, é que os dados foram muito aproximados, apresentando uma leve piora no volume de tráfego de veículos de -203, de um volume total de tráfego próximo da realidade de 15.401. Desta forma, utilizando o modelo de simulação é possível analisar possíveis perdas do volume de tráfego de veículos ocasionadas por acidentes de trânsito na avenida Fernandes Lima.

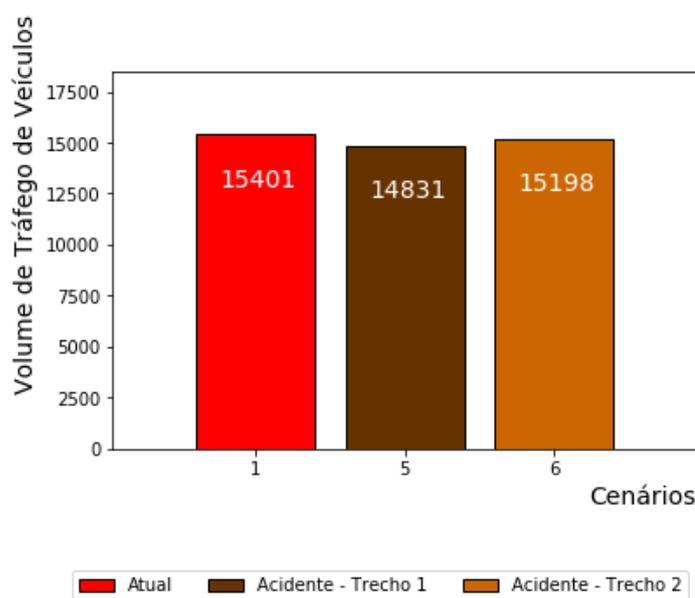


Figura 7.8: Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções semafóricas simulando acidentes (cenários 1, 5 e 6).

A Figura 7.8 apresenta o gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções da avenida Fernandes Lima dos cenários 1, 5 e 6, sentido Tabuleiro-Centro. O cenário que apresentou pior volume de veículos foi o cenário que propôs o acidente no trecho 1, localizado na parte superior da avenida, com o volume total de tráfego de veículos de 14.831. Portanto, os resultados apresentados demonstram que, por meio do modelo de simulação proposto, é possível observar situações adversas na avenida a fim de providenciar soluções para conter possíveis problemas sem comprometer os recursos disponíveis.

A Tabela 7.6 demonstra os resultados alcançados ao executar as simulações de acidentes de veículos na avenida Fernandes Lima, cenários 5 (trecho 1) e 6 (trecho 2). Os modais utilizados para coletar dados foram carros e ônibus. Os dados dispostos são apenas dos veículos que percorrem todo o trajeto sentido Tabuleiro-Centro, ou seja, os dados dos veículos que entram ou saem de vias paralelas não são avaliados, pois o trajeto curto e aleatório do modelo de simulação pode distorcer os indicadores.

Assim, como foi feito na análise volumétrica, os dados de indicadores de eficiência dos

Tabela 7.6: Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando acidentes (cenários 5 e 6).

VEÍCULO	INDICADOR	CENÁRIO 1		CENÁRIO 5		CENÁRIO 6	
		ATUAL	IC 95%	ACIDENTE TRECHO 1	IC 95%	ACIDENTE TRECHO 2	IC 95%
Carro	Tempo de Viagem (min)	18,75	± 0,25	19,28	± 0,17	19,08	± 0,23
	Tempo de Espera (min)	7,74	± 0,13	7,86	± 0,08	7,63	± 0,12
	Emissão de CO ₂ (g)	2649,71	± 25,49	2696,12	± 16,71	2674,79	± 22,30
	Consumo de Combustível (l)	1,14	± 0,01	1,16	± 0,01	1,15	± 0,01
Ônibus	Tempo de Viagem (min)	16,11	± 0,17	15,24	± 0,09	16,29	± 0,13
	Tempo de Espera (min)	3,72	± 0,09	3,43	± 0,05	3,83	± 0,07
	Emissão de CO ₂ (g)	11448,60	± 33,03	11241,08	± 23,32	11450,33	± 28,20
	Consumo de Combustível (l)	4,88	± 0,01	4,79	± 0,01	4,88	± 0,01

cenários 5 e 6 são comparados com o cenário 1 (atual). Em relação aos dados apresentados para o modal carro, é possível analisar que o tempo de viagem aumentou de 18,75 para 19,28 minutos no cenário 5, taxa de 2,83% e para 19,08 minutos no cenário 6, taxa de 1,76%. O tempo de espera em congestionamento registrou um aumento de 7,74 para 7,86 minutos no cenário 5, taxa de 1,55% e uma redução para 7,63 minutos no cenário 6, taxa de -1,42%. Quanto à emissão de gás carbônico, houve um pequeno aumento na emissão de poluentes para os dois cenários. O cenário 5 apresentou aumento de 2.649,71 para 2.696,12 gramas, taxa de 1,75% e o cenário 6 para 2.674,79 gramas, taxa de 0,95%. Quanto ao consumo de combustível, houve um leve aumento nos dois cenários. No cenário 5, o consumo de combustível foi de 1,14 para 1,16 litros e no cenário 6 passou para 1,15 litros. Como foi possível observar, para o modal Carro, o cenário 5, que promoveu acidente logo no início da avenida, sentido Tabuleiro-Centro, foi o mais penalizado com aumento do tempo total de viagem em 2,83%.

Em relação aos dados apresentados para o modal Ônibus, é possível analisar que o tempo de viagem reduziu de 16,11 para 15,28 minutos no cenário 5, taxa de -5,15% e aumentou no cenário 6 para 16,29 minutos, taxa de 1,12%. Diferentemente do modal carro, o tempo médio de viagem do ônibus teve uma redução no cenário 5. Isso ocorre devido a um menor volume de veículos que entrou no ambiente de simulação, principalmente o veículo do tipo táxi que pode trafegar na faixa de rolagem exclusiva para o transporte coletivo. Assim como no modal carro, os valores apontam que o tempo médio de viagem não sofreu grandes alterações, menos de 1 minuto. Quanto ao tempo de espera, no cenário 5 foi registrada uma redução de 3,72 para 3,43 minutos, taxa de 7,80% e um aumento para 3,83 minutos no cenário 6, taxa 2,96%. Quanto à emissão de gás carbônico, houve uma redução no cenário 5, passando de 11.448,60 para 11.241,08 gramas, taxa de -1,81% e um aumento no cenário 6 para 11.450,33 gramas, taxa de 0,02%. Quanto ao consumo de combustível, houve uma redução do cenário 1 para o cenário 5. Já para o cenário 6, os valores se mantiveram. No cenário 5, o consumo de combustível foi reduzido de 4,88 para 4,79 litros, taxa de 1,84%. Como foi possível observar, para o modal Ônibus, o cenário 6, que promoveu acidente no segundo trecho da avenida, sentido Tabuleiro-Centro, foi o mais penalizado com aumento do tempo total de viagem em 1,12%.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.6, da mesma forma que ocorreu com os dados volumétricos de tráfego de veículos, os intervalos de confiança

apresentados pelos indicadores de eficiência dos veículos obtidos em cada um dos cenários também apresentaram uma leve sobreposição, com destaque para o cenário 6, no qual todas as interseções apresentaram dados sobrepostos, tanto para o modal carro quanto para ônibus. Já no cenário 5, apenas o modal carro apresentou dados sobrepostos em dois indicadores de eficiência, tempo de espera e consumo de combustível. No entanto, como o trajeto estudado é curto, é natural que os dados de consumo de combustível sejam muito aproximados. O mesmo ocorreu com a variável tempo de espera, onde os valores sobrepostos representam uma margem pequena do intervalo de confiança.

Assim, analisando os indicadores, é possível afirmar que ambos os cenários têm seus indicadores prejudicados pelos acidentes simulados. O Cenário 5 (Acidente trecho 1) apresenta mais impacto no congestionamento para o modal carro. Enquanto o cenário 6 (Acidente trecho 2) apresenta mais impacto para o modal ônibus. Desta forma, é possível estabelecer que a utilização do modelo de simulação proposto é possível encontrar soluções para melhorar os indicadores de eficiência para os veículos que transitam na avenida Fernandes Lima.

7.4.3 Cenários 7 e 8 - Simulação de Ajuste no Tempo do Ciclo Semafórico

O intuito dessa simulação é promover ajustes no tempo do sinal verde do ciclo semafórico em todos os semáforos localizados na avenida Fernandes Lima, a fim de observar o comportamento do volume de tráfego e indicadores de eficiência dos veículos. O cenário 7 propõe uma redução de 5 segundos no sinal verde do ciclo semafórico. Já o cenário 8 propõe um aumento de 5 segundos no sinal verde do ciclo semafórico. Esses ajustes ocorrem apenas para o direito de passagem dos veículos que estão trafegando na avenida principal (Fase 1). Desta forma, o tempo dos sinais luminosos das ruas de acesso à avenida Fernandes Lima permanece o mesmo.

Tabela 7.7: Resultado comparativo de ganho volumétrico de tráfego de veículos nas interseções semafóricas simulando ajustes no ciclo semafórico (cenários 7 e 8).

VOLUME DO TRÁFEGO (FLUXO TABULEIRO - CENTRO)	CENÁRIO 1		CENÁRIO 7 SEMÁFOROS COM -5 SEGUNDOS				CENÁRIO 8 SEMÁFOROS COM +5 SEGUNDOS			
	ATUAL	IC 95%	GANHO	%	IC 95%	GANHO	%	IC 95%		
1- RUA CAMARAGIBE	2455	± 22,34	2385	-70	-2,85%	± 14,98	2464	9	0,37%	± 11,29
2- RUA DR. ABEL. PONTES LIMA	2353	± 25,79	2183	-170	-7,22%	± 14,48	2339	-14	-0,59%	± 11,06
3- RUA TEREZA DE AZEVEDO	1908	± 25,89	1821	-87	-4,56%	± 8,85	1955	47	2,46%	± 8,78
4- AVENIDA ROTARY	2968	± 32,18	2858	-110	-3,71%	± 10,53	3060	92	3,10%	± 9,11
5- RUA MIGUEL PALMEIRA	2825	± 35,37	2754	-71	-2,51%	± 10,00	2838	13	0,46%	± 7,65
6- RUA DES. TENÓRIO	2892	± 23,16	2869	-23	-0,80%	± 7,31	2931	39	1,35%	± 6,76
TOTAL	15401	-	14870	-531	-3,45%	-	15587	186	1,21%	-

A Tabela 7.7 demonstra o resultado comparativo do volume de tráfego de veículos ocorrido nas interseções semafóricas, coletado após a simulação de tráfego urbano contendo ajustes no tempo verde do ciclo semafórico, cenário 1 (Atual), cenário 7 (Semáforos com -5 segundos) e cenário 8 (Semáforos com +5 segundos). A primeira coluna corresponde à interseção semafórica, a segunda e terceira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos e o intervalo de confiança de 95% do cenário 1, a quarta, quinta, sexta e sétima

colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho volumétrico, o percentual volumétrico e o valor do intervalo de confiança de 95% do cenário 7, a oitava, nona, décima e décima primeira colunas apresentam, respectivamente, o volume do tráfego de veículos, o ganho volumétrico, o percentual volumétrico e o intervalo de confiança de 95% do cenário 8. Nessa tabela, todas colunas que apresentam dados de ganho e porcentagem volumétrica estão sendo comparadas ao cenário 1.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7.7, é possível compreender que o cenário 7, que promoveu uma redução de 5 segundos no direito de passagem dos veículos, obteve uma perda de -3,45% no volume total de tráfego veículos em comparação ao cenário 1 (atual), passando de 15.401 para 14.870, uma redução de volume de tráfego de -531. Nesse cenário, todas as interseções semaforizadas registraram um menor volume de tráfego de veículos, com destaque para a interseção da rua Dr Abelardo Pontes Lima que foi mais sensível à simulação e apresentou maior perda de volume, uma redução de 7,22%. Já em contraste com o cenário anterior, o cenário 8, que promoveu um aumento de 5 segundos no direito de passagem dos veículos, obteve um ganho de 1,21% no volume total de tráfego de veículos, passando de 15.401 para 15.587, um aumento de tráfego de 186. Nesse caso, apenas uma interseção não apresentou ganho volumétrico, a que fica localizada na rua Dr Abelardo Pontes Lima. A interseção que apresentou maior sensibilidade ao ajuste proposto nesse cenário foi a que fica localizada na avenida Rotary, registrando um aumento de 3,10%. Dessa forma, o cenário 8 foi o que apresentou melhores resultados para o volume de tráfego de veículos na avenida Fernandes Lima.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.7, é possível observar que o cenário 7 possui apenas uma das seis interseções estudadas apresentando dados sobrepostos, que é a rua Desembargador Tenório. Ainda assim, os dados dessa única interseção não são totalmente sobrepostos, apenas uma parte do intervalo de confiança. Já no cenário 8, três das seis interseções apresentaram dados sobrepostos, são elas: rua Camaragibe, rua Dr Abelardo Pontes Lima e rua Miguel Palmeira. Do mesma forma que ocorreu no cenário 7, as sobreposições das médias volumétricas no cenário 8 representam apenas uma parte do intervalo de confiança, o que demonstra que a intervenção pode contribuir positivamente para ganhos no volume do tráfego de veículos.

A Figura 7.9 apresenta o gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções da avenida Fernandes Lima simulados nos cenários 1, 7 e 8, sentido Tabuleiro-Centro. O cenário que apresentou maior volume de tráfego de veículos, em comparação ao cenário atual, foi o que propõe o ajuste no tempo dos semáforos de +5 segundos com o total de 15.587. Já o cenário que propõe o ajuste no tempo dos semáforos de -5 segundos apresentou menor volume de tráfego de veículos com o total de 14.870. Portanto, os resultados apresentados demonstram que, por meio do modelo de simulação proposto, é possível realizar ajustes no tempo do ciclo semaforizado a fim de observar melhorias no trânsito da avenida sem comprometer os recursos disponíveis.

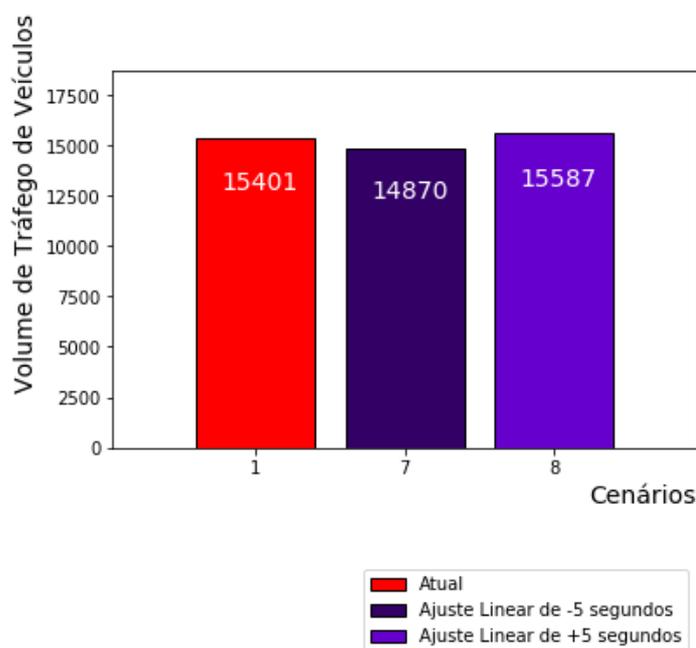


Figura 7.9: Gráfico comparativo do volume de tráfego de veículos nas interseções semaforicas simulando ajuste no tempo dos semaforos (cenários 1, 7 e 8).

A Tabela 7.8 demonstra os resultados de indicadores de eficiência dos veículos alcançados ao executar simulações de ajustes no tempo do ciclo semaforico da avenida Fernandes Lima, cenários 7 (-5 segundos) e 8 (+5 segundos). A primeira coluna corresponde ao tipo de veículo, a segunda coluna ao indicador de eficiência e as demais colunas aos resultados de cada cenário proposto. Os modais utilizados para coletar dados foram carros e ônibus. Os dados dispostos são apenas dos veículos que percorrem todo o trajeto no sentido Tabuleiro-Centro, ou seja, os dados dos veículos que entram ou saem de vias paralelas não são avaliados, pois o trajeto curto e aleatório do modelo de simulação pode distorcer os indicadores.

Tabela 7.8: Resultado de indicadores de eficiência dos veículos simulando ajustes no ciclo semaforico (cenários 7 e 8).

VEÍCULO	INDICADOR	CENÁRIO 1		CENÁRIO 7		CENÁRIO 8	
		ATUAL	IC 95%	SEMÁFOROS COM -5 SEGUNDOS	IC 95%	SEMÁFOROS COM +5 SEGUNDOS	IC 95%
Carro	Tempo de Viagem (min)	18,75	± 0,25	19,76	± 0,19	17,37	± 0,21
	Tempo de Espera (min)	7,74	± 0,13	8,38	± 0,11	6,79	± 0,12
	Emissão de CO ₂ (g)	2649,71	± 25,49	2767,42	± 17,94	2470,83	± 21,57
	Consumo de Combustível (l)	1,14	± 0,01	1,19	± 0,01	1,06	± 0,01
Ônibus	Tempo de Viagem (min)	16,11	± 0,17	16,56	± 0,21	15,92	± 0,15
	Tempo de Espera (min)	3,72	± 0,09	4,02	± 0,13	3,58	± 0,08
	Emissão de CO ₂ (g)	11448,60	± 33,03	11576,44	± 42,24	11391,01	± 28,00
	Consumo de Combustível (l)	4,88	± 0,01	4,94	± 0,02	4,86	± 0,01

Assim, como feito na análise volumétrica, os dados de indicadores de eficiência dos cenários 7 e 8 são comparados com o cenário 1 (atual). Em relação ao modal carro, foi possível observar que o indicador de desempenho tempo de viagem aumentou de 18,75 para 19,76 minutos no cenário 7, taxa de 5,39% e diminuiu para 17,37 minutos no cenário 8, taxa de -7,36%. O tempo

de espera em congestionamento registrou um aumento de 7,74 para 8,38 minutos no cenário 7, taxa de 8,27% e uma redução para 7,63 minutos no cenário 8, taxa de -1,42%. A emissão de gás carbônico registrou um aumento de 2.649,71 para 2.767,42 gramas, taxa de 4,44% no cenário 7 e uma redução de 2.470,83 gramas no cenário 8, taxa de -6,75%. O consumo de combustível registrou um aumento de 1,14 para 1,19 litros no cenário 7, taxa de 4,39% e uma redução para 1,06 litros, taxa de -4,39%. Já em relação ao modal Ônibus, foi possível observar que o indicador de desempenho tempo de viagem aumentou de 16,11 para 16,56 minutos no cenário 7, taxa de 2,79% e diminuiu para 15,92 minutos no cenário 8, taxa de -1,18%. O tempo de espera em congestionamento registrou um aumento de 3,72 para 4,02 minutos no cenário 7, taxa de 8,06% e uma redução para 3,58 minutos no cenário 8, taxa de -3,76%. A emissão de gás carbônico registrou um aumento de 11.448,60 para 11.576,44 gramas, taxa de 1,12% no cenário 7 e uma redução de 11.391,01 gramas no cenário 8, taxa de -0,5%. O consumo de combustível registrou um aumento de 4,88 para 4,94 litros no cenário 7, taxa de 1,23% e uma redução para 4,86 litros, taxa de -0,41%.

Analisando os resultados referentes aos indicadores de eficiência, é possível perceber que o cenário 7, que promoveu uma redução de 5 segundos no direito de passagem dos veículos, obteve uma piora em todos os seus indicadores de eficiência, tanto para o modal carro quanto para ônibus, com atenção especial ao indicador tempo de espera em congestionamento, que piorou o desempenho, respectivamente, em 8,27% e 8,06%. Já no cenário 8, que promoveu um aumento de 5 segundos no direito de passagem dos veículos, ocorreu o oposto, tanto para o modal carro quanto para o ônibus, houve uma melhora em todos os indicadores de eficiência com atenção especial ao indicador tempo de viagem que melhorou o desempenho, respectivamente, em 7,36% e 1,18%.

Em relação aos intervalos de confiança de 95% demonstrados na Tabela 7.8, no cenário 7, não há sobreposição em nenhum dos indicadores de eficiência, seja no modal carro ou ônibus. Já no cenário 8, houve uma leve sobreposição no indicador tempo de consumo de combustível para os dois modais, carro e ônibus, bem como no indicador tempo de viagem, apenas no modal ônibus. Assim, os resultados demonstram que os valores sobrepostos representam uma margem pequena do intervalo de confiança.

Como visto, o ajuste do tempo do ciclo semaforico pode contribuir para aumentar o volume do tráfego de veículos de uma via urbana. No entanto, os resultados volumétricos proporcionados devem ser considerados com bastante cautela, uma vez que novos estudos devem ser realizados para entender melhor o comportamento das vias de acesso à avenida Fernandes Lima, uma vez que quando há uma melhoria operacional em um trecho da via, pode haver também uma piora em outros pontos da região e, conseqüentemente, causar muitos transtornos à sociedade.



Conclusão

Neste Capítulo são apresentadas as considerações finais em alinhamento ao problema de pesquisa proposto, resultados alcançados, limites da pesquisa e direções futuras.

8.1 Considerações Finais

Este trabalho propôs avaliar o desempenho do tráfego urbano usando software de simulação para o cenário da avenida Fernandes Lima, importante corredor viário da cidade de Maceió/AL, Brasil. No ambiente de simulação foram utilizados dados geométricos atualizados, novos métodos de calibração e programação semafórica oficial, incluindo os dados de defasagem que não foram considerados em estudos anteriores.

Após a realização de várias simulações considerando os 8 cenários peculiares hipotéticos para a avenida Fernandes Lima, foi possível extrair dados importantes que podem ser utilizados para tomada de decisão visando a implementação de políticas públicas a fim de promover a melhoria do volume de tráfego de veículos. Os cenários foram divididos em três estudos de caso: O primeiro comparou quatro cenários: atual (1), sem faixa azul (2), sem semáforos de pedestre (3) e sem faixa azul e semáforos de pedestre (4); o segundo comparou três cenários: atual (1), acidente trecho 1 (5) e acidente trecho 2 (6); e, por fim, o terceiro comparou outros três cenários: atual (1), semáforos com ajuste linear de -5 segundos (7) e semáforos com ajuste linear de +5 segundos (8). Todos os cenários trazem dados importantes sobre o volume de tráfego e indicadores de eficiência dos veículos na avenida Fernandes Lima, que podem ser utilizados para estudos futuros.

O experimento de simulação de tráfego urbano que promoveu a remoção da faixa azul (cenário 2) proporcionou melhoria nos indicadores de eficiência para o modal carro, com destaque para o tempo de viagem que obteve uma redução de 45,65%. No entanto, como previsto, para o modal ônibus apresentou relativa piora no tempo total de viagem de 12,66%. Dessa forma, não

é recomendada a remoção da faixa azul porque é uma ação que prioriza o transporte coletivo, que é um meio capaz de transportar mais pessoas e sua ampliação deve ser fomentada.

O experimento de simulação de tráfego urbano que promoveu a remoção dos semáforos de pedestre (cenário 3) proporcionou uma melhoria considerável nos indicadores de eficiência para os modais carros e ônibus. O tempo de viagem foi reduzido em, respectivamente, 33,49% e 7,45%. Esse cenário foi capaz de trazer benefícios tanto para os carros quanto para os ônibus, diferentemente do que ocorreu no cenário de remoção da faixa azul (cenário 2), no qual apenas o modal carro foi beneficiado. Outro ponto importante, que deve ser destacado, é que a remoção dos semáforos de pedestre pode compensar a perda do volume de tráfego de veículos ocasionada pela implantação da faixa azul no ano de 2014, que foi de aproximadamente 9,95%, de acordo com a comparação da simulação dos cenários 1 e 2. Dessa forma, a remoção dos semáforos de pedestre pode recuperar 7,88% do volume de tráfego de veículos na avenida Fernandes Lima.

O experimento de simulação de tráfego urbano que promoveu a remoção da faixa azul e dos semáforos de pedestre (cenário 4) proporcionou uma melhoria considerável nos indicadores de eficiência para os modais carros e ônibus, bem como no volume de tráfego de veículos, apresentando os melhores resultados, um aumento de 10,77%. Entretanto, é um cenário que deve ser visto com bastante cautela porque este estudo não leva em consideração um possível aumento do número de linhas de transporte coletivo e um aumento do número de veículos pesados trafegando na avenida, que são mais lentos em situações de tráfego urbano e podem causar congestionamentos, principalmente quando estão acessando sem restrição todas as faixas de rolagem da via.

Em relação aos experimentos de simulação de tráfego urbano realizados nos cenários 5 e 6, nos quais foram propostos incidentes de trânsito para observar o comportamento do volume de tráfego de veículos e indicadores de eficiência, o cenário 5 foi o que apresentou uma maior perda no volume de tráfego de veículos com -3,70% e foi também o mais penalizado no tempo de viagem para o modal carro com 19,28 minutos, aumento de 2,83%. Dessa forma, os estudos aqui apresentados podem ser utilizados para entender os trechos que mais podem afetar o trânsito na avenida Fernandes Lima, avaliando assim o impacto causado pelos acidentes no congestionamento.

Em relação aos experimentos de simulação de tráfego urbano realizados nos cenários 7 e 8, nos quais foram propostos ajustes no tempo verde do ciclo semaforico para observar o comportamento do volume de tráfego de veículos e indicadores de eficiência. O cenário 8, que propôs um ajuste de +5 segundos no tempo de sinal verde com direito de passagem para os veículos que trafegam na avenida Fernandes Lima, foi o que apresentou melhores resultados. Nesse cenário, o ganho no volume de tráfego de veículos apresentado nas interseções semaforicas foi de 1,21% e a redução no tempo de viagem para os modais carro e ônibus foram de, respectivamente, 7,36% e 1,18%. Assim, os experimentos realizados nesses cenários demonstraram que ajustes na programação semaforica podem ser utilizados como estratégia para mitigar os

problemas de congestionamento nas vias urbanas.

Em síntese, este trabalho propôs estudar múltiplos cenários de simulação computacional de tráfego urbano para avaliar o desempenho dos veículos que percorrem a avenida Fernandes Lima. A simulação foi amplamente utilizada, por meio do SUMO, como uma alternativa econômica capaz de avaliar diversos problemas, como acidentes de veículos em trechos distintos, além de promover possíveis melhorias no tráfego de veículos através de ajustes no ciclo semafórico, remoção da faixa exclusiva para o transporte coletivo e dos semáforos de pedestre. Contudo, dentre todos os cenários comparados, o estudo de caso de tráfego urbano que propõe a remoção dos semáforos de pedestre demonstrou maior capacidade de proporcionar melhorias significativas no que tange o aumento do volume de tráfego e dos indicadores de eficiência dos veículos que percorrem a avenida Fernandes Lima, proporcionando relativa redução do tempo de viagem, tempo de espera em congestionamento, consumo de combustível e emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

8.2 Limitações do Estudo

Como limitação para este estudo, é importante destacar que as motocicletas não foram consideradas porque trafegam entre as faixas de rolagem do corredor viário devido o congestionamento. Assim, não estariam ocupando de forma efetiva o espaço destinado à faixa de rolagem que é utilizada pelos demais veículos, como carro, táxi, ônibus e caminhão. Outra limitação do estudo foi a consideração apenas de um dos sentidos da avenida Fernandes Lima (Tabuleiro-Centro), devido à falta de dados do volume de tráfego de veículos que seriam utilizados para calibração do modelo de simulação.

8.3 Trabalhos Futuros

Como estudos futuros, espera-se realizar a ampliação dos dados geométricos do modelo de simulação para entender melhor o impacto que essas alterações promovidas podem acarretar sobre o fluxo do tráfego urbano da região. Além disso, pode-se integrar ao modelo proposto uma meta-heurística para propor a otimização do ciclo semafórico. Nessa direção, muitos algoritmos estão disponíveis na literatura, com destaque para os bioinspirados, que consistem na aplicação de soluções baseadas na natureza para solucionar problemas que a computação tradicional não tem sido capaz de resolver.

Referências

- Áurea Amélia Coutinho Nogueira de Albuquerque, Bruno dos Santos Omena, and Zeferino Alencar. Mobilidade urbana sustentável em maceió: indicadores avaliativos e análise dos aspectos relacionados dentro do plano diretor. *Engenharia Civil, Centro Universitário CESMAC, Maceió/AL, Brasil*, 2017.
- Dex R Aleko and Soufiene Djahel. An efficient adaptive traffic light control system for urban road traffic congestion reduction in smart cities. *Information, MDPI*, 11(2):119, 2020.
- Tayfur Altioek and Benjamin Melamed. *Simulation modeling and analysis with Arena*. Elsevier, 2007.
- Marley Rosana Melo de Araújo, Jonathan Melo de Oliveira, Maísa Santos de Jesus, Nelma Rezende de Sá, Párbata Araújo Côrtes dos Santos, and Thiago Cavalcante Lima. Transporte público coletivo: discutindo acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. *Psicologia & Sociedade, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil*, 23(3):574–582, 2011.
- Saulo Cirineu Araújo. Controlador de tráfego: semáforo inteligente. *Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FAET, Centro Universitário de Brasília, Brasília/DF, Brasil*, 2006.
- Jerry Banks. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. Wiley-Interscience, 1ª Edição, John Wiley & Sons, 1998.
- Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, and Daniel Krajzewicz. Sumo—simulation of urban mobility: an overview. In *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. ThinkMind, 2011.
- Ministério das Cidades Brasil. Planmob - caderno de referência para elaboração de plano de mobilidade urbana. caderno para orientação aos órgãos gestores municipais na elaboração dos planos diretores de mobilidade urbana, 2007. URL <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Livro-Plano-Mobilidade.pdf>. Acesso em 11 de agosto de 2022.
- Seyit Alperen Celtek, Akif Durdu, and Muzamil Eltejani Mohammed Ali. Real-time traffic signal control with swarm optimization methods. *Measurement, Elsevier*, 166:108206, 2020.

- Christopher A Chung. *Simulation modeling handbook: a practical approach*. 1ª edição, CRC Press, 2003.
- Leonardo Chwif and Afonso Celso Medina. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria & Prática*. Edição do Autor, 2010.
- Conselho Nacional de Trânsito CONTRAN. *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Sinalização Semafórica, Ministério das Cidades, Brasil*, 2014. URL https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-denatran/educacao/publicacoes/manual_vol_v_-2.pdf.
- Carlos Henrique Ribeiro de Carvalho. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) 1606, Brasília, 2011. URL <http://hdl.handle.net/10419/91332>.
- Departamento Estadual de Trânsito Alagoas DETRAN/AL. Anuário de indicadores do detran de alagoas, 2021a. URL <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/anuario-de-indicadores-do-detran-de-alagoas-2011-2012>. Acesso em 20 de maio de 2021.
- Departamento Estadual de Trânsito Alagoas DETRAN/AL. Indicadores de trânsito do estado de alagoas, 2021b. URL <http://indicadores.detrان.al.gov.br/veiculos/>. Acesso em 09 de agosto de 2022.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT. *Manual de estudos de tráfego*, 2006.
- Chaimae El Hatri and Jaouad Boumhidi. Q-learning based intelligent multi-objective particle swarm optimization of light control for traffic urban congestion management. In *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt)*, pages 794–799. IEEE, 2016.
- Valdo Espinheira Fausto Filho et al. Diagnóstico de trânsito em espaço intra-urbano: estudo de caso do eixo viário fernandes lima. *Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas*, 2018.
- Francisco Coelho Citó Feitosa. Um estudo prático para contagem volumétrica automática de veículos usando visão computacional. *Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás*, 2012.
- Javier Ferrer, Manuel López-Ibáñez, and Enrique Alba. Reliable simulation-optimization of traffic lights in a real-world city. *Applied Soft Computing, Elsevier*, 78:697–711, 2019.

- Régis Thiago Feyh and Marco Aurélio Spohn. Modelo de mobilidade veicular urbano baseado em traços reais de mobilidade. *Revista Brasileira de Computação Aplicada, Universidade de Passo Fundo, Brasil*, 10(1):30–42, 2018.
- Gregório Eduardo Floriani et al. Análise de propostas para melhoria do tráfego de uma região central utilizando o software de simulação sumo. *Centro Tecnológico de Joinville, Engenharia de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina*, 2017.
- Raul Galvan-Correa, Mauricio Olguin-Carbajal, Juan Carlos Herrera-Lozada, Jacobo Sandoval-Gutierrez, José Félix Serrano-Talamantes, Rodrigo Cadena-Martinez, and Carlos Aquino-Ruíz. Micro artificial immune system for traffic light control. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Applied Sciences*, 10(21):7933, 2020.
- Jose Garcia-Nieto, Ana Carolina Olivera, and Enrique Alba. Optimal cycle program of traffic lights with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 17(6):823–839, 2013.
- Eric Wilian Lage Gonzaga. Otimização da programação semaforica com base em modelos matemáticos. *Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais*, 2016.
- Wenbin Hu, Huan Wang, Liping Yan, and Bo Du. A swarm intelligent method for traffic light scheduling: application to real urban traffic networks. *Applied Intelligence*, 44(1):208–231, 2016.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Senso, 2010. URL <https://censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em 22 de maio de 2021.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Dados estimativos pesquisa nacional de saúde (pns), 2019. URL <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9160-pesquisa-nacional-de-saude.html>. Acesso em 10 de maio de 2021.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Dados estimativos da cidade de maceió, 2021. URL <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>. Acesso em 18 de julho de 2022.
- Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. Recent development and applications of sumo-simulation of urban mobility. *International journal on advances in systems and measurements, Citeseer*, 5(3&4), 2012.
- Averill M Law, W David Kelton, and W David Kelton. *Simulation modeling and analysis*. 3ª Edição, McGraw-Hill, New York, 2000.
- Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and

- Evamarie WieBner. Microscopic traffic simulation using sumo. In *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, Hawaii, USA*, pages 2575–2582. IEEE, 2018.
- Secretaria Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) Maceió. Smtt registra redução no tempo médio de viagem dos ônibus, 2021. URL <https://maceio.al.gov.br/noticias/smtt/smtt-registra-reducao-no-tempo-medio-de-viagem-dos-onibus>. Acesso em 11 de agosto de 2022.
- Daniel Mattei et al. Análise de propostas para diminuição do congestionamento em trecho da rua dona francisca em joinville utilizando o software de simulação sumo. *Engenharia de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina*, 2019.
- Pascal Neis, Dennis Zielstra, and Alexander Zipf. The street network evolution of crowdsourced maps: Openstreetmap in germany 2007–2011. *Molecular Diversity Preservation International, Future Internet*, 4(1):1–21, 2012.
- Dancho Panovski and Titus Zaharia. Simulation-based vehicular traffic lights optimization. In *2016 12th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*, pages 258–265. IEEE, 2016.
- C Dennis Pegden, Randall P Sadowski, and Robert E Shannon. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. 2nd edition, McGraw-Hill New York, 1995.
- Reuven Y Rubinstein and Dirk P Kroese. *Simulation and the Monte Carlo method*. 3rd ed., A John Wiley & Sons, inc., Hoboken, New Jersey, 2017.
- Daliana Bandeira Luz Monteiro Santos. Procedimento para a construção dos conjuntos fuzzy utilizados em controladores semaforicos. *Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília*, 2003.
- Juliana B Santos, Luciana Dos Santos, Maiara Da S Cruz, Mariana S. Delfino, and Sérgio Da S Santos. Considerações sobre a mobilidade urbana em maceió. 4º Fórum Habitar, 2017. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- CPRM Serviço Geológico do Brasil. Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros pinheiro, mutange e bebedouro, maceió (al): volume i, relatórios técnicos. Technical report, CPRM, 2019.
- SM Pa Siddharth and Gitakrishnan Ramadurai. Calibration of vissim for indian heterogeneous traffic conditions. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, Elsevier*, 104:380–389, 2013.
- Luiz Gustavo Oliveira da Silva et al. Faixa azul em maceió: avaliação dos ganhos de velocidade dos ônibus por microsimulação do tráfego. *Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas*, 2020.

- David Smith, Soufiene Djahel, and John Murphy. A sumo based evaluation of road incidents' impact on traffic congestion level in smart cities. In *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops*, pages 702–710. IEEE, 2014.
- Secretaria Municipal de Transportes e Trânsito SMTT. Interdição da avenida major cícer de góes monteiro no eixo bebedouro, 2020. URL <http://www.maceio.al.gov.br/2020/12/mutange-avenida-interditada-tera-controle-de-acesso-a-partir-do-dia-12/>. Acesso em 6 de maio de 2021.
- Secretaria Municipal de Transportes e Trânsito SMTT. Implantação da faixa azul em maceió, 2021. URL <http://www.maceio.al.gov.br/smtt/faixa-azul/>. Acesso em 8 de maio de 2021.
- Daniel H Stolfi and Enrique Alba. An evolutionary algorithm to generate real urban traffic flows. In *Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*, pages 332–343. Springer, 2015.

Apêndice A

Diagramas de Intervalos Luminosos

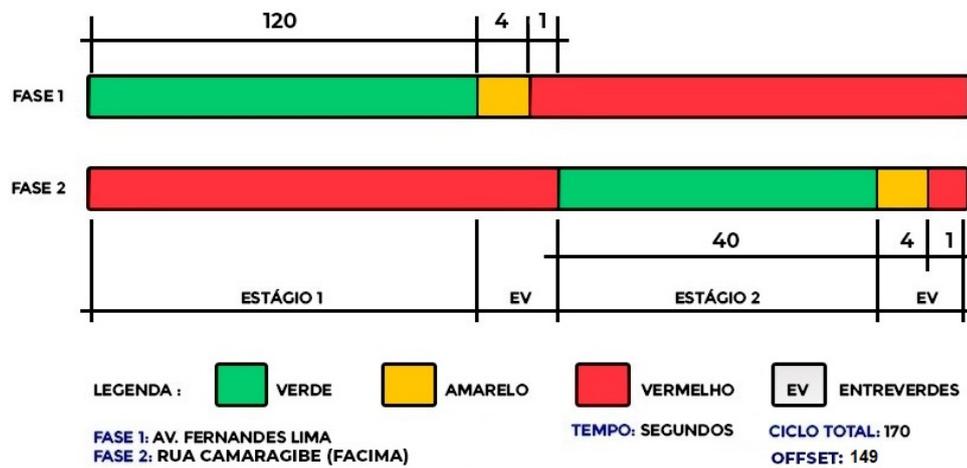


Figura A.1: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Camaragibe (FACIMA) em operação das 04h30 às 14h59.

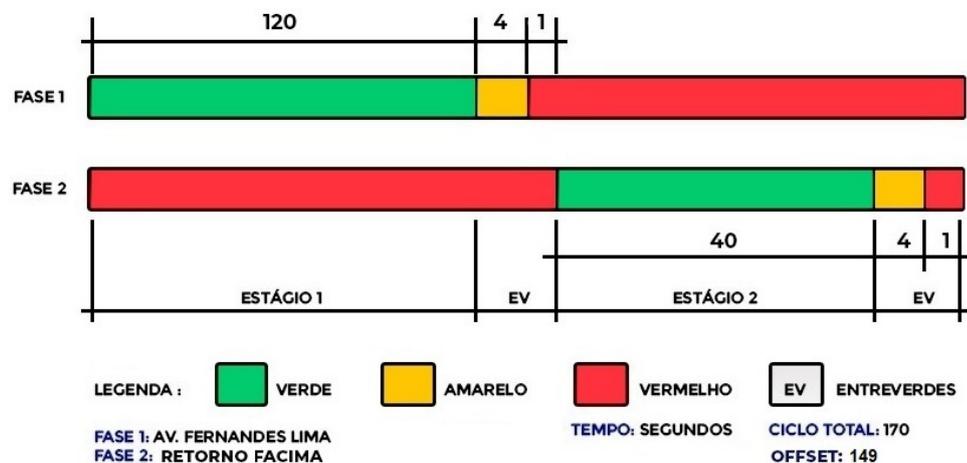


Figura A.2: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Retorno FACIMA em operação das 04h30 às 14h59.

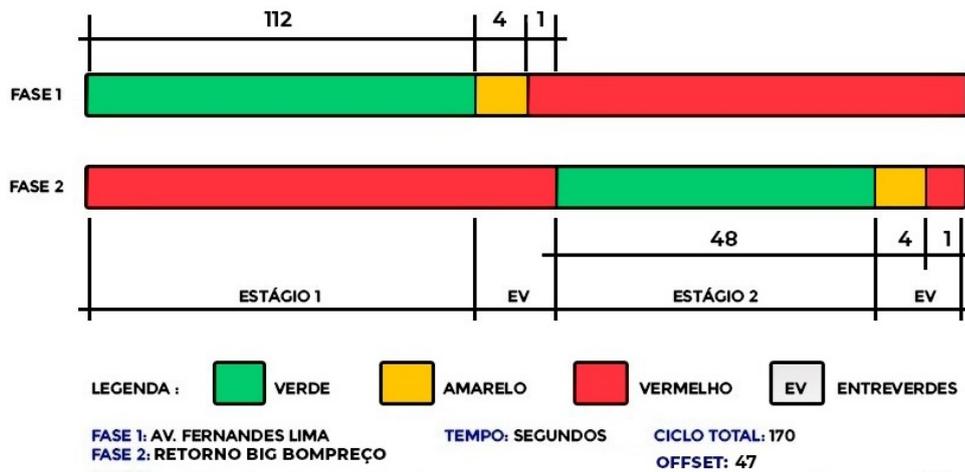


Figura A.3: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Retorno Big Bompreço em operação das 04h30 às 14h59.

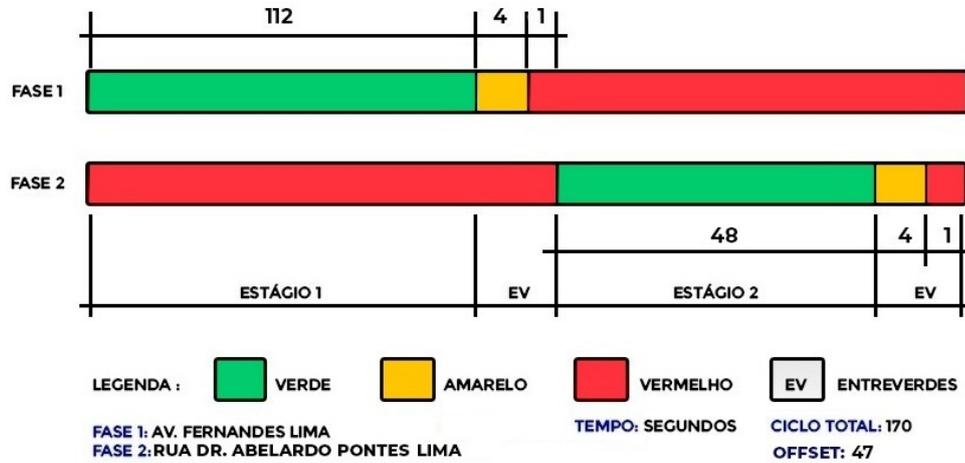


Figura A.4: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Dr Abelardo Pontes Lima em operação das 04h30 às 14h59.

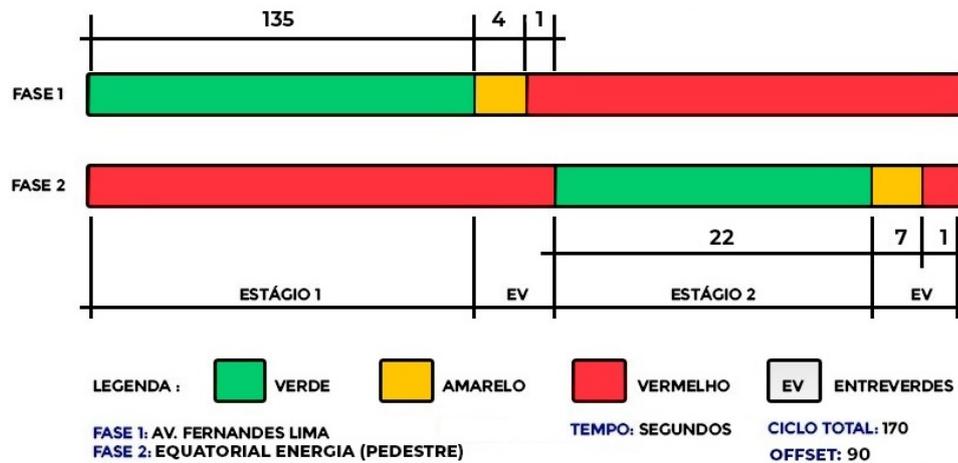


Figura A.5: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Equatorial Energia (Pedestre) em operação das 04h30 às 14h59.

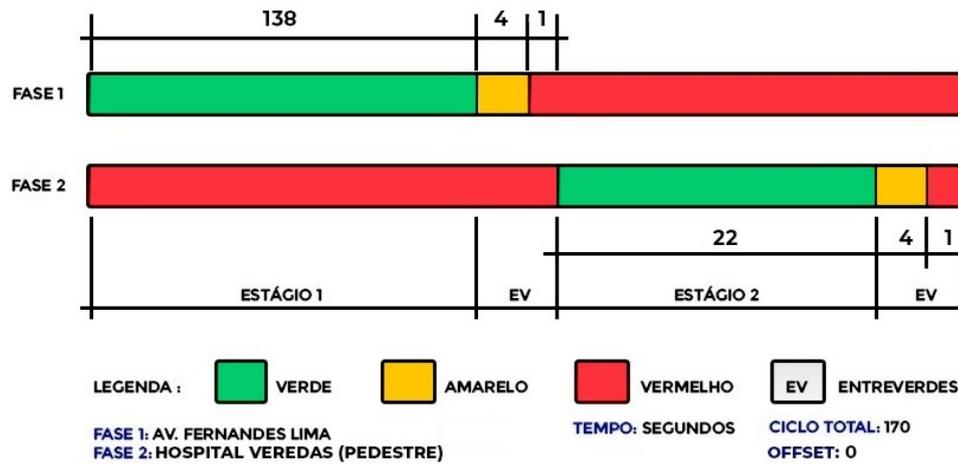


Figura A.6: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Hospital Veredas (Pedestre) em operação das 04h30 às 14h59.

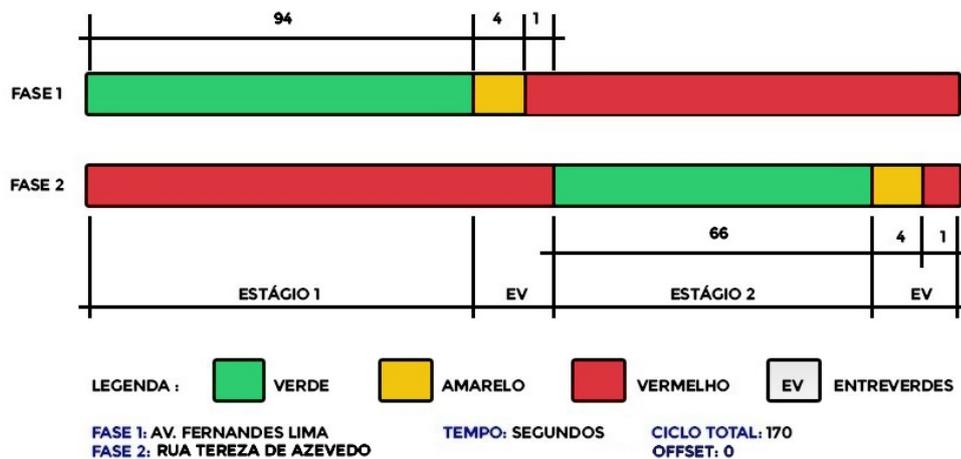


Figura A.7: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Tereza de Azevedo em operação das 04h30 às 14h59.

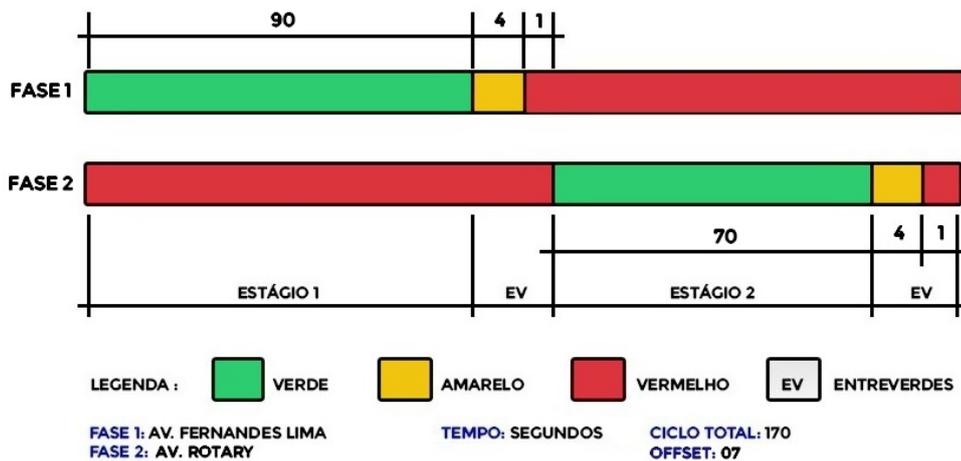


Figura A.8: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Avenida Rotary em operação das 04h30 às 14h59.

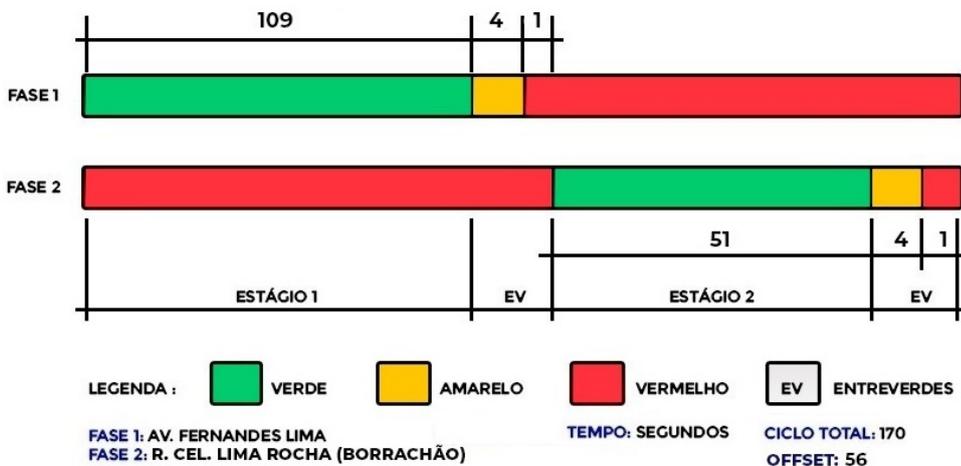


Figura A.9: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Cel Lima Rocha em operação das 04h30 às 14h59.

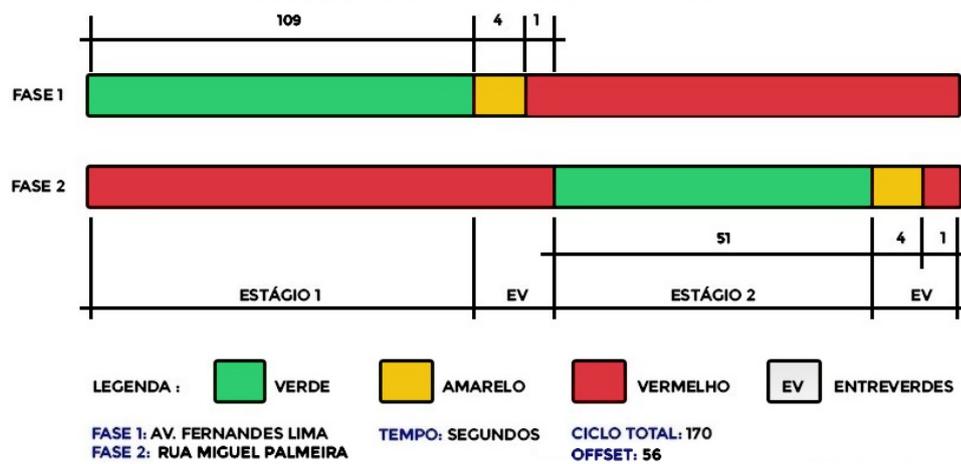


Figura A.10: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Miguel Palmeira em operação das 04h30 às 14h59.

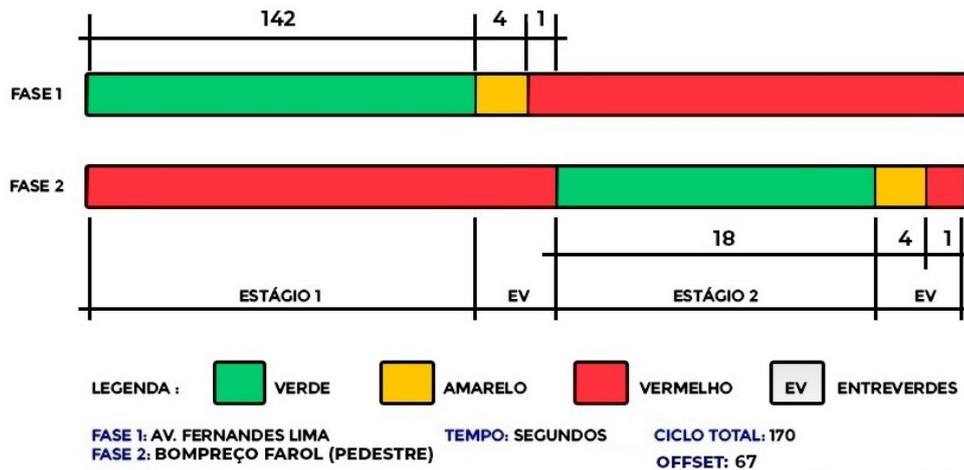


Figura A.11: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Bompreço Farol (Pedestre) em operação das 04h30 às 14h59.

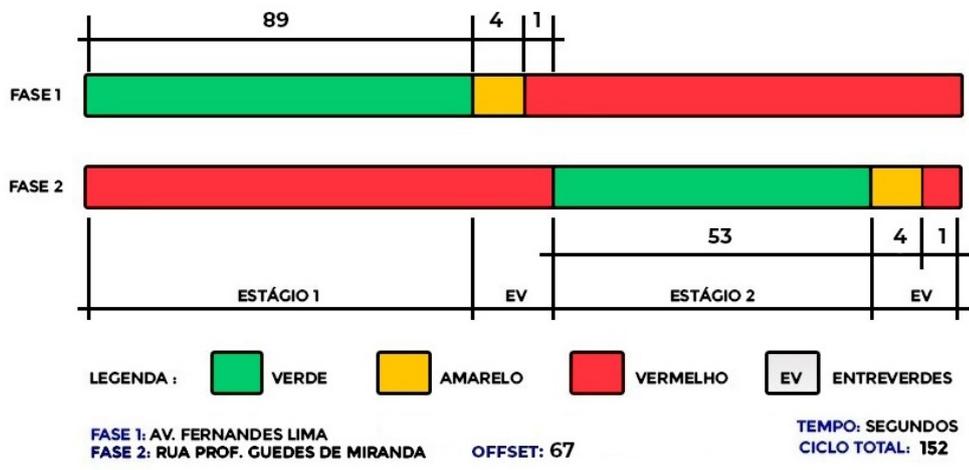


Figura A.12: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Prof Guedes de Miranda em operação das 04h30 às 14h59.

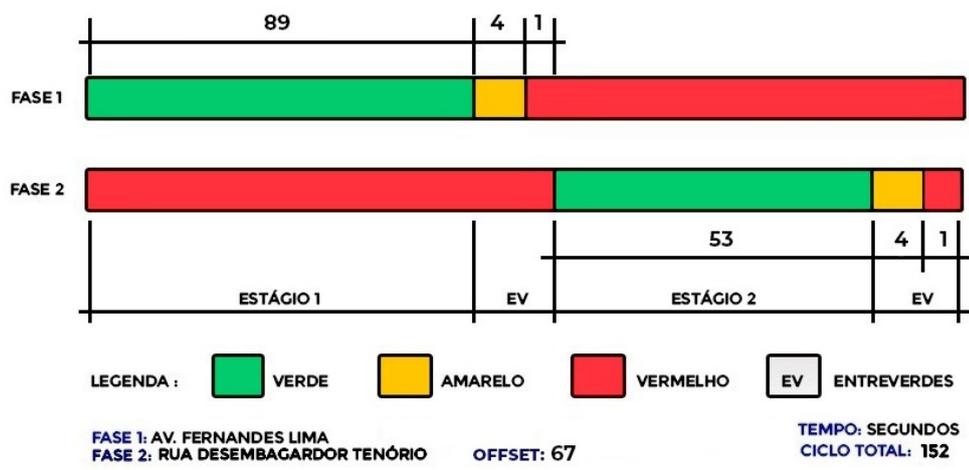


Figura A.13: Diagrama de Intervalos Luminosos Avenida Fernandes Lima x Rua Desembargador Tenório em operação das 04h30 às 14h59.

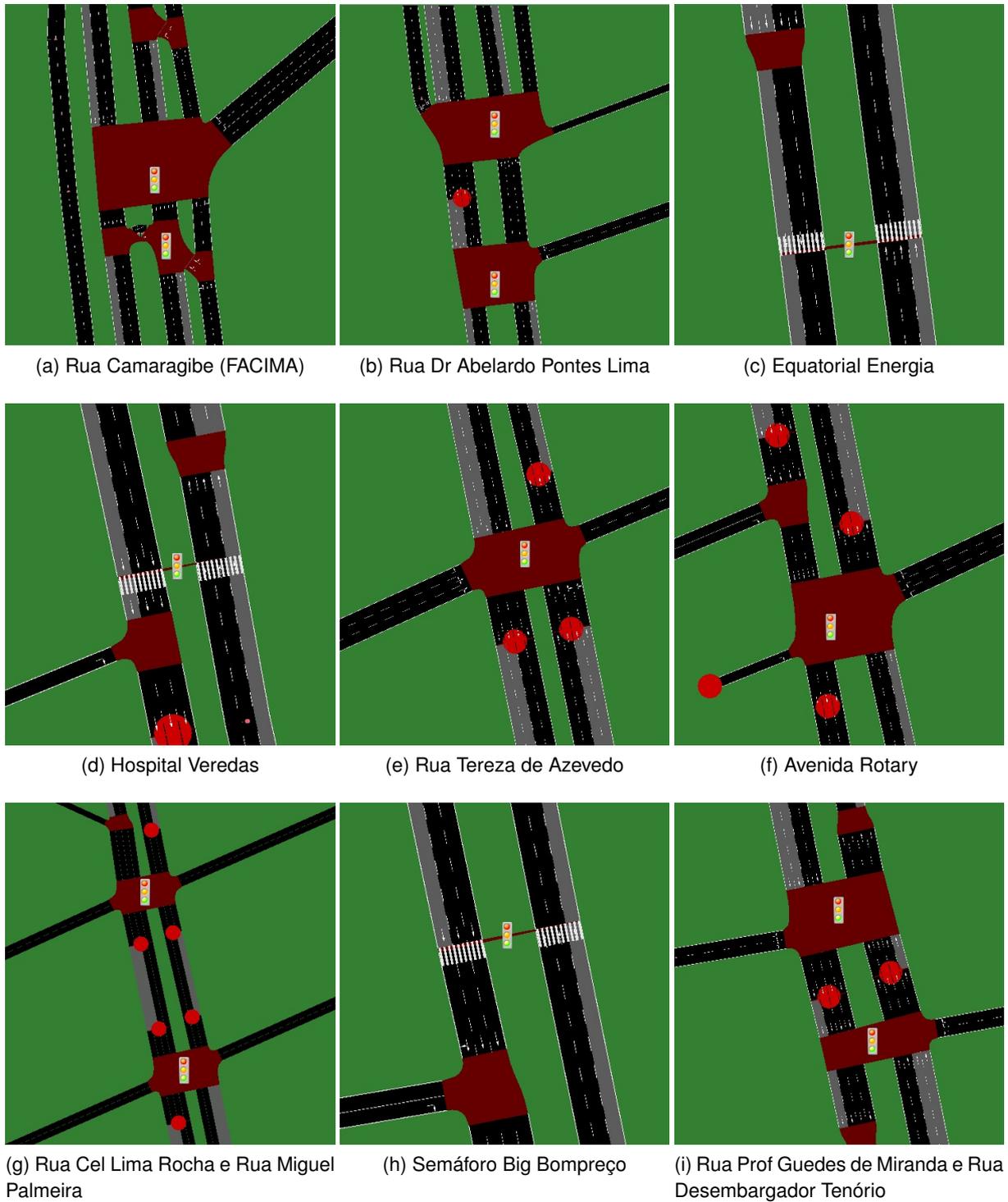


Figura A.14: Interseções Semafóricas presentes na avenida Fernandes Lima observadas na ferramenta Nedit.