

Luann Marques Luna

**Estudo de Melhorias Viárias na Rotatória do
Calhau em São Luís-MA: Uma abordagem por
simulação**

São Luís

2017

Luann Marques Luna

Estudo de Melhorias Viárias na Rotatória do Calhau em São Luís-MA: Uma abordagem por simulação

Monografia apresentada ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Maranhão

Departamento de Informática

Ciência da Computação

Orientador: Mário Antonio Meireles Teixeira

São Luís

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Luna, Luann.

Estudo de Melhorias Viárias na Rotatória do Calhau em São Luís-MA : uma abordagem por simulação / Luann Luna. - 2017.

51 f.

Orientador(a): Mário Teixeira.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

1. Micro-simulação. 2. Simulação. 3. SUMO. 4. Trânsito. I. Teixeira, Mário. II. Título.

Luann Marques Luna

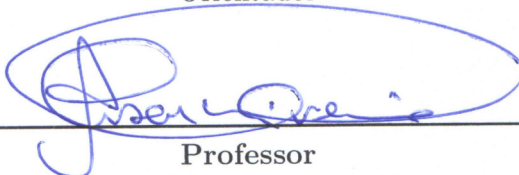
Estudo de Melhorias Viárias na Rotatória do Calhau em São Luís-MA: Uma abordagem por simulação

Trabalho de Conclusão apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Ciência da Computação

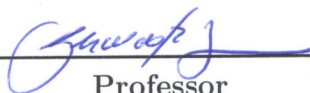
Trabalho aprovado. São Luís, 14 de fevereiro de 2017:



Mário Antonio Meireles Teixeira
Orientador



Professor
Alexandre César Muniz de Oliveira



Professor
Geraldo Braz Júnior

São Luís
2017

*Este trabalho é dedicado a minha família,
que sempre acreditou em mim e no meu potencial.*

Agradecimentos

Agradeço a minha família, pelo apoio que me dão, por acreditar em mim e no meu potencial. Agradeço a minha mãe, Giselle, pelas noites em claro, cuidando de mim, da minha saúde, da minha segurança. Ao meu pai, Edvaldo, por ser um exemplo para mim, exemplo de vida, de luta. A minha irmã, por sempre me ajudar nas dúvidas, pelas conversas, pelas brincadeiras. Agradeço a minha namorada, Rosângela, pelo companheirismo, por sempre me ficar me lembrando da monografia e por está ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Mário, pela oportunidade, pelos conselhos e por acreditar no potencial do meu trabalho. Agradeço também aos meus amigos, pelas horas de diversão, descontração, por conselhos, pelas rodas de estudos, por tirar aquela dúvida em cima da hora da prova. E a todas as pessoas que passaram na minha vida que de uma forma ou outra ajudaram na minha formação e crescimento pessoal e profissional.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

A questão da mobilidade urbana é um dilema enfrentado no espaço geográfico brasileiro, com cada vez mais veículos inchando as ruas das grandes cidades. O constante crescimento no número de veículos promove um inchaço no trânsito, dificultando a locomoção, principalmente nas zonas centrais das cidades. No Brasil, um dos agravantes para a problemática do trânsito é a herança histórica da política rodoviária, gerando um acúmulo nos investimentos para este tipo de transporte em detrimento a outras formas de locomoção. Aumentando a presença de veículos pesados, que dificultam ainda mais a fluidez do trânsito¹.

Neste trabalho é estudada uma ferramenta na tomada de decisão tática e operacional na gestão do trânsito através de micro-simulação. Os resultados da micro-simulação auxiliam na avaliação de viabilidade de modificação e cálculo dos impactos, benéficos ou não no trânsito.

Uma rotatória localizada na cidade de São Luís é simulada, onde são apresentados quatro cenários alternativos com modificações que visam a melhoria no fluxo de veículos. Os resultados são apresentados e comparados aos obtidos com a simulação do cenário original. É levado em consideração o tempo dos veículos no sistema, o tempo em fila e o tamanho médio das filas.

Palavras-chaves: Simulação. SUMO. Micro-simulação. Filas.

¹ <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/mobilidade-urbana.htm>

Abstract

The issue of urban mobility is a dilemma faced in Brazilian geographic space, with more and more vehicles swelling the streets of large cities. The constant growth in the number of vehicles promotes a traffic swell, hindering the locomotion, mainly in the central zones of the cities. In Brazil, one of the aggravating factors for the traffic problem is the historic legacy of the highway policy, generating an accumulation in the investments for this type of transport in detriment to other other forms of locomotion. Increasing the presence of heavy vehicles, which further hinder the flow of traffic.

In this work a tool is studied in the technical and operational decision making in the traffic management through micro-simulation. The results of the micro-simulation help in the evaluation of the feasibility of modification and calculation of the impacts, beneficial or not in the traffic.

A roundabout located in the city of São Luís is simulated, where four alternative scenarios are presented with modifications that aim to improve the flow of vehicles. The results are presented and compared to those obtained with the simulation of the original scenario. It takes into account the time of the vehicles in the system, the time in queue and the average size of the queues.

Key-words: Simulation. SUMO. Micro-simulation. Queues.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Car-Follow	26
Figura 2 – Modelos de malhas viárias abstratas possíveis de serem criadas no SUMO.	28
Figura 3 – Métodos suportados para geração de demanda.	29
Figura 4 – Exemplo de fila com seus componentes.	30
Figura 5 – Estrutura de uma fila.	31
Figura 6 – Canal único, atendimento único.	33
Figura 7 – Canal único, atendimento múltiplo.	33
Figura 8 – Canal múltiplo, atendimento único.	33
Figura 9 – Canal múltiplo, atendimento múltiplo.	34
Figura 10 – Modelo de descrição de edge	38
Figura 11 – Modelo de descrição de veículo	39
Figura 12 – Modelo de descrição de veículo	39
Figura 13 – Modelo de descrição de interseções	40
Figura 14 – Visualização da Rotatória do Calhau pelo Open Street Map	40
Figura 15 – Ferramenta de edição JOSM	41
Figura 16 – Visualização do Cenário I no simulador SUMO	43
Figura 17 – Visualização do Cenário II no simulador SUMO	44
Figura 18 – Visualização do Cenário III no simulador SUMO	45
Figura 19 – Visualização do Cenário III no simulador SUMO	46
Figura 20 – Visualização do Cenário IV no simulador SUMO	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distribuições de probabilidade utilizadas nas taxas de chegada de clientes	32
Tabela 2 – Taxa de atendimento de clientes no sistema de filas	32
Tabela 3 – Resultados do Cenário I	43
Tabela 4 – Resultados do Cenário II	44
Tabela 5 – Resultados do Cenário III	45
Tabela 6 – Resultados do Cenário IV	46
Tabela 7 – Resultados do Cenário V	47

Lista de quadros

Quadro 1 – Principais vantagens da simulação de tráfego	22
Quadro 2 – Principais desvantagens da simulação de tráfego	22

Lista de abreviaturas e siglas

SUMO	Simulation of Urban MObility
OSM	Open Street Map
JOSM	Java Open Street Map
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
EUA	Estados Unidos da América

Lista de símbolos

Δ	Letra grega Delta
Λ	Letra grega Lambda
μ	Letra grega Mu
τ	Letra grega Tau

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivos	17
1.2	Métodos	17
1.3	Contribuições	17
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	Fundamentação Teórica	19
2.1	Trabalhos Relacionados	19
2.1.1	Validação de Modelo	19
2.1.2	Controle de Tráfego	19
2.1.3	Intervenções tipo rotatória	19
2.2	Engenharia de tráfego	20
2.2.1	O Homem	20
2.2.2	O Veículo	20
2.2.3	A via	21
2.2.3.1	Classificação das vias	21
2.3	Simulação de tráfego	21
2.3.1	Classificação dos modelos de tráfego	22
2.3.1.1	Lógica Estrutural	22
2.3.1.2	Nível de Agregação	23
2.3.1.3	Escala Temporal	23
2.3.1.4	Variabilidade Aleatória	23
2.3.1.5	Mudança de Estado	24
2.3.1.6	Flexibilidade do Tráfego	24
2.3.2	Nível de Agregação dos Modelos	24
2.3.3	Modelo de Simulação Macroscópico	24
2.3.3.1	Fluxo ou Volume (q)	25
2.3.3.2	Concentração ou Densidade (k)	25
2.3.3.3	Velocidade (v)	25
2.3.4	Modelo de Simulação Microscópico	25
2.3.4.1	Modelo Car Following	26
2.3.5	Simulation of Urban MObility (SUMO)	27
2.3.5.1	Gerando Malha Viária	27
2.3.5.2	Atribuição de demanda	28
2.4	Open Street Map	30

2.4.1	JOSM	30
2.5	Teoria das Filas	30
2.5.1	Estrutura Básica de um Sistema de Fila	31
2.5.2	Fonte de Clientes	31
2.5.3	Chegada de Clientes	32
2.5.4	Posto de atendimento	32
2.5.5	Disciplinas das Filas ou Processo de Seleção	34
2.5.6	Modelos Básicos de Filas	34
2.5.6.1	Processo de Nascimento e Morte	35
2.5.7	Medidas de Desempenho	35
3	Metodologia e Algoritmos	37
3.1	Ambiente de Teste	37
3.1.1	Hardwares e softwares utilizados	37
3.1.2	Experimentos de Simulação	37
3.1.2.1	Parâmetros de entrada	37
3.1.2.2	Geração das demandas	38
3.1.2.3	38subsubsection.3.1.2.3	
3.1.2.4	Descrição das características dos veículos e rotas	38
3.1.2.5	Descrição das características das intersecções e junções in- ternas	39
3.2	Modelagem das Redes	40
3.2.1	Aquisição do Cenário Original	40
3.2.2	Importando malha viária	41
4	Experimentos Realizados e Resultados	42
4.1	Experimentos realizados	42
4.2	Resultados	42
4.2.1	Cenário I (Original)	42
4.2.2	Cenário II (Adição de um Viaduto)	43
4.2.3	Cenário III (Adição de Túnel)	44
4.2.4	Cenário IV (Adição de um Viaduto)	45
4.2.5	Cenário V (Combinação dos cenários III e IV)	46
	Conclusão	48
	Referências	50

1 Introdução

Modelagem do fluxo de veículos na infra-estrutura viária é uma ferramenta fundamental para análise do desempenho de novas estratégias e políticas de gerência e controle de tráfego idealizadas para potencializar a eficiência do sistema de transportes. Variáveis inerentes ao sistema acabam gerando uma grande complexidade quando avaliadas alternativas visando otimizar o funcionamento (MAIA, 2007).

Estudos para o dimensionamento adequado da malha de trânsito urbana tanto nas grandes cidades quanto nas de médio porte são fundamentais para se garantir a fluidez e a coerência no tráfego interno dos municípios. O planejamento da malha urbana, torna-se um elemento chave na determinação dos parâmetros que compõem a dinâmica do tráfego urbano, quais sejam: velocidade, fluxo, capacidade, segurança (de pedestres e motoristas) dentre outras. Assim, as interseções não sinalizadas do tipo rotatória tem sido amplamente utilizadas nos projetos de malha viária por proporcionar como prioridade básica a redução do nível de acidentes graves, seja pela redução da velocidade ou pela diminuição de pontos de conflito veículo-veículo (MONTALVÃO, 2010) .

No Brasil existem três dispositivos rodoviários em nível tipo rotatória ou semi-rotatória: semi-rotatória com prioridade para a via principal, rotatória com prioridade para a via principal e rotatória com prioridade a via circular, ou simplesmente rotatória (JUNIOR et al., 2014). Este trabalho trata de uma problemática envolvendo uma interseção do tipo rotatória com prioridade para a via circular. Localizada na cidade de São Luís, a rotatória do calhau é uma interseção das vias arteriais: Av. dos Holandeses, Av. Colares Moreira e Av. Carlos Cunha. Existem sinais de “PARE” nas aproximações, fazendo com que o motorista reduza a velocidade ou pare. A passagem pela interseção depende de um intervalo entre veículos no fluxo principal, o que é ideal para locais onde o volume de veículos nas aproximações não é elevado, reduzindo a formação de filas e os riscos de acidentes.

Existe uma diversidade de abordagens que vêm sendo utilizadas no estudo e no tratamento do fluxo dos volumes de tráfego nesse tipo de interseções, e que dependem das particularidades de cada realidade: conversação de fluxo e redundância de dados para estimar os fluxos de manobras; suposição de máxima verossimilhança; utilização de tempos de viagens entre detectores a fim de identificar o progresso temporal das regularidades de tráfego em toda a sequência de detectores (MONTALVÃO, 2010). Segundo Vaiana e Gallelli (2008), a simulação de operações de tráfego em rotatórias frequentemente apresenta diversas dificuldades, pois não é simples definir todas as características relativas à geometria e ao comportamento dos usuários.

1.1 Objetivos

Face ao exposto, este trabalho tem por objetivo apresentar modelos de simulação para uma sistema viário composto por uma rotatória bem como os resultados da experimentação, rotatória esta localizada na cidade de São Luís.

Espera-se desenvolver uma abordagem viável que possibilite a minimização do tempo em fila dos veículos que necessitam acessar a rotatória.

Indiretamente, a aplicação dessas estratégias em um sistema de trânsito real permitiriam uma melhora no fluxo de veículos, uma diminuição no gasto de combustíveis ao usuário final e menor impacto ambiental, com a redução de poluição urbana visto que os veículos ficam menos tempo parados com o motor ligado.

1.2 Métodos

O experimento proposto consiste em:

- Simular o cenário relativo a rotatória do Calhau;
- Criar quatro cenários alternativos para a rede simulada;
- Criar a demanda de veículos que irão circular pelas vias;
- Realizar diversos testes, onde serão mantidos fixos alguns parâmetros (número de veículos na simulação) e variados outros fatores (taxa de chegada);
- Analisar os resultados obtidos.

1.3 Contribuições

Ao final deste trabalho são deixadas as seguintes contribuições:

- Disseminar a utilidade da micro-simulação de tráfego veicular na avaliação de alternativas de intervenções físicas e operacionais na malha viária urbana;
- Reforçar a aplicabilidade do uso desta ferramenta na tomada de decisão tática e operacional na gestão do trânsito em São Luís;
- Propor uma modificação na malha viária que comprovadamente tenha um impacto benéfico no trânsito de São Luís.

1.4 Estrutura do Trabalho

A partir deste ponto o trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão apresentados trabalhos relacionados e que formam a base conceitual para os te-

mas abordados; no Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada na resolução do problema, contendo as variáveis envolvidas na simulação, modelagem das redes viárias e sua demanda; no Capítulo 4 será apresentado os experimentos realizados e os resultados obtidos, assim como uma breve análise dos mesmos; e por fim uma breve conclusão do trabalho e algumas ideias para trabalhos futuros sobre este tema apresentado.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados, exemplificando a progressão dos trabalhos ao longo do tempo. Este capítulo se divide em cinco seções; 2.1 aborda trabalhos relacionados com simulação de trânsito; 2.2 são apresentados alguns tópicos relacionados à engenharia de tráfego; na Seção 2.3 informa sobre necessidades da simulação de tráfego; na Seção 2.4 será descrito a ferramenta utilizada para obtenção de mapa Open Street Map; 2.5 serão apresentados trabalhos sobre teoria das filas.

2.1 Trabalhos Relacionados

2.1.1 Validação de Modelo

Em 2007, Maia apresenta etapas de calibração e validação de modelos de meso e micro-simulação de tráfego. Junto com os procedimentos a serem utilizados para potencializar a eficiência e verossimilhança ao cenário real.

2.1.2 Controle de Tráfego

Vecchia (2013) apresenta um trabalho relacionado ao controle de trânsito simulado com a perspectiva de melhorar o sistema semafórico real. Em seu trabalho são apresentados três algoritmos de inteligência artificial aplicados ao sistema semafórico, de forma a torná-lo adaptativo e permitir uma melhoria do fluxo de veículos de um sistema não centralizado.

2.1.3 Intervenções tipo rotatória

Em Vaiana e Gallelli (2008) é apresentado resultados de um amplo levantamento realizado em cenários com rotatória utilizando o simulador VISSIM. Onde cada cenário descreve uma rotatória fixa. Usando as seguintes variáveis: tamanho do tráfego, velocidade de aproximação, velocidade de circulação e zonas de velocidade reduzidas.

Em Peterson et al. (2008), é apresentado um aprendizado sobre a modelagem de uma rotatória em Idaho (EUA). Foi utilizado o modelo de micros-simulação. Peterson et al. (2008) afirma que as lições aprendidas são bastantes genéricas e podem ser aplicadas a modelagem de rotatórias ao redor do mundo. Incluem a calibração, validação de modelo. Além de por que e por que não fazer comparações entre análise de rotatória e controle semafórico.

Montalvão (2010) apresenta um estudo sobre simulação de uma rotatória e análise de desempenho. É selecionado uma abordagem distinta de outras mais comuns na simulação e análise de rotatórias.

Junior et al. (2014) apresenta uma avaliação de intervenções do tipo rotatória usando modelo de micros-simulação de tráfego. Seu trabalho teve objetivo de avaliar intervenções física e operacionais para resolver os problemas de conflitos em uma grande rotatória em Fortaleza na BR-116.

2.2 Engenharia de tráfego

É denominado Engenharia de Tráfego o ramo da Engenharia que se preocupa com o movimento eficiente e seguro das pessoas e bens em uma rede viária. Tem por objetivo o estudo da mobilidade a fim de otimizar o sistema viário garantindo o acesso das pessoas aos locais (COSTA; MACEDO, 2008).

Qualquer perspectiva que se tome, o sistema de transporte tem como elementos principais: o homem, o veículo e a infra-estrutura, suas características serão descritas a seguir.

2.2.1 O Homem

Devido às necessidades de atividades cotidianas, o homem necessita se deslocar para poder desempenhá-las. Assim, há uma necessidade de garantir acesso aos bens e serviços com rapidez, comodidade e segurança para não degradar a qualidade de vida das pessoas. O homem é a variável mais complexa na Engenharia de Tráfego, visto que seu comportamento é formado entre outras coisas pela (NETO, 2016):

- Herança cultural;
- Personalidade;
- Estado físico e mental;
- Quadro econômico-social.

2.2.2 O Veículo

Os veículos são fabricados para diferentes usos, diferenciados por peso, dimensão, manobrabilidade. Os veículos são classificados basicamente em (GOLDNER, 2015):

- Biciclos: motocicletas e bicicletas com ou sem motor;
- Ligeiros: automóveis e veículos de turismo pequenos;
- Pesados: caminhões e ônibus;

- Especiais: tratores agrícolas, máquinas de obras públicas, etc.

2.2.3 A via

Dentre as variáveis, é a mais estável que oferece maior condição de intervenção (GOLDNER, 2015).

2.2.3.1 Classificação das vias

Quanto ao gênero

- Aerovias;
- Dutovias;
- Ferrovias;
- Hidrovias;
- Rodovias.

Quanto à espécie

- Urbana: dentro da área urbana;
- Interurbana: ligando duas áreas urbanas do mesmo município;
- Metropolitana: contidas numa região metropolitana;
- Rurais: com os extremos localizados fora das áreas urbanas.

Quanto à funcionalidade (CBT¹)

- Vias expressas: ligação rápida em escala metropolitana;
- Vias arteriais: ligação em escala metropolitana;
- Vias coletoras: ligação em escala de bairros;
- Vias locais: ligação em escala de unidade de vizinhança.

2.3 Simulação de tráfego

A capacidade de reproduzir efeitos de eventuais mudanças faz com que simulações possam auxiliar no bom entendimento da dinâmica do tráfego e auxiliar na escolha da estratégia mais eficaz a ser adotada. A predição de comportamento é fundamental na definição de estratégias adequadas adotadas para melhoria do tráfego em questão (LIMA, 2007). A seguir são listadas as principais vantagens da simulação de tráfego.

¹ http://www.ctbdigital.com.br/?p=Comentarios&Registro=113&campo_busca=&artigo=60

Quadro 1: Principais vantagens da simulação de tráfego

Permite um melhor entendimento da realidade do sistema estudado
 Permite a realização de experimentos sem qualquer impacto para os usuários do sistema representado.
 Permite a simulação de cenários alternativos diferentes da realidade
 Permite um melhor conhecimento das variáveis envolvidas no problema e das suas relações.
 Tem como resultado de saída informações referenciadas no tempo e no espaço (desagregadas).
 O sistema pode ser estudado em tempo real, tempo estendido ou tempo reduzido.
 Experimentos inseguros podem ser simulados sem riscos para os usuários do sistema real.
 Permite replicar as condições originais para servir como base de comparação entre alternativas.
 Permite estudar os efeitos de mudanças operacionais nos sistemas estudados.
 A demanda pode variar ao longo do tempo e do espaço.

FONTE: (MAIA, 2007)

Apesar de apresentar muitas vantagens, a simulação do tráfego veicular não é a única e, nem sempre, a melhor forma de subsidiar a tomada de decisão no que diz respeito a intervenções na malha viária. A simulação, normalmente, é mais custosa em relação a outras formas de resolução analítica, além de exigir um maior conhecimento do sistema estudado. Assim também são listadas a seguir algumas desvantagens da utilização da simulação.

Quadro 2: Principais desvantagens da simulação de tráfego

Pode existir maneira mais fácil e igualmente eficiente para resolver o problema.
 A simulação pode exigir muito tempo e recursos.
 A simulação pode exigir uma grande quantidade de dados de entrada, que podem ser de difícil obtenção.
 A simulação pode exigir a verificação, calibração e validação do modelo. Se estas etapas não forem realizadas satisfatoriamente, o modelo torna-se inútil.
 O desenvolvimento de modelos de simulação requer o conhecimento de múltiplas disciplinas como: engenharia de tráfego, matemática, física, estatística, computação, entre outras
 Alguns usuários podem utilizar o modelo sem atentar para as suas limitações e premissas.
 Alguns usuários podem utilizar o modelo sem realmente entender a lógica do seu funcionamento, o que pode distorcer o resultado da análise

FONTE: (MAIA, 2007)

2.3.1 Classificação dos modelos de tráfego

Os modelos de tráfegos podem ser classificados em vários aspectos. A seguir, são listados alguns critérios de classificação largamente utilizados.

2.3.1.1 Lógica Estrutural

Segundo Araújo (2003), lógica estrutural é uma forma de operacionalização caracterizada pela fundamentação teórica, matemática e a lógica estrutural do modelo.

Frequentemente caracterizam a natureza estocástica do fluxo de tráfego os modelos de simulação que predizem o desempenho do sistema através de representação das interações temporais e espaciais entre os componentes do sistema. Modelos empíricos estimam o desempenho de sistemas baseados em relações matemáticas formuladas através de análises estatísticas. Através de considerações teóricas (como teoria de filas determinísticas ou probabilísticas), os modelos analíticos calculam o desempenho do sistema.

2.3.1.2 Nível de Agregação

Araújo (2003) define os modelos em nível de agregação em modelos macroscópicos e microscópicos, sendo os modelos macroscópicos tratam o tráfego com baixo nível de detalhamento, onde o tráfego é representado como uma entidade única, e o sistema é descrito através de relações entre fluxo, densidade e velocidade. Já os modelos microscópicos, descrevem tanto as entidades do sistema como suas interações através de um alto nível de detalhamento, pois cada entidade é individualmente representada. Os modelos mesoscópicos apresentam características mistas, constituindo um nível intermediário de agregação. Posteriormente os modelos a nível de agregação serão melhor abordados.

2.3.1.3 Escala Temporal

Classificação em escala temporal descreve como os fenômenos modelados são vinculados ao tempo. Modelos estáticos não representam os diversos estados do sistema assumidos ao longo do tempo. Representam apenas uma condição fixa, que corresponde a um único instante específico ou ao comportamento médio ao longo do tempo. Os modelos dinâmicos consideram o tempo uma variável importante independente no fenômeno modelado. Assim, as mudanças que o sistema sofre, ao longo do tempo, são avaliadas (ARAÚJO, 2003).

2.3.1.4 Variabilidade Aleatória

Modelos determinísticos desprezam a variabilidade aleatória, assim, as variáveis de entrada e saída somente assumem valores médios e agregados. Em modelagem determinística, um dado de entrada vai sempre produzir o mesmo parâmetro de saída. Já em modelagem estocástica, os resultados são estimados através de variáveis aleatórias. Uma variável aleatória pode ser representada através de um valor agregado associado a uma função de probabilidade, onde uma medida de variabilidade também é informada. A modelagem estocástica é utilizada para representar a incerteza de um processo ou para expressar o efeito de uma variável aleatória nos parâmetros de saída (ARAÚJO, 2003).

2.3.1.5 Mudança de Estado

É aplicada somente aos modelos dinâmicos, pois, essa classificação caracteriza como as mudanças da descrição do sistema são vinculadas à variável independente *tempo*. Os modelos discretos descrevem as mudanças no sistema apenas em um instante isolado, assim, assumem que mudanças no estado do sistema ocorrem abruptamente em instantes de tempo afastados. Já os modelos contínuos tratam as mudanças do sistema, ao longo do tempo, como um fenômeno contínuo, descrevendo como o estado do sistema se altera continuamente através do tempo em resposta a estímulos contínuos (ARAÚJO, 2003).

2.3.1.6 Flexibilidade do Tráfego

Modelos de fluxo ininterrupto assumem que não existem causas fixas de atrasos ou interrupções externas na corrente de tráfego. Esses modelos são adequados para representar *freeways* e rodovias rurais. Já os modelos de fluxo interrompido consideram a existência de obstáculos fixos que causam bloqueios temporários e periódicos na corrente de tráfego. Modelos de interseções, modelos de otimização semaforica e demais modelos de redes urbanas constituem um bom exemplo (ARAÚJO, 2003).

2.3.2 Nível de Agregação dos Modelos

Modelar a dinâmica dos fluxos de tráfego para simular sua propagação através de rede de tráfego é uma boa forma de ilustrar a declaração de Minsky, de que um sistema pode ser modelado de várias maneiras diferentes de acordo com propósito do modelador. O fluxo de veículos pode ser modelado macroscopicamente a partir de um ponto de vista baseado em uma analogia de hidrodinâmica, por considerar fluxo de veículos como um processo de fluidos, cujo estado é caracterizado por variáveis macroscópicas: *densidade*, *volume* e *velocidade*. Também pode ser modelado microscopicamente, por um ponto de vista que descreve o processo como um fluxo dinâmico, individual de partículas - veículos - (BARCELÓ et al., 2010).

2.3.3 Modelo de Simulação Macroscópico

A abordagem macroscópica baseia-se na consideração de que as correntes de tráfego são meios contínuos. Seu comportamento é estudado utilizando as Leis da Hidrodinâmica, esta abordagem também é conhecida como Analogia Hidrodinâmica do Tráfego (SILVA, 1994). Nesta abordagem o sistema é descrito pelas grandezas: *densidade* $k(x,t)$, *volume* $q(x,t)$ e a *velocidade* $u(x,t)$ dos veículos, são consideradas como variáveis dependentes do tempo e do espaço (RODRIGUES et al., 2011). A principal equação que representa formalmente esta teoria é a equação da conservação:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

onde q é o volume, x representa a extensão da via, k é a densidade e t o tempo.

2.3.3.1 Fluxo ou Volume (q)

O fluxo, também chamado de volume, é representado pela variável q . É uma variável temporal e significa o número de veículos (n) que cruzam uma determinada seção de uma via (x) considerada dentro de um dado intervalo de tempo (T) (SILVA, 1994):

$$q(x) = \frac{n(x)}{T} \quad (2.2)$$

2.3.3.2 Concentração ou Densidade (k)

A densidade, ou concentração, significa o número de veículos presentes numa determinada extensão de via e é representada por k (SILVA, 1994):

$$k(t) = \frac{N(t)}{X} \quad (2.3)$$

onde $N(t)$ representa o número de veículos em um instante t , X representa o comprimento de um trecho de via.

2.3.3.3 Velocidade (v)

É definida dividindo a equação do volume pela densidade (SILVA, 1994):

$$v = \frac{q(x)}{k(t)} = \frac{X}{T} \times \frac{n(x)}{N(t)} \quad (2.4)$$

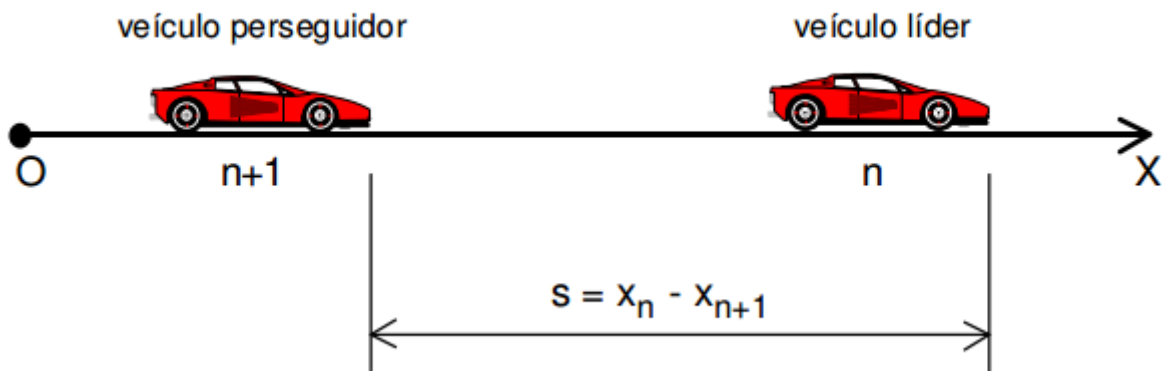
2.3.4 Modelo de Simulação Microscópica

Modelo mais próximo do real por permitir maior detalhamento das características do movimento de cada veículo (VECCHIA, 2013). Na modelagem microscópica, todos os veículos são identificados individualmente. Isto significa, modelar as ações: aceleração, desaceleração e mudança de faixa, para cada veículo (BARCELÓ et al., 2010). A análise microscópica do tráfego foi desenvolvida através dos chamados “modelos de perseguição” ou “leis de sequência” que descrevem o comportamento do veículo como resposta a um estímulo recebido (*car following*) (SILVA, 1994).

2.3.4.1 Modelo Car Following

Experimentos realizados pela General Motors em meados de 1950s, auxiliou no desenvolvimento dos modelos clássicos de perseguição (HERMAN, 1961). Eles buscam traduzir a variação de velocidade de um veículo (*seguidor*) como resposta ao estímulo representado pela velocidade relativa entre ele e o veículo que se desloca a frente, chamado *líder*. A Figura 1 exemplifica o modelo. Este modelo de simulação foi proposto pelo físico Pipes e é chamado *car following*, um dos mais estudados (RODRIGUES et al., 2011).

Figura 1: Car-Follow



FONTE: (SILVA, 1994)

Segundo Rodrigues et al. (2011) a forma geral os modelos *car following* se baseiam na seguinte relação:

$$[Resposta]_n \propto [Estímulo]_n \quad (2.5)$$

Para o n -ésimo veículo ($n = 1, 2, \dots$). Este só poderá acelerar ou desacelerar como resposta a diferentes condições do fluxo. As equações dos modelos de perseguição podem levar em consideração a velocidade do veículo analisado (v_n), a diferença de velocidade entre ele e o líder (Δv_n) e a distância entre estes veículos (d_n), dentre outras. Com isso tem-se representada por (RODRIGUES et al., 2011):

$$\frac{d^2 x_n}{dt^2} = f(v_n(t), d_n(t), \Delta v_n(t)) \quad (2.6)$$

A função f é a função estímulo que assume diferentes interpretações para cada modelo de perseguição. O modelo mais simples é o *seguinto o líder* (*follow-the-leader*) que faz uso somente da diferença entre as velocidades entre o veículo perseguidor e o veículo líder, sendo representado pela seguinte equação (LIMA, 2007):

$$\frac{\partial^2 x_n}{\partial t^2} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{dx_{n+1}}{dt} - \frac{dx_n}{dt} \right) \quad (2.7)$$

onde τ é o parâmetro de configuração da escala de tempo. Pode-se interpretar $\frac{1}{\tau}$ como sendo a sensibilidade do veículo à variação de velocidade do veículo líder.

2.3.5 Simulation of Urban MObility (SUMO)

SUMO é um simulador microscópico, inter e multimodal, espaço-contínuo e tempo-discreto, de tráfego desenvolvido pelo Instituto de Sistemas de Transporte da Agência Aeroespacial Alemã ². SUMO não é apenas um simulador de tráfego, mas um conjunto de aplicações que ajudam a preparar e executar um cenário. A aplicação *SUMO* que vem incluída, usa formato próprio de rodovia e demanda de tráfego, ambos devem ser importados ou gerados (KRAJZEWICZ et al., 2012).

2.3.5.1 Gerando Malha Viária

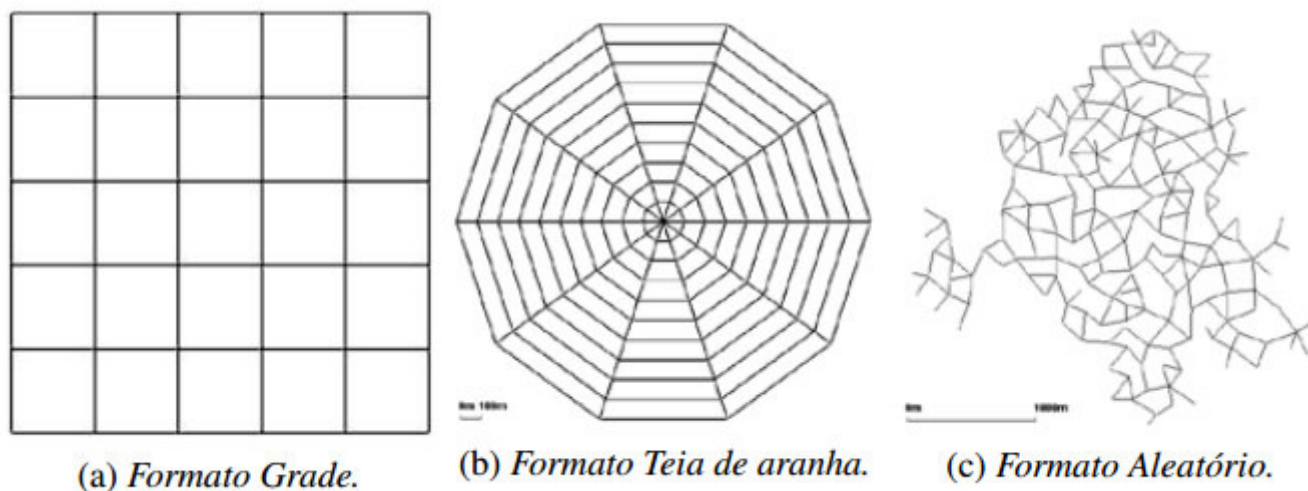
As redes rodoviárias SUMO representam redes do mundo real como grafos, onde os nós são interseções e as estradas são representadas por arestas. Interseções consistem em uma posição, uma forma e regras de permissão. As arestas (edges) são conexões unidirecionais entre dois nós e contém um número fixo de pistas. As pistas contém sua geometria, informações de veículos que tem permissão de passagem, velocidade máxima, etc. Além dessa visão básica sobre uma rede rodoviária, as redes incluem planos de semáforos e ligações entre pistas através de uma intersecção descrevendo quais pistas podem ser utilizadas para alcançar vias subsequentes (KRAJZEWICZ et al., 2012). As redes viárias no SUMO podem tanto ser geradas a partir do aplicativo *NETGENERATE*³ ou importada usando o *NETCONVERT*⁴. *NETGENERATE* consegue construir malhas viárias em três tipos diferentes de formato: tipo Grade (ou *Manhattan*), Teia de aranha e Aleatória (exemplificado em Figura 2). Cada algoritmo gerador possui um conjunto de opções que podem ser ajustadas que permitem alterar as propriedades das vias.

² <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10002/>

³ <http://sumo.dlr.de/wiki/NETGENERATE>

⁴ <http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>

Figura 2: Modelos de malhas viárias abstratas possíveis de serem criadas no SUMO.



FONTE: (VECCHIA, 2013)

2.3.5.2 Atribuição de demanda

O simulador SUMO possui um grande número de ferramentas acopladas que permitem a atribuição de diferentes demandas veicular:

- **Matrizes de Origem-Destino (OD)**⁵: são utilizados para cenários em larga escala. Elas descrevem o movimento entre as chamadas zonas de análise de tráfego (TAZ) em número de veículos por hora. Para uso no SUMO, estas matrizes devem ser desagregadas em viagens individuais, com tempo de partida espalhados ao longo do período de tempo descrito;
- **OD2TRIPS**⁶: uma aplicação que converte matrizes OD para viagens individuais. Com ela pode-se distribuir os veículos uniformemente durante o tempo definido na matriz OD ou em um intervalo padrão para a distribuição dos mesmo. Passando como entrada uma curva de carga horária, divide-se o fluxo diário em fatias de horário mais realistas;
- **JTRROUTER**⁷: Com a ferramenta JTRROUTER é possível adicionar valores de probabilidade permitindo aos veículos fazerem desvios em cada intersecção da malha viária. Assim, veículos que façam suas viagens através de uma malha viária poderá alterar seu trajeto por quaisquer vias a cada nova intersecção. Devida a estocasticidade, pode ocorrer de veículos ficarem presos em laços;
- **Demanda Baseada em Atividade**⁸: Através da descrição de uma população em determinada área. A atribuição de demanda baseada em atividade, permite uma si-

⁵ http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Importing_OD/OD_Matrices

⁶ <http://www.sumo.dlr.de/userdoc/OD2TRIPS.html>

⁷ <http://sumo.dlr.de/wiki/JTRROUTER>

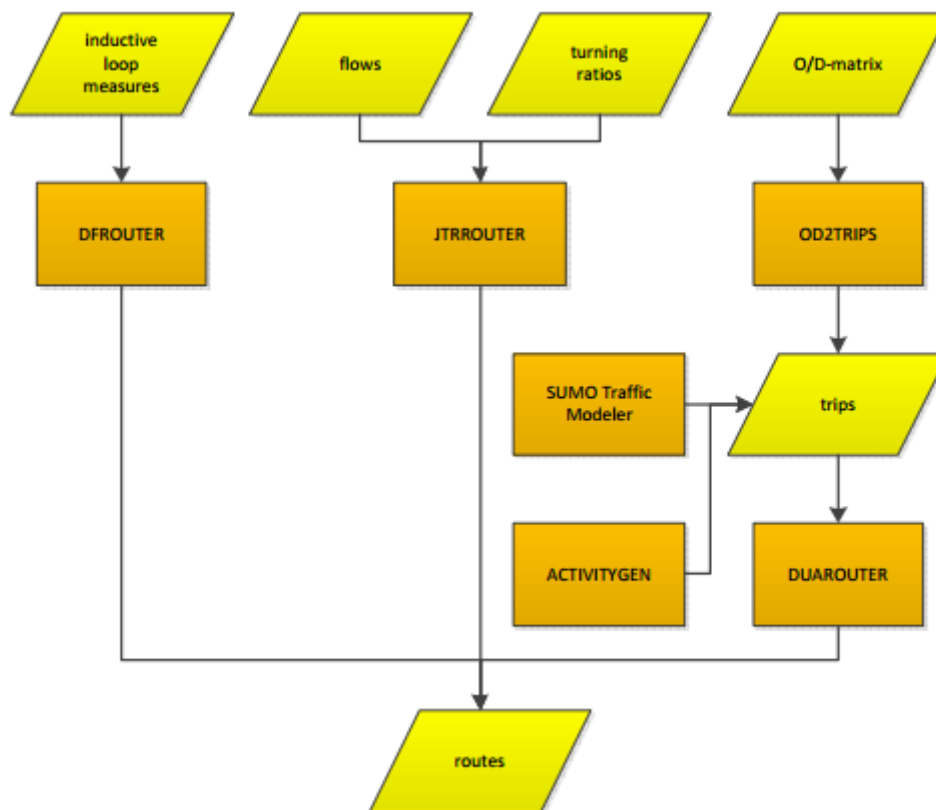
⁸ http://www.sumo.dlr.de/userdoc/Demand/Activity-based_Demand_Generation.html

mulação mais próxima da realidade, podendo incluir populações e interesses, como atividades de trabalho, escolhas, bicicletas, ônibus e pessoas caminhando (VECCHIA, 2013);

- **DUAROUTER**: Utilizando as matrizes OD a ferramenta DUAROUTER gera uma lista de trajetos a serem percorridos para cada veículo através de um algoritmo de caminho mínimo;
- **DUA**⁹: Atribuição Dinâmica de Usuário (DUA), é uma ferramenta do simulador que busca encontrar um equilíbrio da simulação, ou seja, um momento onde nenhuma modificação na rota de cada um dos veículos melhore o seu desempenho (reduza o tempo de viagem em geral).

A Figura 3 exemplifica a forma de geração de demanda através das ferramentas acopladas.

Figura 3: Métodos suportados para geração de demanda.



FONTE: (KRAJZEWICZ et al., 2012)

⁹ http://www.sumo.dlr.de/userdoc/Demand/Dynamic_User_Assignment.html

2.4 Open Street Map

O OpenStreetMap é um projeto colaborativo com o objetivo de fornecer a todos os que o desejam dados geográficos livres e gratuitos tais como mapas de estradas. O projeto foi lançado porque a maioria dos mapas que parecem ser gratuitos têm restrições legais ou técnicas limitando a sua utilização e impedindo-o de as utilizar de forma criativa, produtiva ou inesperada¹⁰. O mapa é disponibilizado sob a licença Open Database License (ODbL), que permite o uso dos dados para fins comerciais desde que haja referência ao projeto OSM e que os dados e as alterações feitas neles também sejam disponibilizadas sob a mesma licença ou outra compatível¹¹.

Para edição do mapa, basta criar uma conta de usuário gratuitamente, realizar as alterações e submetê-las com uma descrição do que foi modificado. Os melhores editores são: JOSM e o Potlatch¹².

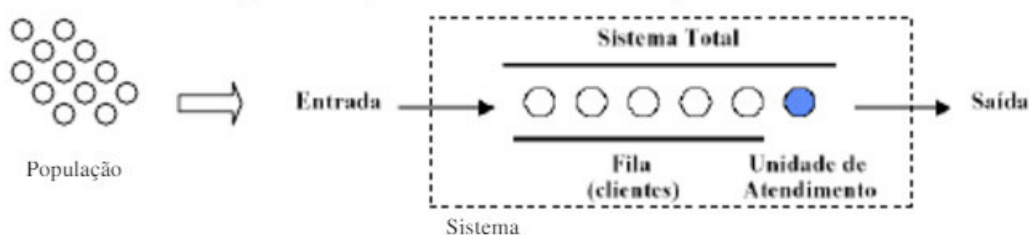
2.4.1 JOSM

JOSM é um aplicativo em desenvolvimento por Immanuel Sholz e atualmente mantido por Dirk Stöcker. O JOSM é um editor em Java com várias funcionalidades avançadas de edição. Dentre suas funcionalidades está a capacidade de importar arquivos GPX, trabalhar com imagens aéreas, suporte a múltiplas projeções cartográficas, camadas, edições de relações, validação de dados, trabalho offline, entre outras¹³.

2.5 Teoria das Filas

Segundo Sucena (2013), Teoria das Filas é uma técnica de Pesquisa Operacional, que trata de problemas de congestionamento de sistema, onde clientes solicitam serviços, estes são limitados por restrições intrínsecas do sistema, gerando assim filas. A Figura 4 exemplifica um sistema de filas e seus componentes.

Figura 4: Exemplo de fila com seus componentes.



FONTE: (SUCENA, 2013)

¹⁰ http://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=Pt:Main_Page&setlang=pt

¹¹ <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Pt:Introduction>

¹² http://wiki.openstreetmap.org/wiki/About_OpenStreetMap

¹³ <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/JOSM>

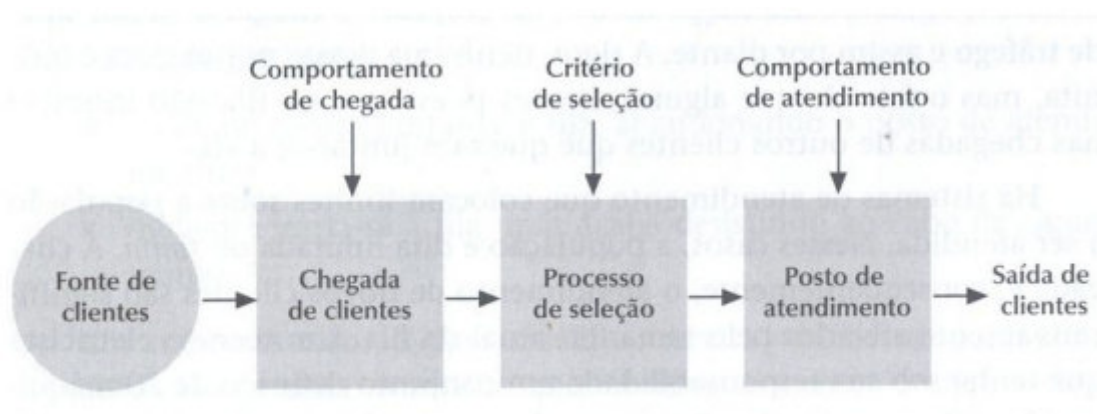
Fogliatti e Mattos (2007) afirmam que teoria das filas consiste na modelagem analítica de processos ou sistemas que resultam em espera e tem como objetivo determinar e avaliar quantidades, denominadas medidas de desempenho, que expressam a produtividade/operacionalidade desses produtos, e de posse destas informações buscar meios para minimizar os impactos negativos das esperas nos processos.

O estudo da Teoria das Filas teve início com o matemático A.K. Erlang (1909) para o problema de congestionamento de linhas telefônicas da Dinamarca. Erlang é considerado por alguns autores como o “pai” da Teoria das Filas, devido seu trabalho ter antecipado por várias décadas os conceitos modernos dessa teoria. Em 1917, publicou o livro “*Solutions of Some Problems in the Theory of Probabilities in Automatic Telephone Exchanges*” documentando sua experiência (MENDONÇA, 2014).

2.5.1 Estrutura Básica de um Sistema de Fila

Segundo Moreira (2011), as filas são estruturadas de acordo com a Figura 5, em quatro partes principais: a fonte de clientes; a chegada de clientes; o processo de seleção; e o posto de atendimento. Clientes são indivíduos de uma população que chegam ao local da prestação de serviço de acordo com um determinado comportamento estatístico. Eles são atendidos de acordo com um critério de seleção preestabelecido e serão atendidos de acordo com características próprias.

Figura 5: Estrutura de uma fila.



FONTE: (MOREIRA, 2011)

2.5.2 Fonte de Clientes

Os clientes pertencem a uma população maior. A fonte pode ser finita ou infinita, sendo infinita quando a probabilidade de chegada não é afetada de forma significativa pelo fato de que alguns clientes já estão na fila. Finita, é quando a probabilidade de chegada é afetada pelo fato de alguns clientes já estarem na fila.

2.5.3 Chegada de Clientes

O processo de chegada dos usuários é especificado pelo comportamento do fluxo de chegadas dos clientes ao sistema. Se forem conhecidos o número de chegadas e os instantes em que eles acontecem, esse processo é dito determinístico, caso contrário tem-se um processo aleatório, que tem um comportamento estocástico, caracterizado por uma distribuição de probabilidade. Esta, é especificada através de um parâmetro denominado taxa de chegada, que representa o número médio de usuários que chegam ao sistema por unidade de tempo (MOREIRA, 2011).

A taxa de chegada é usualmente representada por λ . Há duas formas de falar sobre a chegada de clientes: número de clientes que chegam em um dado intervalo de tempo e o tempo decorrido entre duas chegadas consecutivas. Em teoria das filas, é comum utilizar a distribuição de Poisson para configurar a taxa de chegada.

Tabela 1: Distribuições de probabilidade utilizadas nas taxas de chegada de clientes

Grandezas	Distribuição de chegada	Médias
Número de chegas na unidade de tempo (taxa de chegada)	Poisson	λ
Tempo decorrido entre duas chegadas consecutivas	Exponencial	$1/\lambda$

FONTE: (MOREIRA, 2011)

2.5.4 Posto de atendimento

O processo de atendimento comumente simbolizado por μ é especializado pelo comportamento do fluxo de usuários e sua caracterização é análoga à do processo de chegadas (MOREIRA, 2011). Assim como o modelo de chegada, há duas nomenclaturas usualmente utilizadas: número de atendimentos na unidade de tempo e tempo decorrido entre dois atendimentos consecutivos.

Tabela 2: Taxa de atendimento de clientes no sistema de filas

Grandezas	Distribuição de chegada	Médias
Número de atendimentos na unidade de tempo (taxa de atendimento)	Poisson	μ
Tempo decorrido entre dois atendimentos consecutivos	Exponencial	$1/\mu$

FONTE: (MOREIRA, 2011)

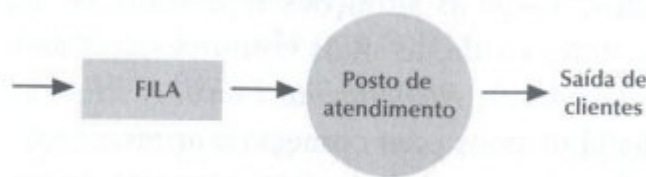
Os modelos de atendimentos podem apresentar diversas configurações: canal único, canal múltiplo, atendimento único, atendimento múltiplo.

- Canal único: configurado por ter apenas uma ponto de atendimento, podendo ou não ter mais pontos em série;

- Canal múltiplo: apresenta mais de um ponto de atendimento em paralelo;
- Atendimento único: consiste na realização do atendimento feita integralmente por um único posto;
- Atendimento múltiplo: é realizado por mais de um ponto de atendimento em serie, dependente de uma da outra.

As imagens a seguir exemplificam a combinação desses conceitos.

Figura 6: Canal único, atendimento único.



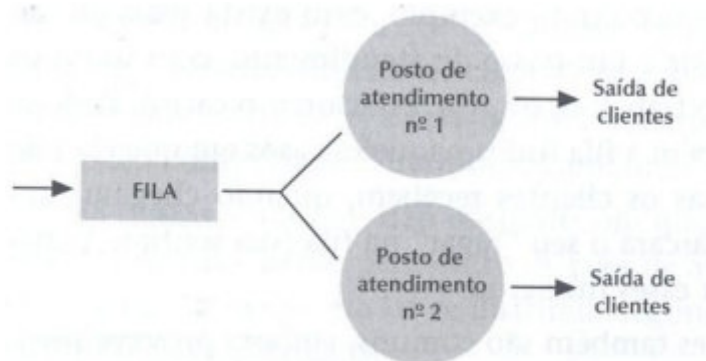
FONTE: (MOREIRA, 2011)

Figura 7: Canal único, atendimento múltiplo.



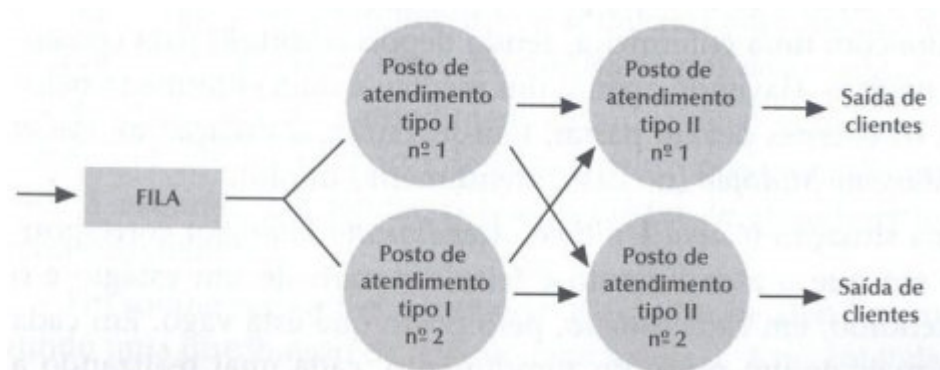
FONTE: (MOREIRA, 2011)

Figura 8: Canal múltiplo, atendimento único.



FONTE: (MOREIRA, 2011)

Figura 9: Canal múltiplo, atendimento múltiplo.



FONTE: (MOREIRA, 2011)

2.5.5 Disciplinas das Filas ou Processo de Seleção

A disciplina de atendimento consiste em um conjunto de regras em que os clientes são selecionados. Os tipos de atendimentos mais comuns são (MENDONÇA, 2014):

- FIFO (*first in - first out*): os usuários são atendidos na ordem das chegadas. Disciplina mais comumente adotada;
- LIFO (*last in - first out*): o último usuário a chegar é o primeiro a ser atendido;
- PRI (*priority service*): o atendimento aos usuários segue uma ou mais prioridades preestabelecidas pela gerência do sistema;
- SIRO (*service in random order*): o atendimento aos usuários segue uma ordem aleatória;
- SPT (*Shortest Processing Time first*): o cliente a ser atendido em primeiro lugar será aquele cujo tempo de atendimento for menor.

2.5.6 Modelos Básicos de Filas

A maior parte dos modelos elementares de filas se baseiam no processo de nascimento e morte (markoviano). Em contexto de teoria das filas, um nascimento corresponde à chegada de um novo cliente e uma morte corresponde à saída de um cliente. Com base nos processos probabilísticos descritos por Fogliatti e Mattos (2007), são apresentados alguns modelos básicos que compõem um sistema de fila:

- Modelo M/M/1/∞/FIFO: Existe um único ponto de atendimento, não existe limitação de capacidade na fila, sendo que a ordem de serviço segue o sistema FIFO;
- Modelo M/M/1/K/FIFO: Existe um único ponto de atendimento, porém existe uma limitação de espaço para a área da fila, a ordem de serviço segue o sistema FIFO. A taxa de ingresso ao sistema (λ) se difere da taxa de chegada λ para $n \geq K$, pela existência de uma limitação de capacidade (K);

- Modelo M/M/C/∞/FIFO: Existem “C” postos de atendimentos, não existe limitação de capacidade na fila e a ordem de serviço segue o sistema FIFO;
- Modelo M/M/C/K/FIFO: Existe “C” postos de atendimento, existe uma limitação de capacidade no espaço da fila e a ordem de serviço segue o sistema FIFO. A taxa de ingresso ao sistema (λ) se difere da taxa de chegada λ para $n \geq K$, pela existência de uma limitação de capacidade (K).

2.5.6.1 Processo de Nascimento e Morte

Fogliatti e Mattos (2007) afirmam que uma Cadeia de Markov homogênea, irreduzível, de parâmetro contínuo, é denominada Processo de Nascimento e Morte (*Birth-Death Process*) para todo $n > 0$ se,

$$P(n, n + 1) = \lambda_n \quad (2.8)$$

$$P(n, n - 1) = 1 - \lambda_n = \tau_n \quad (2.9)$$

$$P(n, k) = 0, \text{ para qualquer } k \neq n - 1, n + 1 \quad (2.10)$$

Em outras palavras, as únicas transições permitidas, em uma unidade de tempo, a partir de um determinado estado n são para seus vizinhos imediatos $n-1$ ou $n+1$. Quando a transição ocorre para estado $n+1$ representa um nascimento, e para $n-1$, uma morte (MENDONÇA, 2014).

2.5.7 Medidas de Desempenho

Segundo Fogliatti e Mattos (2007) e Mendonça (2014), teoria das filas permite avaliar a eficiência de um sistema por meio da análise de suas características utilizando medidas operacionais/desempenho. Estas, na maioria das vezes, mudam ao longo do tempo, sendo então representadas por variáveis aleatórias, cujos valores esperados podem ser utilizados como medidas de desempenho do sistema no regime estacionário. Dentre estas, podemos citar:

- Número médio de usuários na Fila (L_q) e no sistema (L);
- Tempo médio de espera de um usuário qualquer na fila (W_q);
- Tempo médio de permanência de um usuário qualquer no sistema (W);
- Taxa de utilização do servidor; é uma medida de congestionamento do sistema, ρ .

Outras medidas que caracterizam o sistema são:

- Probabilidade de se ter no máximo um número n_0 pré-fixado de usuários no sistema, $P(N \leq n_0)$;

- Probabilidade de um usuário qualquer ter que aguardar mais do que um determinado tempo t na fila, $P(T_q > t)$;
- Probabilidade de se ter algum servidor ocioso em um sistema com c postos de atendimento, $P(N < c)$;
- Probabilidade de que haja mais de k clientes na fila, $P(N > k)$.

3 Metodologia e Algoritmos

Este capítulo descreve a metodologia empregada. São apresentados na Seção 3.1 as características relacionadas à máquina utilizada na execução dos experimentos e ao ambiente de simulação. Na Seção 3.2 são apresentados os passos para geração dos mapas viários utilizados no simulador e suas demandas.

3.1 Ambiente de Teste

3.1.1 Hardwares e softwares utilizados

Para os testes executados foram utilizados dois computadores, possuindo as seguintes características de hardware: Intel®Core™ i7-4500U de 64 bits com CPU @ 1.80GHz, 8GB de memória RAM; Intel®Core™ i7-5500U de 64 bits com CPU @ 2.40GHz, 8GB de memória RAM

Os sistemas operacionais utilizados foram: Ubuntu 16.10 64-bit e Windows 10 64-bit Home Edition respectivamente. Alguns scripts foram desenvolvidos para automatizar determinadas tarefas, eles foram desenvolvidos com linguagem de programação Python na versão 3.5

3.1.2 Experimentos de Simulação

O simulador utilizado foi o SUMO descrito anteriormente. Foi utilizado a versão 0.28.0 por ser a versão mais atual disponível até a data dos experimentos.

3.1.2.1 Parâmetros de entrada

Cada simulação recebe os seguintes parâmetros ao ser executada:

- Um arquivo contendo o mapa viário;
- Um arquivo contendo as rotas dos veículos;
- Um arquivo adicional de polígonos como construções, rios, etc.;
- Taxa de probabilidade de um veículo recalculer sua rota;
- Nome referente ao arquivo de saída das viagens;
- Nome referente ao arquivo de saída das filas.

3.1.2.2 Geração das demandas

Devido a dinamicidade do fluxo de veículos em uma determinada via, percebeu-se a necessidade de gerar um novo fluxo para cada simulação. Assim, utilizou-se de um script em Python¹, *RandomTrips.py*, para gerar uma nova carga. Este arquivo está disponível na própria ferramenta SUMO. Ele gera um novo conjunto de viagens aleatórias para uma determinada rede. Escolhendo aleatoriamente pontos de começo e fim de rotas. As viagens resultantes são armazenadas em um arquivo XML² (por padrão *trips.trips.xml*)³ apropriados para o DUAROUTER⁴. Este é responsável por realizar o roteamento do caminho, por padrão é utilizado o algoritmo de caminho mínimo Dijkstra. As viagens são distribuídas uniformemente em um intervalo de 0 à 3600 (por padrão) em segundos. O número de viagens é definido pela razão entre o intervalo e a taxa de repetição em segundos (por padrão 1). As viagens são exportadas para um arquivo XML (.rou.xml)

3.1.2.3 Descrição das características das vias⁵

As vias possuem uma descrição em formato XML de suas características. Elas podem conter uma ou mais faixas, permitir ou não um determinado tipo de veículo (Ex: faixa que permite apenas tráfego de ônibus ou faixa que proíbe passagem de caminhões), etc. A Figura 10 exemplifica a descrição de uma via em XML.

Figura 10: Modelo de descrição de edge

```
<edges>
  <edge id="1fi" from="1" to="m1" type="b"/>
  <edge id="1si" from="m1" to="0" type="a"/>
  <edge id="1o" from="0" to="1" type="c"/>
</edges>
```

FONTE: SUMO Wiki

3.1.2.4 Descrição das características dos veículos e rotas

Os veículos na simulação são independentes. Eles podem ser divididos basicamente em três partes⁶:

- Modelo do veículo e suas propriedades físicas;

¹ <https://www.python.org/>

² <https://www.w3.org/XML/>

³ <http://sumo.dlr.de/wiki/Tools/Trip>

⁴ <http://sumo.dlr.de/wiki/DUAROUTER>

⁵ http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/Building_Networks_from_own_XML-descriptions

⁶ http://sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes#Vehicle_Types

- Rota que o veículo deve tomar;
- O próprio veículo.

A Figura 11 exemplifica o XML de um veículo, onde o primeiro seguimento representa o veículo e suas propriedades, em seguida o próprio veículo (com id, tipo, etc.) e por último a rota que o veículo deve tomar.

Figura 11: Modelo de descrição de veículo

```
<routes>
  <vType id="type1" accel="2.6" decel="4.5" sigma="0.5" length="5" maxSpeed="70"/>
  <vehicle id="veh1" type="type1" depart="0">
    <route edges="edge1 edge2 edge3"/>
  </vehicle>
</routes>
```

FONTE: SUMO Wiki

O arquivo de rota (Figura 12) consiste em um XML contendo o id da rota, a sua via de partida, sua rota é constituída do custo da via, probabilidade do veículo seguir aquela rota. Sendo que a soma das probabilidades de possíveis rotas tem que ser 1.

Figura 12: Modelo de descrição de veículo

```
<routes>
  <routeDistribution id="routedist1">
    <route id="route0" color="1,1,0" edges="beg middle end rend" probability="0.9"/>
    <route id="route1" color="1,2,0" edges="beg middle end" probability="0.1"/>
  </routeDistribution>
</routes>
```

FONTE: SUMO Wiki

3.1.2.5 Descrição das características das intersecções e junções internas

São chamadas intersecções as conexões entre vias, e junções internas as conexões entre faixas. As intersecções são responsáveis por permitir um veículo passar de uma via para outra e as junções internas são responsáveis por permitir o veículo trocar de faixa. Estas duas informações são vitais para informar aos veículos movimentos válidos que os permitam transitar de uma faixa para outra. Figura 13 exemplifica a descrição de uma arquivo de junctions⁷.

⁷ http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/SUMO_Road_Networks

Figura 13: Modelo de descrição de interseções

```
<junction id="<ID>" type="internal" x="<X-POSITION>" y="<Y-POSITION>"
  incLanes="<INCOMING_PROHIBITING_LANES>"
  intLanes="<INTERNAL_PROHIBITING_LANES>"/>
```

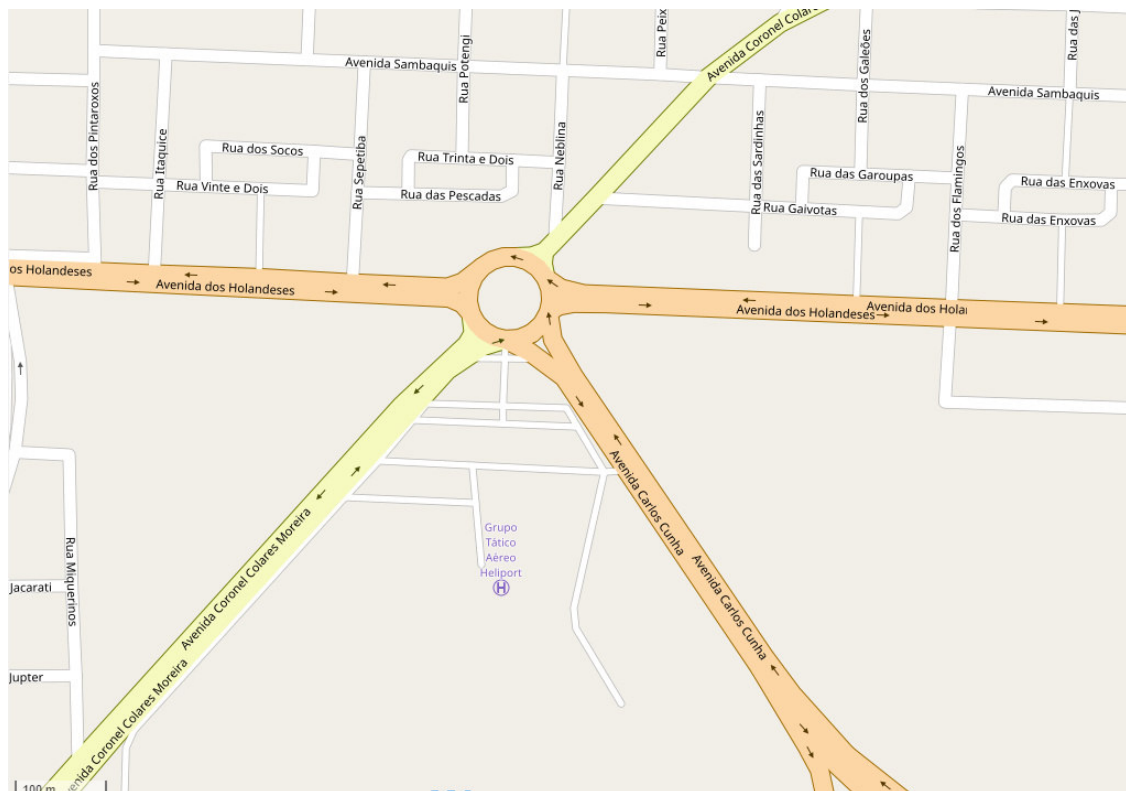
FONTE: SUMO Wiki

3.2 Modelagem das Redes

3.2.1 Aquisição do Cenário Original

A aquisição do cenário original se deu pela ferramenta Open Street Map. Através desta ferramenta foi possível exportar⁸ a parte de interesse respectiva a área da rotatória do calhau (Figura 14) . Após aquisição do arquivo osm, foi utilizado o JOSM (Figura 15), uma IDE de edição de arquivos osm. Utilizando esta ferramenta foi possível limpar o cenário, eliminando vias de serviço, as quais não interferem no fluxo de veículos e vias residenciais, visto que o fluxo gerado por essas vias é pequeno, tornando-se irrelevante a simulação. O cenário original é composto basicamente pelas cinco principais vias que conectam a rotatória e suas respectivas vias de saídas.

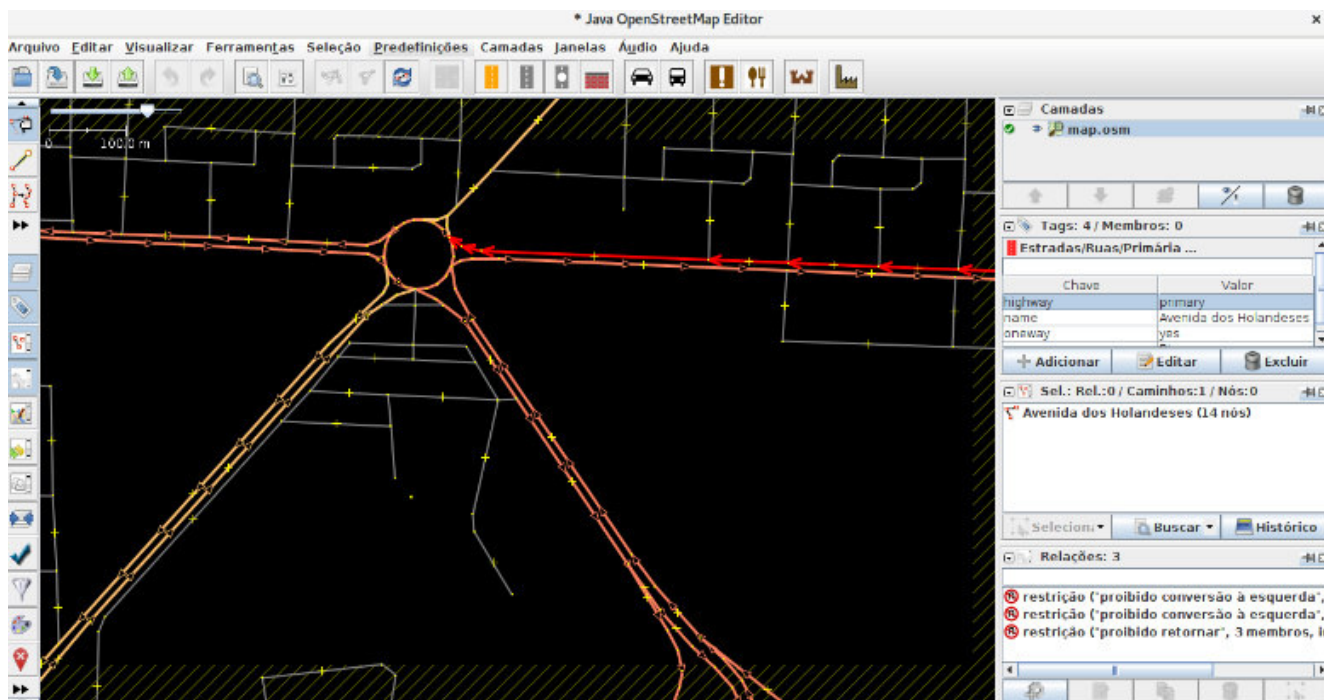
Figura 14: Visualização da Rotatória do Calhau pelo Open Street Map



FONTE: Próprio autor

⁸ Arquivo osm

Figura 15: Ferramenta de edição JOSM



FONTE: Próprio autor

3.2.2 Importando malha viária

Após obtenção do arquivo osm e edição pela JOSM, é utilizado a ferramenta NETCONVERT⁹. Como falado anteriormente (Seção 2.3.5.1). Esta, é uma ferramenta de linha de comando que recebe por parâmetro o nome do arquivo a ser importado e o nome do arquivo de saída. Gerado o arquivo de saída, o mesmo é passado como entrada para outra ferramenta de linha de comando, POLYCONVERTER¹⁰, este é responsável por importar formas geométricas (polígonos ou pontos de interesse) de diferentes fontes, os converte em uma representação que pode ser visualizada usando SUMO-GUI¹¹ (módulo de interface gráfica do SUMO).

⁹ <http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>

¹⁰ <http://sumo.dlr.de/wiki/POLYCONVERT>

¹¹ <http://sumo.dlr.de/wiki/SUMO-GUI>

4 Experimentos Realizados e Resultados

Neste capítulo são descritos os experimentos realizados para as redes propostas, o que gerou cada escolha e são apresentados os resultados obtidos.

4.1 Experimentos realizados

Foram desenvolvidos cinco cenários para os experimentos, sendo eles:

- O cenário original;
- Primeira proposta de melhoria, adição de um viaduto conectando Av. dos Holandeses à sua extensão;
- Segunda proposta de melhoria, adição de um túnel conectando Av. dos Holandeses à Av. Colares Moreira;
- Terceira proposta de melhoria, adição de um viaduto conectando Av. Colares Moreira à extensão da Av. dos Holandeses (sentido Ponta do Farol);
- Combinação da segunda e terceira proposta.

Para cada cenário foram realizados 3 experimentos, em todos eles foram feitas 100 simulações com mesmo volume de carga, 3600 veículos. A mudança entre cada experimento é a variação na taxa de chegada utilizada. Para o primeiro experimento utilizou-se a taxa de chegada padrão do simulador, 1, no caso, a cada segundo um novo veículo é introduzido na simulação. No segundo experimento, optou-se por diminuir a taxa de chegada para 0.5, ou seja, a cada 2 segundos um novo carro é instanciado na simulação. E por último, o terceiro experimento optou-se por utilizar uma taxa de chegada intermediária, 0.66, a cada 1.5 segundos um novo carro é instanciado na simulação.

4.2 Resultados

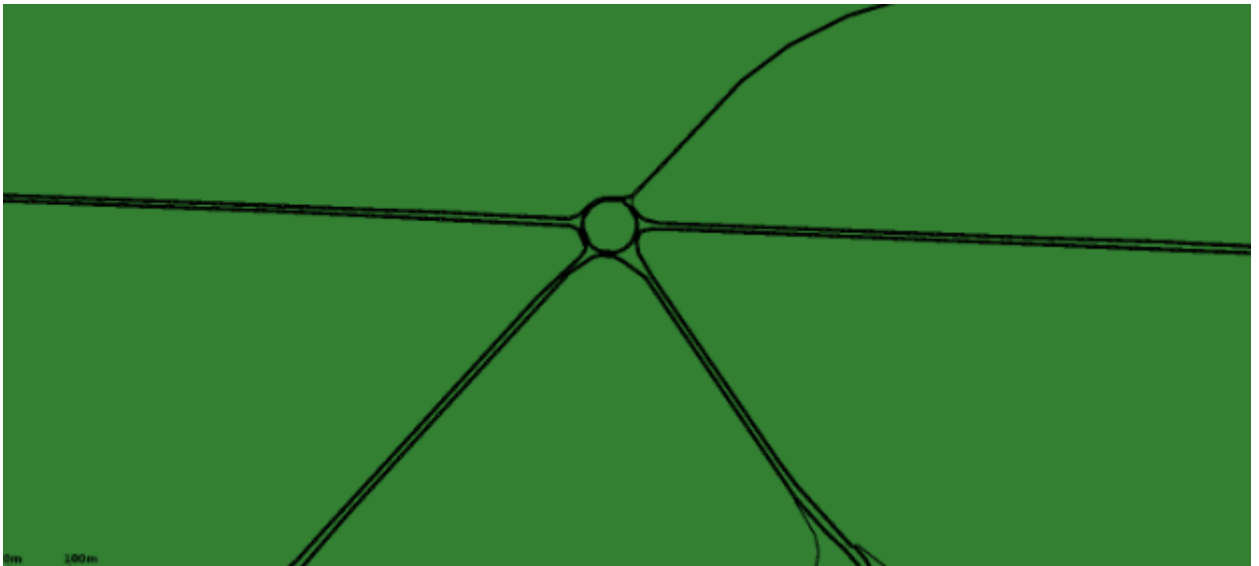
4.2.1 Cenário I (Original)

Como falado anteriormente, a proposta 4.2.1 representa o cenário original (Figura 16), sem modificações viárias, as modificações feita foram apenas de correção de dados a fim de deixar o mesmo mais próximo da realidade. Modificações estas:

- Aumento de prioridade da rotatória. Os veículos que chegam na rotatória deve esperar a oportunidade de entrar na via;

- Correção do número de faixas. Houve a necessidade de alterar o número de faixas em algumas vias. Na extensão da Av. Colares Moreira (segmento que conecta à Av. Litorânea), diminuiu-se as faixas para apenas 1 via em cada sentido;
- Correção de conversões entre as faixas.

Figura 16: Visualização do Cenário I no simulador SUMO



FONTE: Autor

Tabela 3: Resultados do Cenário I

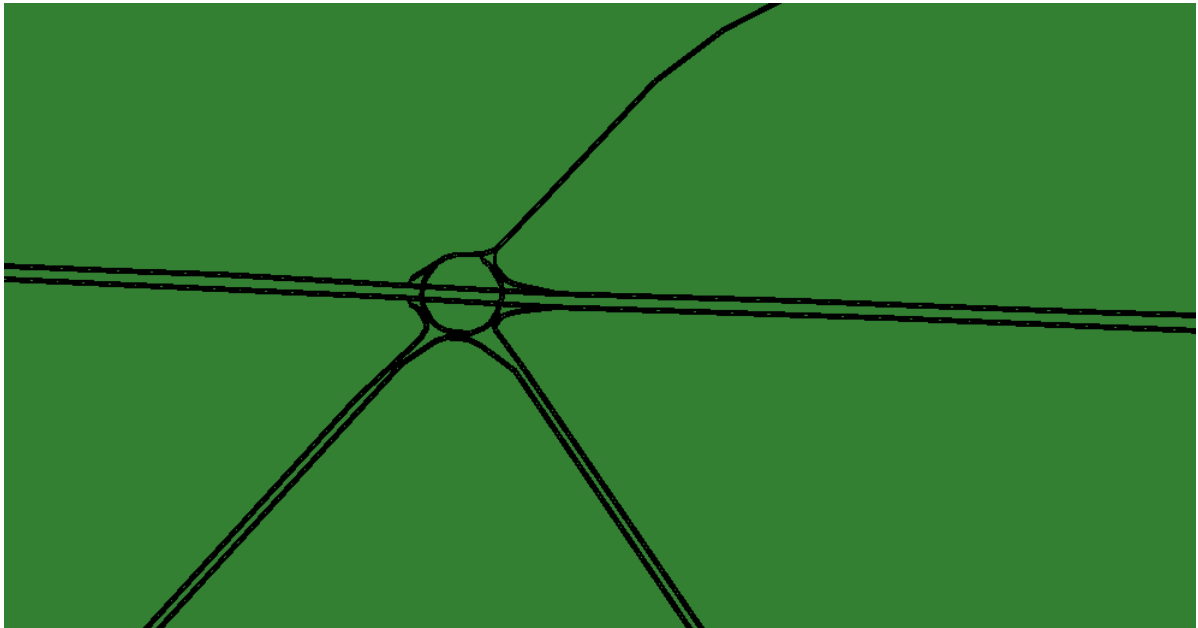
Taxa de chegada (s)	Tamanho médio das filas (m)	Variância	Desvio Padrão	Tempo médio dos veículos no sistema (s)	Tempo médio dos veículos em fila (s)
1	164,52	104,82	10,24	310,40	245,62
0,5	7,44	0,09	0,31	85,26	19,91
0,66	13,72	0,58	0,76	97,56	31,78

Aqui (Tabela 5) observa-se que o tamanho da fila foi menor quando aumentou o intervalo de chegada entre um veículo, passando para 2 segundos entre um veículo ser instanciado e o seguinte. A maior variância ocorreu no primeiro experimento, onde a taxa de chegada era a menor, de 1 segunda entre cada veículo, pode perceber que nesse experimento foi onde ocorreu as maiores filas.

4.2.2 Cenário II (Adição de um Viaduto)

Inicialmente foi testado a modificação mais simples, conectar a Av. dos Holandeses a sua extensão (Visualização na Figura 17). Tal conexão possibilita o fluxo rápido de veículos que desejam apenas acessar a rotatória para seguir viagem pela avenida.

Figura 17: Visualização do Cenário II no simulador SUMO



FONTE: Autor

Tabela 4: Resultados do Cenário II

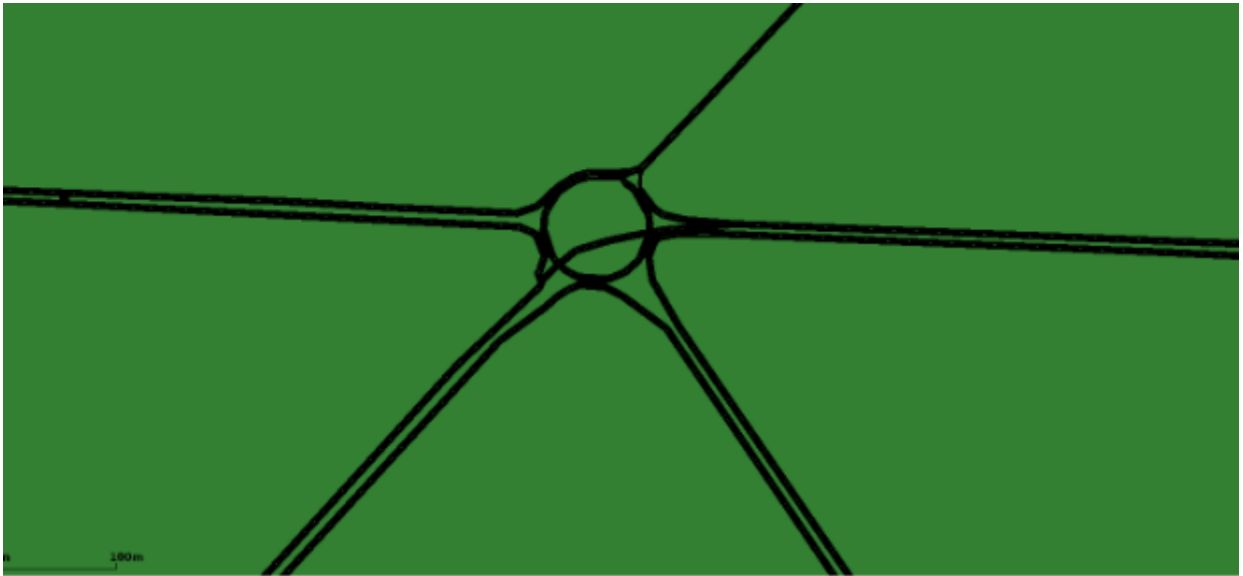
Taxa de chegada (s)	Tamanho médio das filas (m)	Variância	Desvio Padrão	Tempo médio dos veículos no sistema (s)	Tempo médio dos veículos em fila (s)
1	140,52	183,21	13,54	224,37	160,26
0,5	6,02	0,02	0,14	83,14	19,27
0,66	7,35	0,04	0,20	86,24	22,33

Diferente do que aparentemente se espera, a conexão de um viaduto conectando à Av. dos Holandeses a sua extensão não traz uma melhoria significativa ao trânsito na rotatória. Quando a taxa de chegada é elevada, no caso 1 carro por segundo, as filas continuam grande, média 140.52m. Isto ocorre porque o fluxo maior de veículos não se dá da Holandeses a sua extensão, mas sim dela para as demais vias.

4.2.3 Cenário III (Adição de Túnel)

Foi introduzido um túnel conectando a Av. dos Holandeses (sentido centro) à Av. Colares Moreira (Visualização na Figura 19). A escolha dessa conexão se deu pelos experimentos realizados. Assim, foi escolhido uma das vias que tinha um maior fluxo para ser trabalhado a proposta de melhoria. Como aqui não é avaliado a viabilidade física, comercial ou financeira da construção das possíveis melhorias, a escolha de um túnel é unicamente para que na Seção 4.2.5 a combinação dos cenários anteriores pudesse ocorrer.

Figura 18: Visualização do Cenário III no simulador SUMO



FONTE: Autor

Tabela 5: Resultados do Cenário III

Taxa de chegada (s)	Tamanho médio das filas (m)	Variância	Desvio Padrão	Tempo médio dos veículos no sistema (s)	Tempo médio dos veículos em fila (s)
1	13,04	0,53	0,73	84,91	30,61
0,5	6,05	0,02	0,12	71,30	17,43
0,66	6,74	0,05	0,21	73,50	19,33

A construção de um túnel diminuiu sensivelmente o tamanho médio das filas, mesmo quando a taxa de chegada é maior, assim como a variância que também permaneceu baixa. A variação na taxa de chegada de 0.5 para 0.66 não apresentou ganho de performance tão elevado. O tempo que os veículos permaneceram no sistema diminuiu cerca de 72.64%.

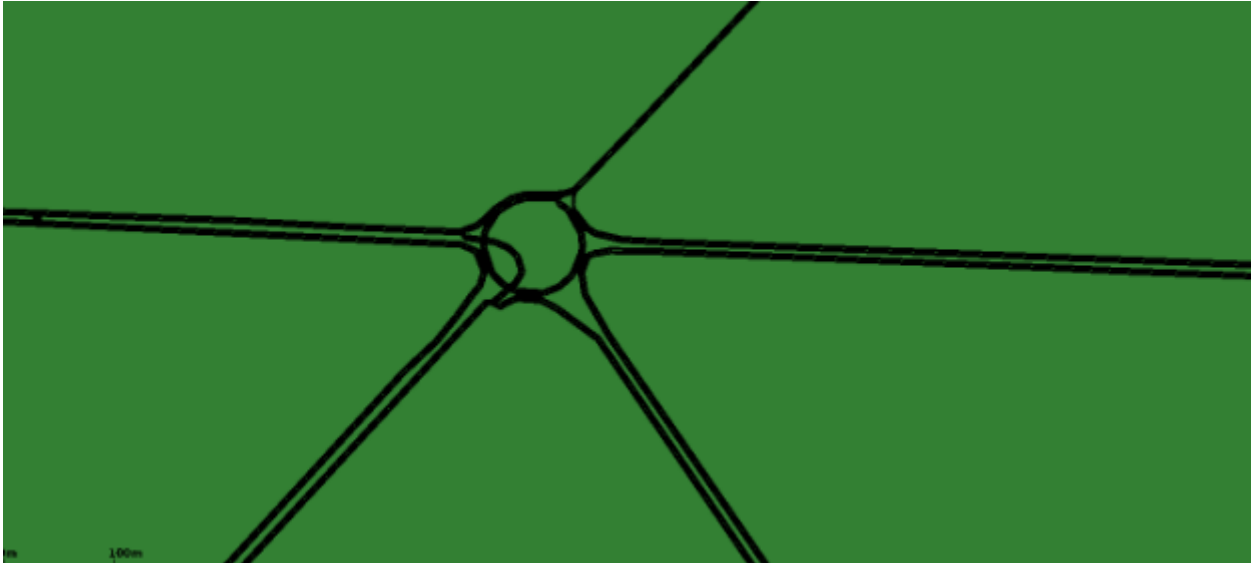
4.2.4 Cenário IV (Adição de um Viaduto)

Assim como o experimento anterior, as modificações proposta aqui se baseiam nas observações das Seções 4.2.1 e 4.2.2. A Av. Colares Moreira foi uma das que mais apresentou engarrafamentos, assim a mesma foi escolhida para a quarta proposta de melhoria. Esta proposta se baseia na criação de um viaduto conectando a Av. Colares Moreira (trecho que vem do Renascença) à Av. dos Holandeses (trecho que segue à Ponta do Farol) (Visualização em Figura 19). A escolha de conectar à Av. dos Holandeses seu baseia em:

- Não há dificuldade de acesso a primeira saída da rotatória;

- A Av. Colares Moreira possui apenas 2 faixas, no caso a faixa da direita possibilita apenas acesso a primeira saída, assim a faixa da esquerda é sobrecarregada por veículos que desejam acessar as outras quatro;
- Conexão com sua extensão é inviável devido a mesma possuir apenas uma faixa para cada sentido;

Figura 19: Visualização do Cenário III no simulador SUMO



FONTE: Autor

Tabela 6: Resultados do Cenário IV

Taxa de chegada (s)	Tamanho médio das filas (m)	Variância	Desvio Padrão	Tempo médio dos veículos no sistema (s)	Tempo médio dos veículos em fila (s)
1	19,34	6,70	02,59	93,72	39,39
0,5	5,71	0,01	0,11	70,44	16,23
0,66	7,58	0,05	0,22	72,41	18,57

A adição de um viaduto, assim como o cenário anterior, houve uma diminuição no tamanho das filas. Com a diminuição da taxa de chegada, houve uma melhora no tamanho médio das filas. Comparando ao cenário original, o tempo médio dos veículos no sistema reduziu cerca de 69.81%.

4.2.5 Cenário V (Combinação dos cenários III e IV)

Não foi considerado a viabilidade de implementar fisicamente estes cenários (considerando quesitos financeiros e operacionais), apenas realizou-se um estudo de impacto de possíveis melhorias, no cenário V combinou-se as duas propostas anteriores (Visualização em Figura 20).

Figura 20: Visualização do Cenário IV no simulador SUMO

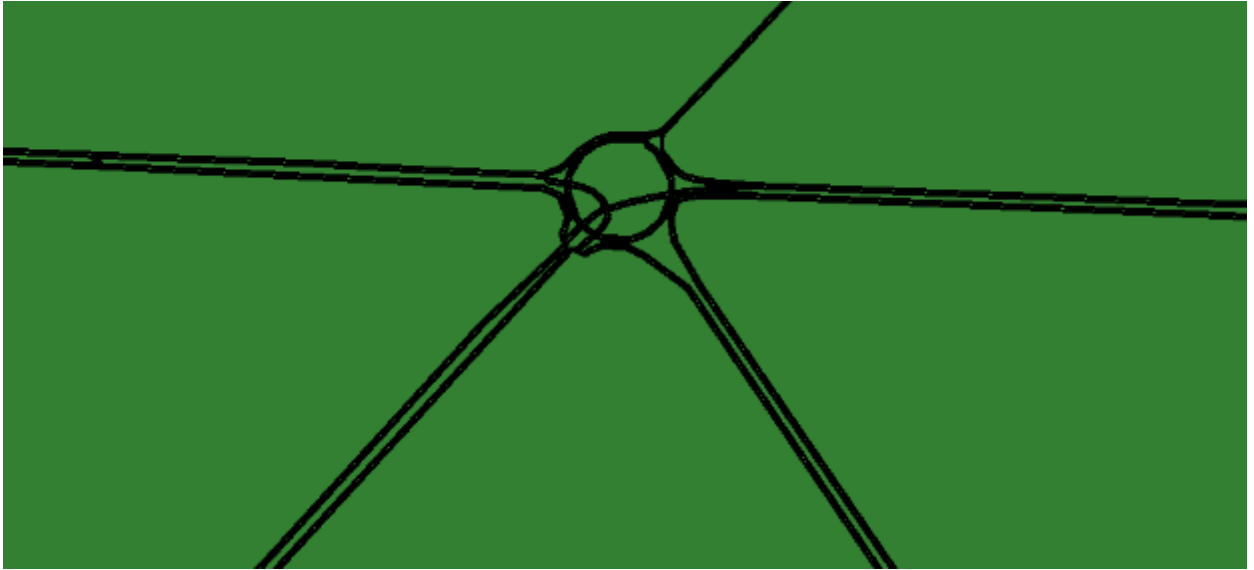


Tabela 7: Resultados do Cenário V

Taxa de chegada (s)	Tamanho médio das filas (m)	Variância	Desvio Padrão	Tempo médio dos veículos no sistema (s)	Tempo médio dos veículos em fila (s)
1	9,21	0,39	0,63	73,60	19,57
0,5	5,89	0,06	0,25	70,64	15,28
0,66	6,69	0,07	0,27	70,84	16,46

O cenário V (combinação do III e IV) foi o que apresentou o melhor resultado, com menor tamanho médio das filas, 9.21m. A variação da taxa de chegada também apresentou um impacto positivo no sistema, com a diminuição da taxa de chegada o tempo médio das filas reduziu. O tempo médio dos veículos no sistema teve uma melhora de 76.29%. Assim como o tempo que os veículos permaneceram em fila teve uma melhora de 92.03%, reduzindo de 245.62 para 19.57 segundos.

Conclusão

A modelagem do fluxo de tráfego é uma das mais importantes ferramentas no auxílio do trabalho do engenheiro de transporte. Esta ferramenta permite realizar análises do desempenho de novas estratégias e políticas de gerência e controle de tráfego, idealizadas para potencializar a eficiência do sistema de transportes.

Acredita-se que este trabalho possa contribuir para disseminar, junto ao corpo técnico responsável pela gestão do trânsito em São Luís, a utilidade da micro-simulação do tráfego veicular na avaliação de alternativas de intervenções físicas e operacionais na malha viária urbana, permitindo a quantificação de indicadores de desempenho das diversas alternativas analisadas de modo a embasar uma melhor tomada de decisão.

Os resultados satisfatórios deste esforço de simulação computacional do tráfego veicular reforçam a aplicabilidade do uso desta ferramenta na tomada de decisão tática e operacional na gestão do trânsito em São Luís e demais cidades brasileiras de grande e médio porte.

Foi testado novas configurações na rotatória do calhau (da polícia militar) com as vias arteriais urbanas Av. dos Holandeses, Av. Colares Moreira e Av. Carlos Cunha, localizada na cidade de São Luís. Avaliando as variáveis “tamanho médio das filas” e “tempo médio em fila”, constatou-se que os cenários propostos, serviram para avaliar possíveis intervenções de médio ou longo prazo, necessárias devido ao fluxo de veículos existente e o contínuo crescimento do tráfego.

Apesar de não ter sido abordado neste trabalho, a utilização da micro-simulação também pode auxiliar na escolha da melhor estratégias a serem utilizadas em modificações operacionais de curto prazo. Exemplo, a realização de um grande show ou algum evento que gere bloqueio em uma grande via urbana, pode-se simular alternativas de desvio e avaliar a que oferece o melhor resultado.

A abordagem de trânsito simulado auxilia de forma satisfatória na experimentação através de um ambiente seguro, não prejudicial aos envolvidos que estariam em um sistema real. Realizados os experimentos, analisado os dados, nota-se que é possível realizar melhorias que tenham um impacto real no fluxo de veículos no cenário em questão. Lembrando que não é levado em consideração a viabilidade financeira ou operacional de construção dos cenários propostos.

A realização deste estudo possibilitou o aprofundamento teórico dos aspectos relativos ao planejamento das malhas de tráfego urbanas, sobretudo em trechos onde há pontos críticos. A simulação da rotatória em questão indica uma necessidade de reestru-

turação física ou operacional, principalmente quando levado em consideração os horários de pico, onde o fluxo de veículos é elevado.

Sugere-se como continuidade do trabalho, estudar melhorias no modelo, aumentando o cenário em questão para abranger as demais vias adjacentes, adição de arquivo de peso nas vias de simulação, arquivo este que possibilita uma simulação mais real do fluxo de veículos.

Referências

- ARAÚJO, D. R. C. de. *Comparação de Simulação de Tráfego dos Modelos Saturn e Dracula*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.
- BARCELÓ, J. et al. *Fundamentals of traffic simulation*. New York: Springer, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- COSTA, A. H. P. da; MACEDO, J. M. G. Engenharia de tráfego: Conceitos básicos. In: _____. *Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária*. Brasil: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, 2008. v. 1. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasconcelos/Documentos-/ManualdeAcessibilidades/ManuaisCCDRNmiolo_AF/01EngTrafego_AF.pdf>. Acesso em: 20.1.2017. Citado na página 20.
- FOGLIATTI, M. C.; MATTOS, N. M. C. *TEORIA DE FILAS*. Rio de Janeiro: INTERCIENCIA, 2007. ISBN 9788571931572. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=l69OSAAACAAJ>>. Acesso em: 23.1.2017. Citado 3 vezes nas páginas 31, 34 e 35.
- GOLDNER, L. G. In: _____. *Engenharia de Tráfego*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- HERMAN, R. *Theory of Traffic Flow*. Amsterdam, Holanda: Proceedings, Symposium on the Theory of Traffic Flow, 1961. Citado na página 26.
- JUNIOR, J. E. B. et al. *AValiação de Intervenções em Interseção do Tipo Rotatória Usando o Simulador Integration*. Fortaleza, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- KRAJZEWICZ, D. et al. *Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility*. Berlin, Germany, 2012. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.2113rep=rep1type=pdf>>. Acesso em: 1.2.2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- LIMA, E. B. *Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.
- MAIA, F. V. B. *Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 22.
- MENDONÇA, E. B. de. *Teoria das Filas Markovianas e Aplicações*. Dissertação (Dissertação de Monografia) — Universidade Estadual da Paraíba, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/i0pRB7>>. Acesso em: 26.1.2017. Citado 3 vezes nas páginas 31, 34 e 35.

- MONTALVÃO, E. H. R. *SIMULAÇÃO DE UMA ROTATÓRIA: ANÁLISE CRÍTICA E DESEMPENHO*. Ouro Preto, Minas Gerais, 2010. Disponível em: <http://www.sobrapo.org.br/sbpo2010/xliisbpo_pdf/72566.pdf>. Acesso em: 1.2.2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- MOREIRA, D. A. In: _____. *Pesquisa Operacional - Curso Introductório*. Brasil: Cengage Learning, 2011. v. 2. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.
- NETO, J. C. *Engenharia de Tráfego Urbano*. 2016. Access date: 20 jan. 2017. Disponível em: <http://meusite.mackenzie.br/professor_cucci/aula1.pdf>. Citado na página 20.
- PETERSON, R. W. et al. *Modeling Roundabouts: Lessons Learned in Idaho*. Kansas City, Missouri, 2008. Disponível em: <http://www.teachamerica.com/rab08/RAB08_Papers/RAB08S2APeterson.pdf>. Acesso em: 25.1.2017. Citado na página 19.
- RODRIGUES, S. et al. *Simulação na Escala Micriscópica para Visualização do Tráfego Veicular*. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2011. Access date: 24 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/87704.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- SILVA, P. C. M. da. Engenharia de tráfego. In: _____. *Teoria do Fluxo de Tráfego*. Brasil: Sinal de Trânsito, 1994. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>>. Acesso em: 24.1.2017. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- SUCENA, M. Teoria das filas. In: _____. *Engenharia de Produção*. Brasil: Faculdade Estácio, 2013. v. 1. Citado na página 30.
- VAIANA, R.; GALLELLI, V. *ROUNDABOUT INTERSECTIONS: EVALUATION OF GEOMETRIC AND BEHAVIOURAL FEATURES WITH VISSIM*. Kansas City, Missouri, 2008. Disponível em: <http://www.teachamerica.com/rab08/RAB08_Papers/RAB08S2AVaiano.pdf>. Acesso em: 26.1.2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.
- VECCHIA, A. D. *Semáforos adaptativos, uma abordagem baseada em inteligência de exames para a mobilidade urbana*. Dissertação (Dissertação de Monografia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 19, 25, 28 e 29.