

Gilberto Dessbesell Jr

SIMULAÇÃO DE CONTROLE ADAPTATIVO DE TRÁFEGO URBANO  
ATRAVÉS DE SISTEMA MULTIAGENTES E COM BASE EM DADOS REAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, Área de Concentração em Controle e Otimização de Processos, Linha de Pesquisa em Monitoramento, Simulação e Otimização de Sistemas e Processos, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

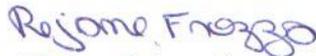
Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Rejane Frozza

Santa Cruz do Sul  
2015

Gilberto Dessbesell Jr.

SIMULAÇÃO DE CONTROLE ADAPTATIVO DE TRÁFEGO URBANO ATRAVÉS DE  
SISTEMA MULTIAGENTES E COM BASE EM DADOS REAIS

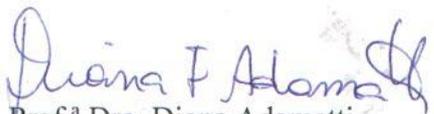
Esta Dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.



Prof.<sup>a</sup> Dra. Rejane Frozza  
Professora Orientadora



Prof. Dr. Rolf Fredi Molz  
Examinador - UNISC



Prof.<sup>a</sup> Dra. Diana Adamatti  
Examinadora - FURG

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela dádiva da vida e pela possibilidade de realizar esta obra e, de alguma maneira, contribuir para o desenvolvimento da ciência.

Agradeço imensamente a todos os meus familiares, principalmente aos meus pais, Gilberto e Alice Maria Dessbesell, pela pessoa que sou e pela dedicação, incentivo e colaboração nesses longos anos de estudo. Agradeço também os meus irmãos, Gustavo e Leonardo, pelo apoio para que eu pudesse concluir o mestrado. Agradeço carinhosamente à minha namorada, Jéssica Silveira, uma pessoa muito especial, pela sinceridade, compreensão e companheirismo sempre presentes, apesar da minha ausência em muitos momentos ao longo destes dois últimos anos.

A todos os colegas do PPGSPI - UNISC 2013/2014 que, mais do que colegas de classe ou que parceiros de estudos, se tornaram grandes irmãos e participaram de maneira muito presente, contribuindo muito para o meu desenvolvimento como pessoa.

Ao apoio e incentivo recebido de todos os meus colegas e amigos, sempre pacientes e compreensivos quando faltei a sua presença. Sinceros agradecimentos à direção e aos sócios e colegas da empresa Cantú & Stange Cia Ltda, de Venâncio Aires, pela contribuição, pela confiança e pelo grande apoio durante mais essa etapa.

Enfim, muito obrigado ao corpo docente e secretariado do Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais - PPGSPI (Mestrado), que compartilharam de seus conhecimentos, especialmente à minha orientadora, professora Dra. Rejane Frozza que me acompanhou de maneira muito presente e produtiva no decorrer desse projeto, contribuindo para o sucesso do mesmo.

Agradeço também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro que permitiu que essa etapa fosse alcançada. E, de modo geral, a todos aqueles que contribuíram com a busca deste ideal, meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A população urbana cresce rapidamente nos centros urbanos. A quantidade de pessoas que utilizam veículos próprios como meio de transporte cresce mais rápido ainda. Todo este crescimento faz com que a infraestrutura de transportes fique saturada, gerando lentidão, congestionamentos e aumentando o tempo que as pessoas passam dentro dos veículos. Os engarrafamentos têm causado transtornos de ordem econômica, social e ambiental à população. Com o aumento de tempo das viagens e a maior quantidade de veículos nas ruas, também ocorrem maiores índices de poluição sonora e do ar. Além disso, em grandes cidades, diariamente os condutores enfrentam situações de estresse no trânsito. Melhorias nos sistemas de controle de tráfego têm sido propostas, mesmo assim ainda há muito a ser feito. Desta forma, neste trabalho foi verificada a eficácia do emprego de agentes inteligentes para o controle do tráfego urbano, em ambiente de simulação multiagentes, a fim de reduzir os efeitos negativos causados, principalmente, pelos congestionamentos. Após a realização de um estudo sobre trabalhos relacionados ao controle de tráfego de urbano e à simulação multiagentes, obteve-se uma visão geral a respeito das recentes pesquisas realizadas sobre o tema. Esta visão é apresentada ao longo do trabalho e serviu de base para o desenvolvimento das melhorias propostas. Neste trabalho foi utilizado o simulador de tráfego urbano SUMO para realizar a simulação do tráfego de veículos em uma região da cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. Dados reais a respeito dos planos de programação dos semáforos existentes no local e do volume de tráfego em alguns cruzamentos da cidade foram utilizados. Em seguida foi desenvolvido um semáforo inteligente, que utiliza uma heurística em forma de algoritmo de controle para tomar suas decisões e a simulação foi realizada novamente. O resultado das duas simulações, sem e com o semáforo inteligente proposto, foi então comparado e os resultados encontrados foram considerados de grande relevância.

Palavras-chave: Controle de tráfego urbano, simulação de tráfego urbano, simulação multiagentes, heurísticas para semáforos inteligentes.

## **ABSTRACT**

The urban population is growing quickly in urban centers. The amount of people who use their own vehicles for transportation grows even faster. All this growth made the transport infrastructure get saturated, causing delays, congestion and increasing the time people spend in vehicles. Traffic jams have caused disorders of economic, social and environmental to the population. With the rise of the travel time and the largest number of vehicles on the streets, there are also higher levels of noise and air pollution. Moreover, in large cities, daily drivers face traffic stressful situations. Improvements in the traffic control systems have been proposed, still much remains to be done. Thus, this study evaluated the efficacy of the use of intelligent agents for the control of urban traffic in multi-agent simulation environment, in order to reduce the negative effects caused mainly by congestion. After conducting an extensive study of related work to urban traffic control and multi-agent simulation, an overview was obtained about the recent research on this subject. This overview is presented throughout the work and was the basis for the development of the proposed improvements. In this study we used the urban traffic simulator SUMO to perform the simulation of vehicular traffic in a region of Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Actual data regarding the programming plans of existing traffic lights and about traffic volume in some city crosses were used. Then we developed an intelligent traffic light, which uses a control algorithm like a heuristic to make its decisions and the simulation was performed again. The results of two simulations with and without the proposed intelligent traffic light, were then compared and the results were considered highly relevant.

**Keywords:** Urban traffic control, urban traffic simulation, multi-agent simulation, heuristics for intelligent traffic lights.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da frota de veículos no Brasil.....	12
Figura 2 – Agente interagindo com o ambiente.....	17
Figura 3 – Processo decisório de um agente reativo. ....	18
Figura 4 – Processo decisório de um agente cognitivo. ....	19
Figura 5 – Estrutura de um sistema multiagentes.....	20
Figura 6 - Comparativo dos trabalhos relacionados.....	28
Figura 7 – Fluxograma executivo do projeto de pesquisa.....	33
Figura 8 – Mapa dos cruzamentos monitorados.....	36
Figura 9 – Exemplo de diagrama de fases da programação semafórica.....	37
Figura 10 – Exemplo de plano de programação semafórica.....	38
Figura 11 – Interface gráfica de simulação do SUMO.....	42
Figura 12 – Mapa do projeto OpenStreetMap.....	44
Figura 13 – Área do OpenStreetMap selecionada para o trabalho.....	45
Figura 14 – Mapa do OpenStreetMap somente com as estruturas de trânsito.....	46
Figura 15 – Junções não agrupadas e agrupadas.....	47
Figura 16 – Exemplo de uso da opção <i>TLS guesssignal</i> .....	48
Figura 17 – Exemplo de semáforo representado no arquivo net.xml.....	49
Figura 18 – Programações semafórica para a estrutura WAUT.....	50
Figura 19 – Plano de troca de programas na estrutura WAUT.....	50
Figura 20 – Exemplo de estrutura de distribuição de tipos de veículos.....	53
Figura 21 – Setores utilizados para a estrutura TAZ.....	54
Figura 22 – Exemplo de estrutura TAZ.....	55
Figura 23 – Exemplo de estrutura de matriz de origem e destino.....	56
Figura 24 – Exemplo de matriz de fluxo de origem/destino.....	57
Figura 25 – Exemplo de matriz de distribuição de tráfego.....	58
Figura 26 – Exemplo da estrutura do arquivo de viagens.....	61
Figura 27 – Exemplo da estrutura do arquivo de rotas.....	62
Figura 28 – Exemplo de ferramenta de manipulação de semáforos.....	63
Figura 29 – Ambiente gráfico de simulação do SUMO.....	64
Figura 30 – Estrutura do arquivo de configuração da simulação.....	65
Figura 31 – Exemplo de uso da estrutura <i>Tipinfo</i> .....	67
Figura 32 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes 1.....	68
Figura 33 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes 2.....	70
Figura 34 – Exemplo de detectores utilizados em semáforos <i>AgentBased2</i> .....	71
Figura 35 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes utilizado no trabalho.....	73
Figura 36 – Gráfico do tempo médio de viagem.....	79
Figura 37 – Gráfico do tempo médio de viagem por turno.....	80
Figura 38 – Problema causado pela operação individual dos semáforos.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da pesquisa científica .....	32
Tabela 2 – Exemplo de tabela de horários .....	39
Tabela 3 – Exemplo de tabulação de contagem de veículos.....	40
Tabela 4 – Lista de opções utilizadas em NetConvert.....	47
Tabela 5 – Adequação realizada nos cruzamentos com contagem de 12 horas .....	51
Tabela 6 – Arquivos de matriz origem e destino utilizados no trabalho.....	57
Tabela 7 – Lista de opções utilizadas em OD2TRIPS .....	59
Tabela 8 – Distribuição de viagens por turno.....	60
Tabela 9 – Lista de opções utilizadas em DUAROUTER.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAT	Controle adaptativo de tráfego
CATU	Controle adaptativo de tráfego urbano
CTU	Controle de tráfego urbano
EPTC	Empresa Pública de Transportes e Circulação
IA	Inteligência Artificial
MCP	Modelo de controle preditivo
MTC	Modelo de transmissão celular
SMA	Sistemas multiagentes
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility</i>

## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	2
Resumo .....	4
Abstract .....	5
Lista de ilustrações .....	6
Lista de tabelas .....	7
Lista de abreviaturas e siglas .....	8
1 Introdução.....	11
1.1 Objetivos do trabalho.....	14
1.2 Organização do texto .....	15
2 Fundamentação teórica.....	16
2.1 Controle de tráfego urbano.....	16
2.2 Agentes inteligentes e sistemas multiagentes.....	17
2.3 Controle de tráfego e sistemas multiagentes .....	21
2.4 Simulação multiagentes .....	22
2.5 Heurísticas.....	23
2.6 Algoritmos de aprendizagem .....	24
2.7 Trabalhos relacionados .....	25
2.8 Considerações .....	30
3 Metodologia.....	32
3.1 Procedimentos metodológicos.....	33
3.2 Obtenção de dados de tráfego urbano .....	35
3.2.1 Programação semafórica .....	37
3.2.2 Volume de tráfego .....	39
3.3 Definição do ambiente de simulação.....	40
3.3.1 SUMO – <i>Simulation of Urban MObility</i> .....	41
3.4 Simulação de tráfego urbano .....	43
3.4.1 Construção da malha de tráfego.....	43
3.4.2 Modelagem do tráfego .....	50
3.4.3 Simulação .....	63
3.5 Semáforos inteligentes.....	67

3.5.1 Características dos agentes.....	71
3.5.2 A heurística dos agentes .....	73
3.5.3 Simulando novamente .....	77
4 Resultados.....	78
4.1 Resultados obtidos .....	78
4.2 Considerações .....	81
5. Conclusão.....	82
5.1 Trabalhos Futuros.....	83
Referências .....	86

## 1 INTRODUÇÃO

A população urbana cresce rapidamente, ano após ano, principalmente nos centros urbanos dos países em desenvolvimento. Além disso, a quantidade de pessoas que utilizam veículos próprios como meio de transporte cresce a índices ainda maiores, enquanto a de pessoas que utilizam o transporte público, apesar de também crescer, o faz a índices bem mais modestos.

O crescimento do número de veículos, potencializado pelo crescimento populacional, faz com que a infraestrutura de transportes fique saturada rapidamente. Situação que se agrava devido ao tempo necessário para que novas obras de mobilidade urbana sejam realizadas. Isso faz com que o fluxo de veículos seja prejudicado, gerando lentidão, congestionamentos e, conseqüentemente, aumentando o tempo que as pessoas passam dentro dos veículos diariamente.

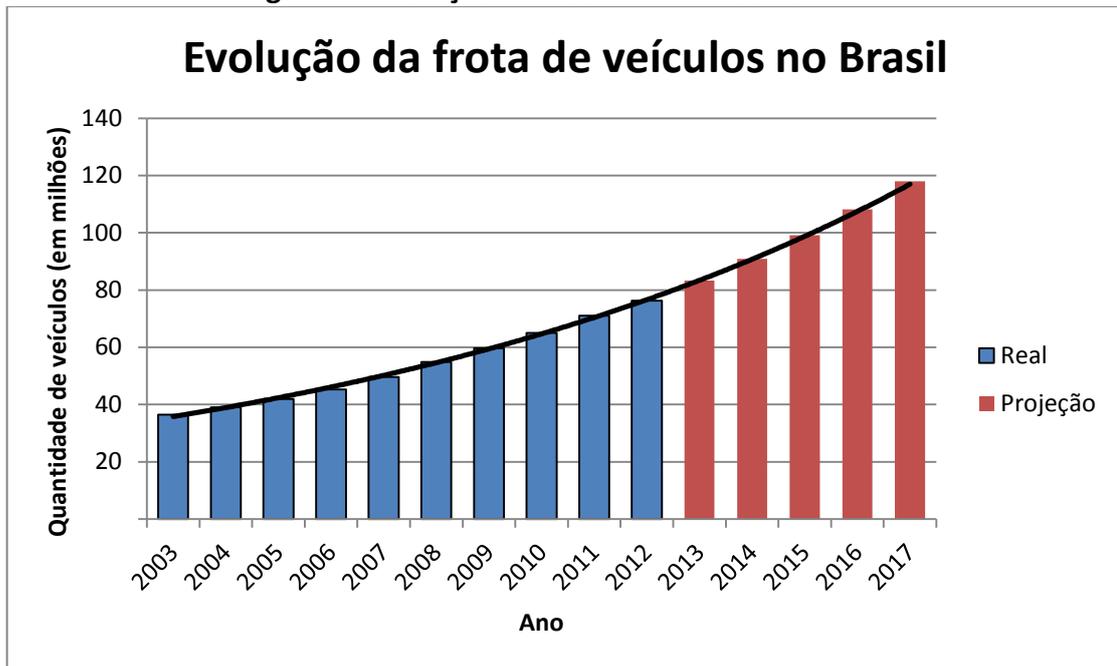
Os constantes engarrafamentos vivenciados nos centros urbanos têm causado diversos transtornos de ordem econômica, social e ambiental à população. Dentre os aspectos relacionados à mobilidade urbana que afetam o trânsito e necessitam de melhorias, podem ser destacados os congestionamentos e, conseqüentemente, o tempo de duração das viagens. Melhorias nos sistemas de controle de tráfego têm sido propostas com o objetivo de tornar estes aspectos mais eficientes, tais como: a aplicação de heurísticas nos processos de tomada de decisão, construção de modelos de controle e utilização de lógica *Fuzzy*. Mesmo assim, ainda há muito a ser feito neste sentido.

Segundo (DENATRAN, 2013), entre 2003 e 2012, a frota de veículos no Brasil cresceu, em média, cerca de 8,5% ao ano (Figura 1). Este crescimento deve continuar ocorrendo nos próximos anos, colocando cada vez mais veículos nas ruas e aumentando ainda mais os congestionamentos, principalmente nos grandes centros urbanos.

Soma-se a isso o fato de que cidades mais populosas tendem a ocupar maior área territorial, aumentando a distância entre a origem e o destino da maioria das viagens realizadas diariamente pela população. Como consequência, aumenta o tempo de deslocamento dos veículos, a quantidade de veículos trafegando ao mesmo tempo e, novamente, a saturação das vias.

Principalmente em grandes metrópoles, novas obras de infraestrutura que explorem espacialmente o uso do território podem possuir limitações. Cada vez menos é possível construir mais vias em uma autoestrada ou mesmo construir novas estradas que permeiem locais estratégicos, de grande fluxo de veículos. Nestes casos, faz-se necessário aplicar técnicas que visem aumentar a eficiência da infraestrutura já instalada.

Figura 1 - Evolução da frota de veículos no Brasil



Fonte: Autor.

O problema agrava-se ao considerar-se que a densidade populacional de uma região aumenta a níveis maiores do que a capacidade das vias de transporte, aumentando assim a quantidade de veículos trafegando nestas vias. Isso ocorre porque as estruturas residenciais podem facilmente se expandir de forma vertical, enquanto as estruturas de tráfego podem se expandir de forma mais limitada (LEVINSON, 2012).

Com o aumento de tempo das viagens e a maior quantidade de veículos nas ruas, também ocorrem maiores índices de poluição sonora e do ar. Segundo (TIWARY, *et al.*, 2011), mesmo com a evolução da tecnologia, o tráfego de veículos ainda é o maior responsável pela emissão de poluentes em centros urbanos. Os autores constatam ainda, que o maior índice de emissão de poluentes é verificado no momento em que os carros estão parados e começam a andar (arrancam). Situação que ocorre com muita frequência em congestionamentos.

Além disso, em grandes cidades, diariamente os condutores enfrentam situações de estresse no trânsito. Para (KONDRO, 2010), o aumento da quantidade de veículos é necessário para atender às necessidades de mobilidade da população. Porém, isso também resulta na ocorrência de mais casos de estresse e doenças mentais, causados pela grande quantidade de tempo gasto diariamente nos deslocamentos e afetando diretamente a qualidade de vida e a saúde dos condutores.

Desta forma, o emprego de agentes inteligentes no tráfego urbano, com o uso de simulação multiagentes, é capaz de tornar mais eficiente o fluxo de veículos em centros urbanos, a fim de reduzir os efeitos negativos causados, principalmente, pelos congestionamentos?

Atualmente, as autoridades de tráfego basicamente reagem às situações que ocorrem diariamente, buscando maneiras de tratá-las somente depois que já ocorreram e causaram diversos tipos de transtornos. Isso ocorre, pois estas autoridades não possuem capacidade de identificar possíveis problemas com a antecedência adequada e de agir de maneira proativa em relação a eles. Para um controle mais efetivo e inteligente dos sistemas de tráfego urbano, é necessário coletar dados referentes ao fluxo de veículos e desenvolver sistemas de informação capazes de auxiliar, de maneira inteligente, no controle do tráfego urbano (BAZZAN, 2012).

Segundo (KHOSRAVIFAR, *et al.*, 2013), agentes são tomadores de decisão natos, que guiam suas ações da maneira que julgam ser a mais adequada para atingir seus objetivos. Já sistemas multiagentes (SMA), são sistemas compostos por vários agentes interagindo entre si para atingir tanto objetivos individuais, quanto objetivos compartilhados com outros agentes. Como o universo de conhecimento e a capacidade operacional dos agentes são limitados, pois geralmente os agentes conhecem apenas uma parte do ambiente em que estão inseridos, muitas vezes eles precisam interagir entre si para alcançar seus objetivos individuais e compartilhados.

Para (KLÜGL, BAZZAN e OSSOSWSKI, 2010), SMA são capazes de representar de forma completa, tanto em simulação quanto em aplicações reais, o comportamento dos participantes de um sistema de tráfego. Possibilitando entender e especificar melhor estes participantes e reproduzindo em detalhes seu comportamento e suas tomadas de decisão. Na área de coordenação e controle adaptativo de tráfego, por exemplo, os SMA são capazes de promover a utilização mais eficaz da infraestrutura instalada. Além disso, cada vez mais nota-se a utilização de SMA em pesquisas relacionadas aos problemas complexos de tráfego, o que indica que este é um caminho interessante para as pesquisas na área.

Na última década, as autoridades coletaram uma grande quantidade de dados referentes aos padrões de tráfego dos veículos e agora se mostra crescente a demanda por técnicas de predição de tráfego em tempo real. Embora já existam ferramentas para controle de tráfego e assistência de viagem aos condutores, estas ferramentas pouco utilizam as informações para a predição de situações futuras (MIN e WYNTER, 2011).

Este cenário torna mais interessante e necessária a construção de soluções que auxiliem os controladores de tráfego a antecipar-se às situações futuras, ao invés de apenas reagirem aos fatos que já ocorreram. Da mesma forma, os condutores de veículos aproveitariam muito mais as informações que levem em conta previsões futuras a respeito da rota que pretendem seguir, do que as informações a respeito de um congestionamento do qual eles já fazem parte. Devido a todo este interesse acerca do assunto, as pesquisas sobre métodos de predição de tráfego aumentaram muito na última década (MIN e WYNTER, 2011).

Porém, (WERNZ e DESHMUHK, 2012) alertam que o processo de tomada de decisão é um processo complexo, já que pode envolver muitas variáveis/fatores a serem considerados. Principalmente quando engloba objetivos de diferentes níveis hierárquicos e, por consequência, de curto e longo prazo. Geralmente as decisões dos níveis hierárquicos mais baixos possuem objetivos de curto prazo enquanto as de níveis mais altos tendem a ser de longo prazo. Para maximizar a eficiência de um sistema, as decisões que visam atender aos objetivos de curto prazo devem estar ao mesmo tempo, alinhadas com os objetivos dos níveis hierárquicos mais altos e com os objetivos de longo prazo. O desafio é alinhar estes objetivos e coordenar os agentes dos diversos níveis hierárquicos de um SMA, para que tomem as decisões da maneira mais eficiente possível.

Desta forma, através do citado crescente número de pesquisas relacionadas ao tema e do conteúdo destas pesquisas, é possível afirmar que há espaço, embasamento e necessidade de exploração do uso de SMA para simulação de controle adaptativo de tráfego urbano (CATU). Dentre as lacunas identificadas, destaca-se o estudo de técnicas de predição, para que os sistemas possam agir de maneira proativa no controle do tráfego e o desafio de coordenar as tomadas de decisão entre os agentes de um SMA, considerando os níveis hierárquicos, as variáveis envolvidas e o curto espaço de tempo para a tomada de decisão, existentes em um ambiente de grande complexidade, como é o de controle de tráfego.

## **1.1 Objetivos do trabalho**

Este estudo tem por finalidade verificar, através de simulação em SMA, a possibilidade de tornar mais eficiente o fluxo de veículos em centros urbanos, utilizando técnicas de Inteligência Artificial (IA), para a coordenação e melhoria de desempenho das políticas de gerenciamento de tráfego, a fim de reduzir os efeitos negativos, sendo eles sociais, econômicos e ambientais, causados, principalmente, pelos congestionamentos.

Para atingir o objetivo geral deste estudo, faz-se necessário atingir cada um dos seguintes objetivos específicos:

- Estudar modelos e trabalhos relacionados ao controle de tráfego com diferentes técnicas.
- Estudar SMA que realizem simulações de modelos que representem sistemas de CATU.
- Definir o formato dos agentes que serão desenvolvidos, no que diz respeito à arquitetura do sistema, as características e lógica de tomada de decisão.
- Definir e desenvolver, ou selecionar, um algoritmo de controle (heurística), a ser utilizado pelos agentes, para realizar as adequações necessárias ao controle do tráfego.

- Definir e desenvolver, ou selecionar, as variáveis utilizadas para a tomada de decisão, com o objetivo de melhorar o desempenho dos agentes, de forma que se adaptem ao contexto de cada situação.
- Realizar simulações e testes de desempenho dos modelos de controle de tráfego propostos, comparando-os com modelos similares existentes e com modelos que não utilizam IA.

## **1.2 Organização do texto**

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os estudos realizados acerca dos temas necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Apresenta, ainda, uma seção de trabalhos relacionados, que reúne e classifica diversos estudos realizados sobre o tema. O capítulo 3 descreve a metodologia empregada de maneira detalhada e os procedimentos realizados, desde a aquisição dos dados reais sobre o tráfego, passando pela simulação de um cenário atual e o desenvolvimento das melhorias propostas e chegando às simulações do novo modelo proposto para o controle do tráfego. No capítulo 4 são apresentados os resultados da pesquisa, com descrição das análises realizadas a partir dos dados gerados nas simulações do sistema atual e do novo modelo proposto. Por fim, é apresentado um capítulo sobre as sugestões de trabalhos futuros, deixadas por este trabalho e a conclusão do autor, acerca dos objetivos atingidos, das contribuições deixadas e da relação deste trabalho com o tema da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão de literatura abordada nesta pesquisa está dividida em oito tópicos. São eles: Controle de tráfego urbano, agentes inteligentes e sistemas multiagentes, controle de tráfego e sistemas multiagentes, simulação multiagentes, algoritmos de aprendizagem, heurísticas, trabalhos relacionados e as considerações do autor.

### 2.1 Controle de tráfego urbano

De acordo com (BAZZAN, 2009), o crescente aumento da demanda por tráfego urbano é um dos maiores responsáveis pelos engarrafamentos, que cada vez mais fazem parte do dia-a-dia das pessoas. Como consequência disso, pode ser citado o aumento da poluição do ar, a redução da velocidade média dos veículos, os constantes atrasos e a insatisfação dos condutores. Este problema pode ser amenizado através do aumento da capacidade da infraestrutura de transportes instalada, no entanto, isso pode não ser mais socialmente ou economicamente viável ou possível a longo prazo.

A origem do controle de tráfego urbano (CTU) data da segunda metade do século 20. Na década de 70, surgiram os famosos e muito utilizados, TRANSYT (ROBERTSON, 1969), SCOOT (HUNT, ROBERTSON e BRETHERTON, 1982) e SCATS (LOWRIE, 1982), sistemas pioneiros em trabalhar com controle adaptativo de tráfego (CAT) utilizando heurísticas de otimização. Na década de 80, popularizam-se os sistemas baseados em estratégia de horizonte rolante, apresentada por (BAKER, 1977). Dentre eles: OPAC (GARTNER, 1983), PROLYN (FARGES, HENRY e TUFAL, 1983), CRONOS (BOILLOT, *et al.*, 1992), e RHODES (SEN e HEAD, 1997).

Segundo (DE OLIVEIRA e CAMPONOGARA, 2010), CTU geralmente é dividido em diversos módulos, que são responsáveis por diversos aspectos do controle de tráfego. Dentre estes módulos, podem ser citados o controle de rampas de acesso às vias expressas, as mensagens de sinalização dinâmicas, o controle de temporização dos semáforos e os transportes públicos.

Para (KEYVAN-EKBATANI, PAPAGEORGIU e PAPAMICHAIL, 2013), nas últimas décadas, diversos estudos referentes à área de CTU foram realizados, com diversos objetivos e conclusões. Uma destas conclusões é que as estratégias de controle de tráfego interferem de maneira significativa nas condições de tráfego das grandes cidades. Ainda assim, é possível perceber que os congestionamentos continuam ocorrendo ou pior, têm aumentado no mesmo período. Desta forma, desenvolver e implantar novas e melhores estratégias de controle de tráfego continua sendo um desafio a ser enfrentado. Principalmente,

desenvolver estratégias para controle de saturação de tráfego é um desafio de grande relevância, tanto prática quanto científica.

## 2.2 Agentes inteligentes e sistemas multiagentes

Para (WOOLDRIDGE, 2009) e (RUSSELL e NORVIG, 2010), um agente é um *software* que percebe o ambiente em que está inserido através de suas observações (entradas) e tem capacidade para realizar ações (saídas) de forma autônoma. Segundo (WU, ZILBERSTEIN e CHEN, 2011), um agente é um tomador de decisão que age de maneira autônoma para atingir um objetivo, considerando, para isso, suas observações a respeito do ambiente em que está inserido. A Figura 2 apresenta um agente interagindo com o ambiente.



Fonte: Adaptado de (WOOLDRIDGE, 2009).

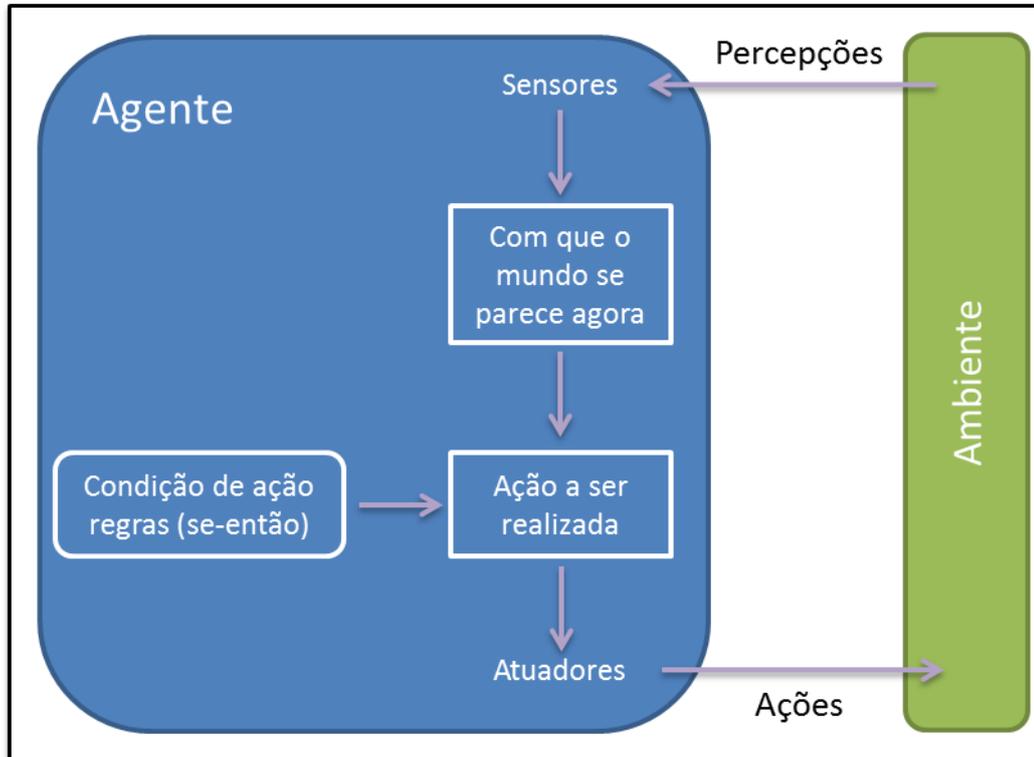
Segundo (RUSSELL e NORVIG, 2010), em um agente robótico, as entradas poderiam ser captadas por câmeras de vídeo ou sensores e detectores de infravermelho, enquanto as saídas poderiam ser motores e braços mecânicos. Para (TORREÃO, 2005), um agente poderia ser comparado a um ser humano, onde suas entradas seriam os olhos, ouvidos, tato e olfato e as ações ocorreriam através de boca, mãos e pernas.

Para (FERBER, 1999), um agente é uma entidade, física ou virtual, que pode perceber seu ambiente (mesmo que de maneira parcial) e realizar ações. Um agente é autônomo, se comunica com outros agentes e utiliza suas habilidades para atingir seus objetivos. O autor complementa ainda, que agentes reativos apenas agem por reflexo a algum estímulo, enquanto agentes cognitivos formam planos a respeito de seu comportamento.

Agentes reativos se baseiam no modelo de funcionamento de resposta a estímulos (percepção, por meio de sensores, e ação, por meio de atuadores), no qual não projetam suas ações futuras e não consideram informações históricas. A relação percepção-ação é ativada com o uso de regras de produção do tipo “Se <condição> Então <ação>”. Além disso, se comunicam com outros agentes de forma indireta, tomando conhecimento apenas das ações e comportamentos dos outros agentes através de alterações no ambiente (como que

o mundo se parece). Devido a este formato, mesmo que diversos eventos do mesmo tipo sejam processados por um agente reativo em momentos de tempo diferentes, a mesma ação-resposta deve ser executada para todos eles (BITTENCOURT, 1998); (FERBER, 1999); (WEISS, 1999). A Figura 3 apresenta o diagrama de processo decisório de um agente reativo.

**Figura 3 – Processo decisório de um agente reativo.**

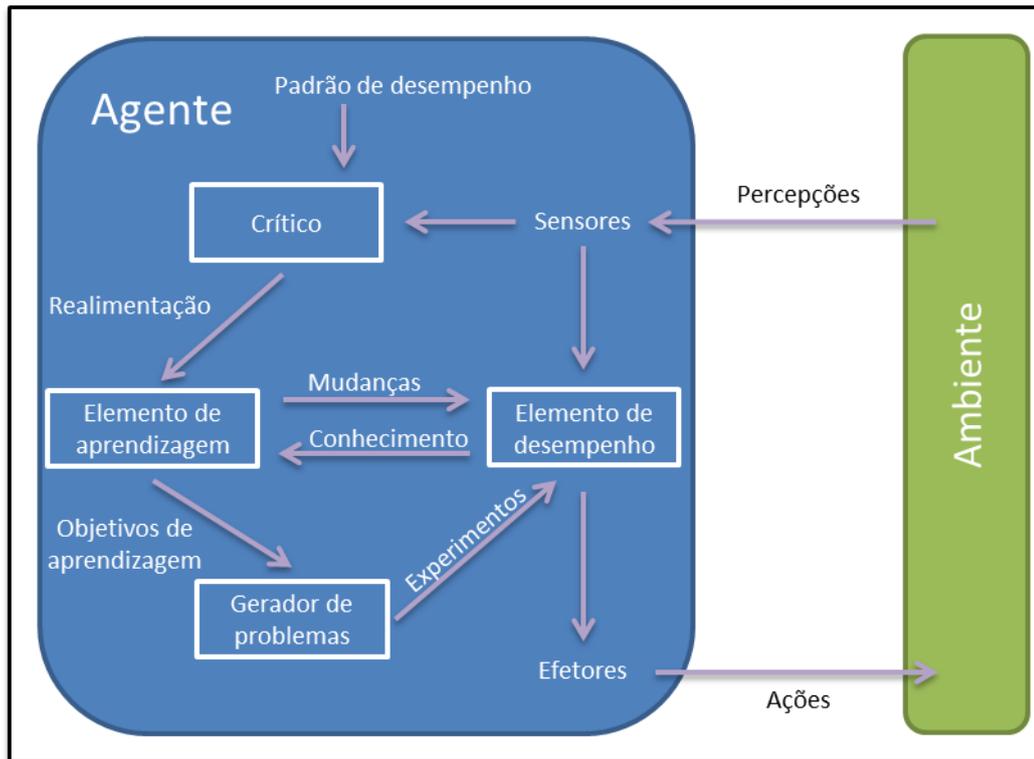


Fonte: Adaptado de (WOOLDRIDGE, 2009).

Agentes cognitivos baseiam-se em organizações sociais comuns aos seres humanos, como por exemplo, grupos, hierarquias e mercados (BITTENCOURT, 1998). Desta forma, estes agentes adquirem conhecimento comunicando-se diretamente com outros agentes, bem como, percebendo as mudanças que ocorrem no ambiente em que estão inseridos e raciocinando a respeito do comportamento dos outros agentes (SICHMAN, DEMAZEAU e BOISSIER, 1992); (BITTENCOURT, 1998); (FERBER, 1999). A Figura 4 apresenta o diagrama de processo decisório de um agente cognitivo.

Neste diagrama, verifica-se que os agentes cognitivos também possuem percepções advindas do ambiente (sensores) e executam ações que retornam ao ambiente (efetores). Em seu processo decisório, estes agentes podem utilizar estratégias de aprendizagem, o que contribui na resolução de problemas e aumenta o desempenho da tomada de decisão. Isto ocorre em forma de um ciclo, com troca de conhecimento gerado na resolução de problemas e utilizado na aprendizagem.

**Figura 4 – Processo decisório de um agente cognitivo.**



Fonte: Adaptado de (WOOLDRIDGE, 2009).

O grande diferencial dos agentes cognitivos em relação aos reativos é o fato de que os primeiros podem fazer consulta a dados históricos, pois possuem um sistema de memória. Segundo (SICHTMAN, DEMAZEAU e BOISSIER, 1992), (BITTENCOURT, 1998) e (FERBER, 1999), isso permite aos agentes considerados cognitivos utilizarem suas habilidades de raciocínio e aprendizado para planejar quais ações realizar para alcançar seus objetivos, considerando o conhecimento adquirido anteriormente. Entretanto, este processo pode resultar em mais de uma opção de ação. Fazer uma escolha só é possível graças à capacidade do agente de tomar decisões.

Para (SICHTMAN, DEMAZEAU e BOISSIER, 1992), o número de agentes cognitivos em uma comunidade ou sociedade, em geral, é pequeno. No entanto, esses agentes podem apresentar comportamento inteligente, estando em grupo ou sozinhos. Já os agentes reativos precisam organizar-se em uma complexa estrutura de sociedade, para extrair dela a inteligência que não possuem individualmente.

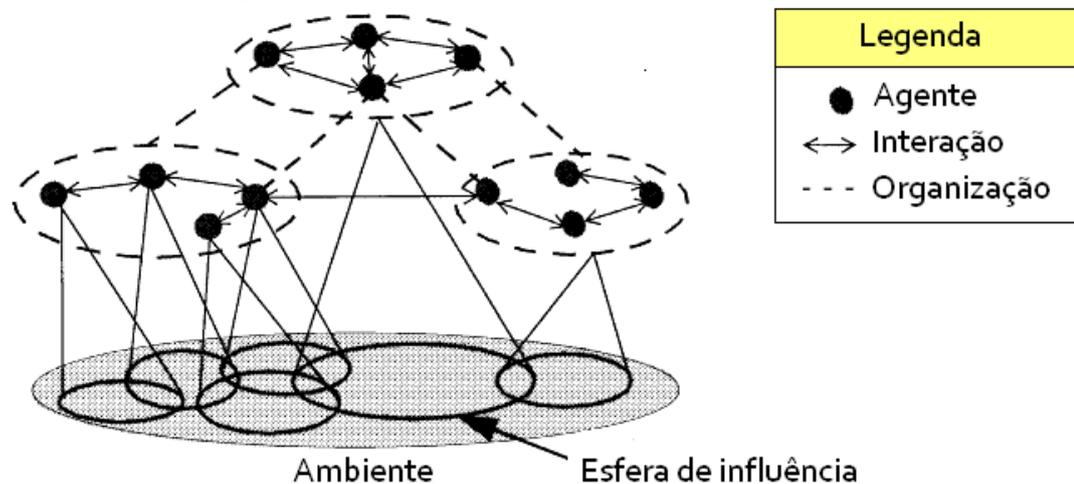
Tipicamente, quando agentes interagem, existe algum contexto organizacional entre eles (GASSER, 1991); (FERBER, 1999). Este contexto define o tipo de relação que os agentes têm entre si. Por exemplo, pode ser uma relação hierárquica, como a de diretor, gerente e colaborador, em um organograma empresarial, em que o nível superior geralmente influencia o comportamento dos inferiores. Os agentes podem, ainda, estar organizados na forma de colegas de trabalho, que ocupam o mesmo nível hierárquico em uma equipe, trabalhando de forma cooperativa (JENNINGS, 2000).

Para (WU, ZILBERSTEIN e CHEN, 2011), um SMA é composto por múltiplos agentes, independentes, que interagem em um ambiente. Segundo (WOOLDRIDGE, 2009), um SMA pode ser definido como um *software* computacional composto de dois ou mais agentes que interagem e/ou executam tarefas, para atingir objetivos comuns e/ou compartilhados. Segundo (WU, ZILBERSTEIN e CHEN, 2011), os agentes de um SMA podem ter objetivos diferentes e, inclusive, conflitantes. Desta forma, os agentes precisam interagir uns com os outros, seja para alcançar seus objetivos individuais ou para gerenciar dependências resultantes do fato dos agentes estarem inseridos em um ambiente comum (CASTELFRANCHI, 1998).

Segundo (JENNINGS, 2000), um SMA pode possuir diversos agentes, sendo que cada um pode ter diferentes capacidades de percepção e ação no ambiente. Cada agente tem uma esfera de influência distinta sobre o ambiente, ou seja, cada agente possui a capacidade de influenciar diferentes partes do universo.

A estrutura de um SMA é ilustrada na Figura 5, onde o contexto organizacional (organização) é representado pelas elipses tracejadas que envolvem os agentes pertencentes a cada organização. Ainda é possível observar a interação dos agentes, dentro e fora das organizações e como as esferas de influência dos agentes e das organizações se relacionam.

**Figura 5 – Estrutura de um sistema multiagentes.**



Fonte: Adaptado de (JENNINGS, 2000).

Segundo (WU, ZILBERSTEIN e CHEN, 2011), um SMA pode contribuir em diversas áreas de IA, quando o sistema a ser representado for composto por diversas entidades que interagem entre si e que sejam distribuídas de maneira funcional ou espacial. A colaboração entre os agentes de um SMA permite que eles realizem tarefas as quais não seriam capazes de realizar individualmente, por falta de capacidade operacional ou de conhecimento do ambiente.

## 2.3 Controle de tráfego e sistemas multiagentes

Para (SHAMSHIRBAND, 2012), é urgente a necessidade de criação de sistemas de transporte mais eficientes, que aperfeiçoem a utilização da malha viária. Ao que (BAZZAN, 2005) complementa, afirmando que são necessárias soluções inovadoras, que abordem a coordenação entre os agentes que fazem parte do sistema de tráfego urbano. Porém, (SHAMSHIRBAND, 2012) ressalta que controlar o tráfego de veículos em tempo real, em uma complexa malha de tráfego urbana, é uma tarefa extremamente desafiadora.

Segundo (TUYSLS e WEISS, 2012), muitos dos desafios práticos que a sociedade enfrenta hoje envolvem problemas complexos, com muita informação incompleta e que são de natureza distribuída. Um exemplo deste tipo de problema é o CTU. Devido à sua complexidade, torna-se impossível projetar boas soluções sem o apoio de sistemas, como os SMA, que têm se mostrado eficazes neste tipo de problema.

Congestionamentos em áreas urbanas são cada vez mais comuns nas grandes cidades e uma das maneiras de tratar este problema é melhorar a eficiência da malha viária, através do uso de sistemas de CTU. Estes sistemas têm se mostrado muito receptivo às técnicas de IA, principalmente nos recentes avanços da gestão inteligente de tráfego. De maneira mais específica, SMA aparenta ser o ambiente ideal para modelar e desenvolver sistemas de CTU (VASIRANI e OSSOWSKI, 2012).

De maneira semelhante, (VASIRANI, *et al.*, 2012) concordam que a área de CTU se tornou uma das que mais se beneficia da aplicação dos conceitos de agentes e SMA. Não só pelo caráter espacialmente distribuído do problema, mas principalmente pela organização de estruturas em forma de subsistemas, que percebem e agem sobre o ambiente de maneira autônoma. Isso torna as estruturas de agentes e SMA opções interessantes para modelar aplicações relacionadas ao CTU.

Para (BAZZAN, 2009), SMA está intimamente relacionado ao CTU, devido à natureza espacialmente distribuída dos problemas de CTU e também ao fato de que muitos atores do sistema de tráfego se encaixam muito bem no conceito de agente inteligente. Atores estes, que segundo o autor, podem ser inclusive partes da infraestrutura de trânsito. Porém, esse fácil mapeamento de agentes também traz alguns desafios, como o alto número de agentes que um sistema de CTU pode ter, o fato dos agentes considerarem apenas o seu conhecimento do ambiente para tomar suas decisões e os efeitos coletivos causados por essas decisões individuais.

## 2.4 Simulação multiagentes

De acordo com (MOSS e DAVIDSSON, 2001), em muitos casos, o comportamento representado por um sistema não pode ser definido por análises quantitativas ou estatísticas. Nestes casos, é preciso utilizar outras técnicas de engenharia de software e outros mecanismos de desenvolvimento. Para (CONTE e GILBERT, 1995), simulações permitem analisar propriedades de um modelo que ainda não estejam bem definidas analiticamente, encontrar alternativas para problemas existentes na natureza, isolar propriedades de um modelo que sejam complexas demais para serem observadas na natureza e modelar de maneira explícita os agentes de um ambiente, para analisar os efeitos de suas relações.

Segundo (SIEBERS e AICKELIN, 2008), simulação multiagentes é uma abordagem *bottom-up* para modelar o comportamento de sistemas ao longo do tempo. Para (DAVIDSSON, 2000), assim como em outras técnicas de micro simulação, em simulação multiagentes o comportamento de cada indivíduo é modelado de forma específica. Ao que (SIEBERS e AICKELIN, 2008) complementam, dizendo que, nestes sistemas, o processo de decisão é desenvolvido no nível dos agentes do sistema.

Fazendo um comparativo, (DAVIDSSON, 2000) afirma que em técnicas de macro simulação, que utilizam abordagem *top-down*, geralmente, são utilizados modelos matemáticos para representar as características de uma população inteira. As simulações são, então, realizadas através de alterações destas características, causando mudança de comportamento também na população inteira.

Em macro simulação as estruturas do sistema são definidas e utilizadas para manipular o sistema, enquanto em micro simulação as estruturas emergem, de acordo com as decisões e interações dos agentes no ambiente (DAVIDSSON, 2000); (SIEBERS e AICKELIN, 2008). Ao que (WOOLDRIDGE, 2009) complementa, dizendo que simulação multiagentes pode ser utilizada para perceber e compreender as estruturas que emergem em um sistema, através do comportamento de seus agentes.

No contexto de simulação multiagentes, o SMA é utilizado como um modelo que representa algum ambiente do mundo real. Os ambientes representados geralmente possuem diversos tipos de agentes, que interagem entre si e ainda com o ambiente, de maneira diversificada e complexa (LUCK, *et al.*, 2005). Segundo (WOOLDRIDGE, 2009), agentes podem ser utilizados para representar tanto organizações e entidades, quanto pessoas e para (RUSSELL e NORVIG, 2010), um agente utilizado em simulações também pode ser utilizado em um ambiente real.

Devido à complexidade do mundo real, um modelo de simulação deve, necessariamente, ser uma simplificação e uma aproximação do sistema desejado (SIEBERS e

AICKELIN, 2008); (RUSSELL e NORVIG, 2010). Muito do conhecimento dos agentes em uma simulação é o mesmo que será empregado em situações reais, porém existem diferenças em relação à complexidade em perceber e manipular o ambiente (RUSSELL e NORVIG, 2010). Em modelagem de simulação, a questão é saber dosar, de maneira precisa, simplificação e abstração. Somente as variáveis que são, de fato, relevantes para os objetivos do estudo devem ser selecionadas e representadas no modelo de simulação (SIEBERS e AICKELIN, 2008).

## 2.5 Heurísticas

Conforme (PEARL, 1984), uma heurística consiste em critérios, métodos, ou princípios para decidir a maneira mais eficaz para atingir algum objetivo específico, entre vários cursos possíveis de ação. Segundo (BONET e HANSEN, 2010), algoritmos de programação dinâmica tradicionais resolvem todos os estados dos problemas de otimização, enquanto as heurísticas se concentram em encontrar apenas uma solução, acessando os estados disponíveis a partir do estado inicial e utilizando uma política de busca eficiente.

Para (AGAFONOV, *et al.*, 2009), muitas análises exigem a adoção de várias hipóteses simplificadas, de modo a lidar com a complexidade de certas situações. Embora estas simplificações sejam menos precisas em comparação com a solução de equações analíticas, quando utilizadas adequadamente e juntamente com a verificação empírica das heurísticas, torna-se um poderoso paradigma de modelagem de sistemas.

Ao que (LONG, SZETO e HUANG, 2014) complementam, ao afirmar que quando todas as soluções de um problema não podem ser obtidas utilizando os métodos de solução exatos, devido ao grande número de variáveis, as heurísticas geralmente são utilizadas para encontrar uma boa, mas não necessariamente a melhor, solução dentro de um período razoável de tempo computacional.

De forma mais prática, (ZHAO e ZENG, 2007) afirmam que a principal vantagem das heurísticas é que elas sempre são capazes de encontrar soluções razoáveis para qualquer tamanho de problema de tráfego. Estes problemas são relativamente fáceis de ser expressos em forma de heurística e geralmente são difíceis de ser representados com precisão em termos de funções de restrição matemática.

Ao que (CHIOU, 2007) complementa dizendo que a combinação de heurísticas locais e globais possibilita o alcance de desempenho consideravelmente melhor do que outras abordagens, ao resolver problemas de controle de tráfego. Esta eficiência é produzida pela decomposição de um problema em um conjunto de problemas menores e do fato de que, em cada iteração, apenas uma solução precisa ser calculada.

Na mesma linha, (CIPRIANI, GORI e PETRELLI, 2012) reforçam que o controle da malha viária de trânsito é um problema complexo, geralmente formulado como um problema de otimização não linear e com variáveis discretas e contínuas e ainda restrições. Por isso, os melhores e mais eficientes métodos de solução para este tipo de problema são baseados em heurísticas.

Por fim, (ZHAO e ZENG, 2007) alertam para o fato de que as heurísticas também têm desvantagens. Geralmente as soluções geradas são incompletas, devido à simplificação realizada no processo para permitir que soluções sejam encontradas em menor tempo. Estas soluções, apesar de serem fáceis de compreender ou aceitar, podem não ser soluções ótimas. Os autores destacam, ainda, o fato de que o sucesso de uma heurística depende muito do conhecimento e das experiências de quem a constrói e da capacidade de desenvolvê-la com habilidade para lidar com problemas que surjam mesmo depois que ela já tenha sido desenvolvida.

## 2.6 Algoritmos de aprendizagem

Diversos trabalhos relacionados ao tema (BAZZAN, 2005), (OLIVEIRA e BAZZAN, 2007), (KRÓL e MROZEK, 2011), (XIE, BARLOW e RUBINSTEIN, 2011), (SHAMSHIRBAND, 2012), (SHIRAI, *et al.*, 2012) e (BATISTA JR e COUTINHO, 2013) propuseram SMA para operar no controle adaptativo de tráfego, de forma dinâmica. Porém, no que diz respeito ao controle adaptativo, os trabalhos se restringem a selecionar o modelo de controle de tráfego mais adequado, dentre um universo de modelos pré-definidos.

Explorando esta questão, verificou-se que para (TORREY e TAYLOR, 2013), os algoritmos de aprendizado podem utilizar informações coletadas no ambiente para melhorar a política de controle de um agente, a fim de maximizar sua eficiência. Por outro lado, é relevante considerar que (TAYLOR e STONE, 2011) alertam que o aprendizado dos agentes pode requerer quantidades enormes de dados e de esforço de processamento, mesmo que as melhores e mais recentes técnicas de aprendizado sejam utilizadas. Desta forma, é necessário ter cuidado ao aplicar técnicas de aprendizado a agentes, porém seus benefícios não podem ser desprezados.

Em busca de métodos de aprendizado mais eficientes para aplicar aos agentes, (KOGA, *et al.*, 2013) constatou que o processo de aprendizagem no nível abstrato faz com que o agente aprenda mais rápido do que no nível concreto. Além disso, uma política de tomada de decisão em nível abstrato oferece uma orientação mais eficaz de resultados aos agentes. Ao concordar com a importância da abstração no processo de aprendizagem dos agentes, (TAGHIZADEH e BEIGY, 2013) afirmam que algoritmos convencionais, baseados em modelos, não representam abstrações de alto nível. Porém os autores atentam para o fato de que

aprender e planejar em vários níveis de abstração é um dos principais desafios no processo de aprendizagem.

Basicamente, dois principais formatos de abstração são utilizados. A abstração de estado descarta informações irrelevantes de um estado, criando uma generalização do estado (DIETTERICH, 2000). Por exemplo, considerando o estado em que um agente está em uma sala A, seu estado seria NaSala(a). Outro estado seria NaSala(b). Uma abstração destes estados seria NaSala(X), que significa que o agente está em uma sala, mas não especifica em qual sala ele está (KOGA, *et al.*, 2013). A abstração temporal reduz as ações de uma série de passos a uma única ação, para um período maior de tempo. Isso dá ao agente a capacidade de planejar e agir em diferentes esferas de tempo, planejando, por exemplo, suas ações por dia, turno, hora e minutos (MCGOVERN, 2002).

Ainda com o objetivo de identificar métodos mais eficientes de aprendizado para os agentes, verifica-se que para (NUXOL e LAIRD, 2007) os processos de raciocínio e tomada de decisão podem ser beneficiados pelo uso de estruturas de memória, para armazenar lembranças de fatos ocorridos no curto e no longo prazo. Os autores alertam, porém, que a utilização destas estruturas pode demandar uma grande quantidade de recursos computacionais e dificultar a obtenção de resultados em tempo real.

Complementando esta linha de raciocínio, (SUBAGDJA, *et al.*, 2012) afirmam que modelos de memória podem aprender a reconhecer e a aprender novos padrões de conhecimento mesmo durante sua utilização. Além disso, podem evoluir de forma dinâmica, criando novas categorias, caso ainda não exista alguma categoria correspondente a um objeto identificado ou caso nenhuma das categorias existentes satisfaça as intenções do agente.

## 2.7 Trabalhos relacionados

Em (BAZZAN, 2012), é possível ter um panorama geral sobre o estado da arte da utilização de agentes para modelagem, simulação e controle de tráfego urbano. Além disso, é destacada a existência da oportunidade de realizar uma grande mudança no paradigma de controle de tráfego, passando a considerar o ser humano como uma fonte de informações e não mais apenas como um receptor delas. O autor propõe, ainda, uma agenda a ser discutida sobre os futuros desafios que podem ser abordados e reforça a ideia de que os seres humanos devem passar a fazer parte dos processos de tomada de decisão do sistema.

Os sistemas pioneiros em trabalhar com CAT utilizavam heurísticas de otimização. Em seguida, popularizam-se os sistemas baseados em estratégia de horizonte rolante e MCP (Modelo de Controle Preditivo). Porém, com o passar do tempo, estes métodos passaram a apresentar problemas relativos à escalabilidade, gerando modelos complexos demais para

serem computados em tempo real, à medida que os sistemas de tráfego crescem em tamanho, complexidade e, conseqüentemente, volume de dados (WU, LIU e GETTMAN, 2010).

Para amenizar estes problemas, (LIN, *et al.*, 2012) citam algumas propostas, como a divisão do sistema em subconjuntos, processamento em segundo plano e métodos de otimização, além de explorarem mais amplamente a redução da complexidade dos modelos. Da mesma forma, (XIAO-FENG, *et al.*, 2012) citam que é necessário adotar esquemas de redução de espaço que sejam mais simples, horizontes de otimização mais curtos, métodos de resolução mais eficientes, boas funções de aproximação e heurísticas para as buscas.

Outros trabalhos sobre controle de tráfego têm empregado teorias de controle. Em (DIAKAKI, PAPAGEORGIOU e ABOUDOLAS, 2002), uma abordagem multivariada é utilizada para calcular o plano de controle ótimo de um sistema, tratando-o como um problema quadrático linear. O trabalho de (WALLER e ZILIASKOPOULOS, 2006), apresenta um modelo consistente de controle de restrições, baseado em programação linear, porém utilizando simplificações da realidade para atingir estes resultados.

Em linha de pesquisa semelhante, (AZIZ, UKKUSURI e SATISH, 2012) desenvolveram um *framework* para melhoria de desempenho de controle de tráfego, baseado no modelo de transmissão celular (MTC) de (DAGANZO, 1994), que mantém uma relação linear entre vazão e densidade de fluxo, assumindo, para isso, variáveis discretas de tempo e espaço. Já (XIAO-FENG, *et al.*, 2012) focaram em reduzir o espaço de busca e tornar mais eficiente o descarte de soluções ruins durante a busca pela melhor solução, explorando a estrutura de fluxo de informação do horizonte de predição.

Explorando a diversidade de técnicas que a IA proporciona, (KEYARSALAN e MONTAZER, 2011) uniram lógica *Fuzzy* e ontologias, para melhorar o processo de tomada de decisão de agentes inteligentes que coordenam cruzamentos de vias que possuem semáforos. Neste caso, o trabalho deixa uma lacuna apenas pelo fato de simplificar o problema ao manipular apenas cruzamentos isolados, sem considerar sua relação com cruzamentos vizinhos e o restante do sistema de tráfego. Fatores estes que, sabidamente, interferem no fluxo do tráfego de grandes vias (BALAJI e SRINIVASAN, 2011).

Para (BALAJI e SRINIVASAN, 2011), uma estrutura de agentes organizada de forma hierárquica expande a capacidade de gerenciamento do sistema e utiliza substancialmente menos comunicação, do que se houvesse apenas um nível hierárquico e todos os agentes precisassem se comunicar entre si. Os autores propõem ainda a utilização de lógica *Fuzzy* tipo-2, introduzida por (ZADEH, 1975), pois esta tem a capacidade de obter melhores resultados, operando sobre as incertezas inerentes ao comportamento dos sistemas de tráfego urbano.

Explorando esta questão, (DAHAL, ALMEJALLI e HOSSAIN, 2013) optam por utilizar redes neurais *Fuzzy*. Para os autores, as técnicas *Fuzzy* trabalham de maneira sinérgica os

dados estatísticos e o conhecimento dos especialistas, enquanto as redes neurais utilizam seu poder de aprendizado e retroalimentação para melhorar as regras *Fuzzy*.

Já (JACOB e ABDULHAI, 2010) apresentam o aprendizado por reforço como uma ferramenta poderosa para o controle de tráfego. Os autores argumentam que a principal vantagem do mecanismo de aprendizado é a possibilidade do sistema se adaptar às alterações do cenário, mesmo em cenários nunca antes controlados. Além disso, não é necessário possuir um modelo de controle inicial, pois o próprio aprendizado se encarrega de criá-lo.

Seguindo um caminho diferente, (WU, ABBAS-TURKI e EL MOUDNI, 2012) utilizaram otimização combinacional para resolver problemas de controle de tráfego, mesmo cientes de que sobre grande volume de tráfego esta estratégia se tornaria muito complexa e computacionalmente inviável. Após analisar a complexidade de cada problema, o sistema opta por resolvê-lo através de otimização combinacional ou de um sistema de colônia de formigas, que apresenta excelente desempenho operando sobre grande volume de tráfego.

A seguir, a Figura 6 apresenta um comparativo entre os principais aspectos dos trabalhos relacionados analisados. Os elementos apresentados referem-se ao objetivo da pesquisa desenvolvida (problema de pesquisa), às técnicas utilizadas visando atingir resultados satisfatórios, a arquitetura adotada para organizar estruturalmente o sistema e a estratégia empregada para abordar o problema.

Por fim, (MCKENNEY e WHITE, 2013) defendem o uso de sistemas auto-organizados, que não possuem coordenação centralizada. Para os autores, lógica *Fuzzy*, sistemas de apoio à decisão, inteligência de enxames, computação evolucionária, aprendizado por reforço e redes neurais até são efetivos quando aplicados a pequenas áreas de tráfego, mas são ineficientes para trabalhar adequadamente com grandes volumes de dados.

Figura 6 - Comparativo dos trabalhos relacionados

Autores	Objetivo	Técnica(s)	Arquitetura	Estratégia
Diakaki, Papageorgiou e Aboudolas (2002)	Resolver o problema de desempenho da estratégia de controle responsivo.	Regulador quadrático linear	Hierárquica	Responsiva
Waller e Ziliaskopoulos (2006)	Reduzir a complexidade de modelos de controle de tráfego.	Programação com restrição de possibilidade	Centralizada	Alocação dinâmica de tráfego
Bazzan, De Oliveira e Da Silva (2010)	Avaliar o aprendizado multiagentes monitorado por agentes tutores.	Aprendizado por reforço multiagentes.	Hierárquica	Responsiva
Jacob e Abdulhai (2010)	Realizar o controle de tráfego de maneira automática e mais efetiva.	Agentes inteligentes e aprendizado por reforço.	Centralizada	Responsiva
Balaji e Srinivasan (2011)	Reduzir o tempo que os veículos ficam parados em semáforos.	Sistemas multiagentes e lógica Fuzzy tipo 2.	Distribuída	Modelo de cooperação entre vizinhos
Keyarsalan e Montazer (2011)	Propor reuso do conhecimento adquirido em controle de semáforos.	Agentes inteligentes, lógica Fuzzy e ontologias.	Distribuída	Responsiva
Lin <i>et al.</i> (2012)	Reduzir a complexidade de modelos de controle de tráfego.	Modelo preditivo de controle	Hierárquica	Baseada em modelo
Wu, Abbas-Turki e El Moudni (2012)	Resolver o problema de desempenho da otimização combinacional	Otimização combinacional e sistema de colônia de formigas.	Centralizada	Gerenciamento autônomo de cruzamentos
Xiao-Feng <i>et al.</i> (2012)	Reduzir a complexidade de modelos de controle de cruzamentos.	Algoritmo recursivo para frente	Centralizada	Controle de cruzamento orientado a cronograma
Dahal, Almejalli e Hossain (2013)	Auxiliar controladores de tráfego a identificar ações de controle que sejam globalmente coordenadas.	Sistemas multiagentes e redes neurais Fuzzy.	Hierárquica	Baseada em modelo
Foulds <i>et al.</i> (2013)	Melhorar a estimativa de matrizes origem-destino sobre dados incompletos e imprecisos.	Conjuntos Fuzzy e sucessivas aproximações lineares	Hierárquica	Responsiva
Mckenney e White (2013)	Melhorar o controle adaptativo de semáforos.	Sistemas multiagentes e algoritmo adaptativo.	Distribuída	Responsiva

Fonte: Autor.

Já em relação à arquitetura do sistema, (BALAJI e SRINIVASAN, 2011) preferem uma estrutura organizada de forma hierárquica, que expande a capacidade de gerenciamento do sistema e utiliza substancialmente menos comunicação do que se houvesse apenas um nível hierárquico. Ao que (DAHAL, ALMEJALLI e HOSSAIN, 2013) concordam, citando que é possível controlar pequenos trechos com apenas um nível hierárquico, porém o enorme número de variáveis e ações possíveis em grandes trechos de tráfego sobrecarrega o processamento, tornando o modelo com apenas um nível ineficiente.

Em sentido oposto, (MCKENNEY e WHITE, 2013) embasam seus estudos em uma arquitetura totalmente distribuída, em que a coordenação global emerge das ações locais realizadas por cada agente. Segundo os autores, esta arquitetura torna o sistema escalável, permitindo operar grandes áreas de tráfego. Além disso, o sistema também fica mais robusto, pois, dada a independência dos agentes, caso algum agente ou canal de comunicação fique indisponível, apenas uma pequena área do sistema será afetada.

Buscando soluções tanto para os problemas existentes na arquitetura centralizada quanto na totalmente distribuída, (BAZZAN, DE OLIVEIRA e DA SILVA, 2010) sugerem uma arquitetura em que grupos com quantidade limitada de agentes são formados. Os agentes operam de forma individual, porém cada grupo é supervisionado por um agente tutor. Este agente tem o papel de coletar as decisões dos agentes do grupo, analisar a melhor delas e sugeri-la para os demais agentes. Os autores concluem que, apesar de melhorar o desempenho do sistema, este formato precisa de mais estudos para apresentar resultados de impacto.

Analisando a Figura 6, nota-se que, além dos objetivos diretamente relacionados ao controle de tráfego, atualmente existem diversos trabalhos com foco em redução da complexidade e melhoria do desempenho dos modelos existentes. Além disso, é possível perceber o emprego de diversas técnicas, em grande parte de maneira híbrida, a fim de extrair o melhor de cada uma.

Quanto à arquitetura, existe um equilíbrio muito grande entre os três formatos encontrados: hierárquico (uma entidade coordena diversas outras e pode também ser coordenada, no formato comando e controle), centralizado (uma única entidade controla o sistema inteiro) e distribuído (entidades do sistema se relacionam de forma cooperativa, sem comando e controle).

Em relação à estratégia, predomina a responsiva, em que o sistema monitora o ambiente e reage de maneira particular a cada situação analisada. Além desta, percebe-se grande diversificação na busca por novas abordagens, ressaltando a complexidade de controlar de maneira eficiente um SCTU.

## 2.8 Considerações

Este capítulo realizou um estudo acerca dos temas considerados relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. Eles serviram de base para a construção da proposta desta dissertação e, durante o período de desenvolvimento, foram o guia que definiu os rumos que foram seguidos.

A seção sobre CTU expôs a relevância do assunto e embasou afirmações sobre a necessidade de realizar mais estudos sobre o tema. Foram levantadas algumas das principais características e dos métodos aplicados desta área e apresentados alguns dos principais sistemas que têm sido utilizados nas últimas décadas. Os estudos relacionados a esta seção foram importantes para justificar o desenvolvimento deste trabalho e para situar o autor sobre o CTU.

A segunda seção apresentou inicialmente os agentes inteligentes, descrevendo suas principais características e utilizações, além de expor as principais diferenças entre os agentes reativos e os cognitivos. Em seguida o conceito de SMA foi explorado, bem como sua estrutura e formas de organização, destacando a função dos agentes inteligentes no sistema. As definições apresentadas nessa seção foram base do desenvolvimento dos agentes inteligentes e da sua alocação no sistema de simulação de tráfego utilizado.

A terceira seção reforça a necessidade de desenvolver maneiras inovadoras de enfrentar os problemas existentes no CTU, gerando soluções mais eficientes. Além disso, demonstra a relação entre o controle de tráfego e os sistemas multiagentes, trazendo a visão de vários autores a respeito do tema e reforçando a afirmação de que SMA é uma opção bastante viável e interessante para o CTU. Os estudos desta seção reforçaram e deram segurança à ideia de utilizar SMA para realizar o CTU, visto que vários autores destacaram esta necessidade.

A seção sobre simulação multiagentes aborda os conceitos de micro e macro simulação e, respectivamente, suas abordagens *bottom-up* e *top-down*, elencando as características de cada uma delas e a maneira de implementá-las envolvendo o conceito multiagentes. Além disso, destaca os benefícios da simulação frente ao desenvolvimento de soluções práticas e a importância de balancear adequadamente realidade e abstração na criação do modelo de simulação. Esta seção contribuiu com o desenvolvimento deste trabalho ao elucidar os principais conceitos sobre simulação multiagentes e alertar sobre os principais pontos que merecem atenção neste assunto.

As heurísticas, apresentadas na quinta seção deste capítulo, foram o ponto chave no desenvolvimento da solução apresentada neste trabalho. A definição apresentada, reforçada pela visão dos demais autores citados na seção, embasou a compreensão do conceito e

encorajou sua utilização no formato de algoritmo de controle, responsável pela tomada de decisão dos agentes inteligentes inseridos no sistema de simulação.

Algoritmos de aprendizagem foram estudados e apresentados na sexta seção, com o objetivo de avaliar sua utilização, de maneira a aprimorar o processo de tomada de decisão dos agentes e, desta forma, melhorar o desempenho geral do sistema. Embora este conceito não tenha sido empregado na solução apresentada neste trabalho, ele continua sendo considerado relevante e merece mais estudos. Com base nos estudos realizados, é possível afirmar que a efetiva utilização de algoritmos de aprendizado, no contexto do CTU, traria resultados ainda mais relevantes.

Por fim, um extenso estudo de trabalhos relacionados ao tema deste trabalho foi apresentado na seção 2.7, buscando avaliar a efetiva utilização dos conceitos discutidos nas seções anteriores do mesmo capítulo. Este estudo proporcionou uma visão ampla a respeito dos conceitos que têm sido empregados e da forma como têm sido empregados nos estudos realizados sobre o tema, possibilitando ao autor situar os objetivos propostos e alinhar o desenvolvimento do trabalho realizado.

### 3 METODOLOGIA

De acordo com a classificação de (SANTOS, 2000), apresentada na Tabela 1, trata-se de uma pesquisa de nível acadêmico, exploratória e descritiva quanto aos objetivos e bibliográfica e experimental quanto ao formato de coleta de dados. Foram utilizadas informações de fontes bibliográficas e de campo e as variáveis analisadas são de natureza quantitativa.

**Tabela 1 - Classificação da pesquisa científica**

Nível	Objetivo	Coleta de dados	Fonte de informação	Variáveis	
Acadêmico	Exploratória	Experimental	Campo	Uni fatorial	Qualitativa
Ponta	Descritiva	Levantamento	Laboratório	Multifatorial	Quantitativa
	Explicativa	Estudo de caso	Bibliografia		
	Predição	Pesquisa bibliográfica			
		Pesquisa documental			

**Fonte: (SANTOS, 2000).**

A pesquisa é considerada exploratória e descritiva quanto aos objetivos, pois realiza uma vasta análise dos trabalhos existentes sobre o tema proposto, descrevendo o atual estado de desenvolvimento e os principais conceitos utilizados e, com base neste estudo o no sistema desenvolvido, propõem uma nova maneira de abordar os desafios identificados.

Quanto ao formato de coleta de dados, foi classificada como bibliográfica e experimental, por se basear em diversos estudos realizados, principalmente os descritos na seção 2.7, do capítulo 2, e, após o desenvolvimento do sistema proposto, produzir dados a respeito de simulações de tráfego, posteriormente utilizados nas análises que deram origem aos resultados apresentados neste trabalho.

A partir da formulação do projeto desta dissertação e durante todo o seu desenvolvimento, foram utilizadas informações de fontes bibliográficas para definir conceitos e direcionar o desenvolvimento deste trabalho. Também foram de essencial importância para o alcance dos objetivos e resultados apresentados neste trabalho, os dados sobre o tráfego coletados em campo, através da parceria estabelecida com a EPTC.

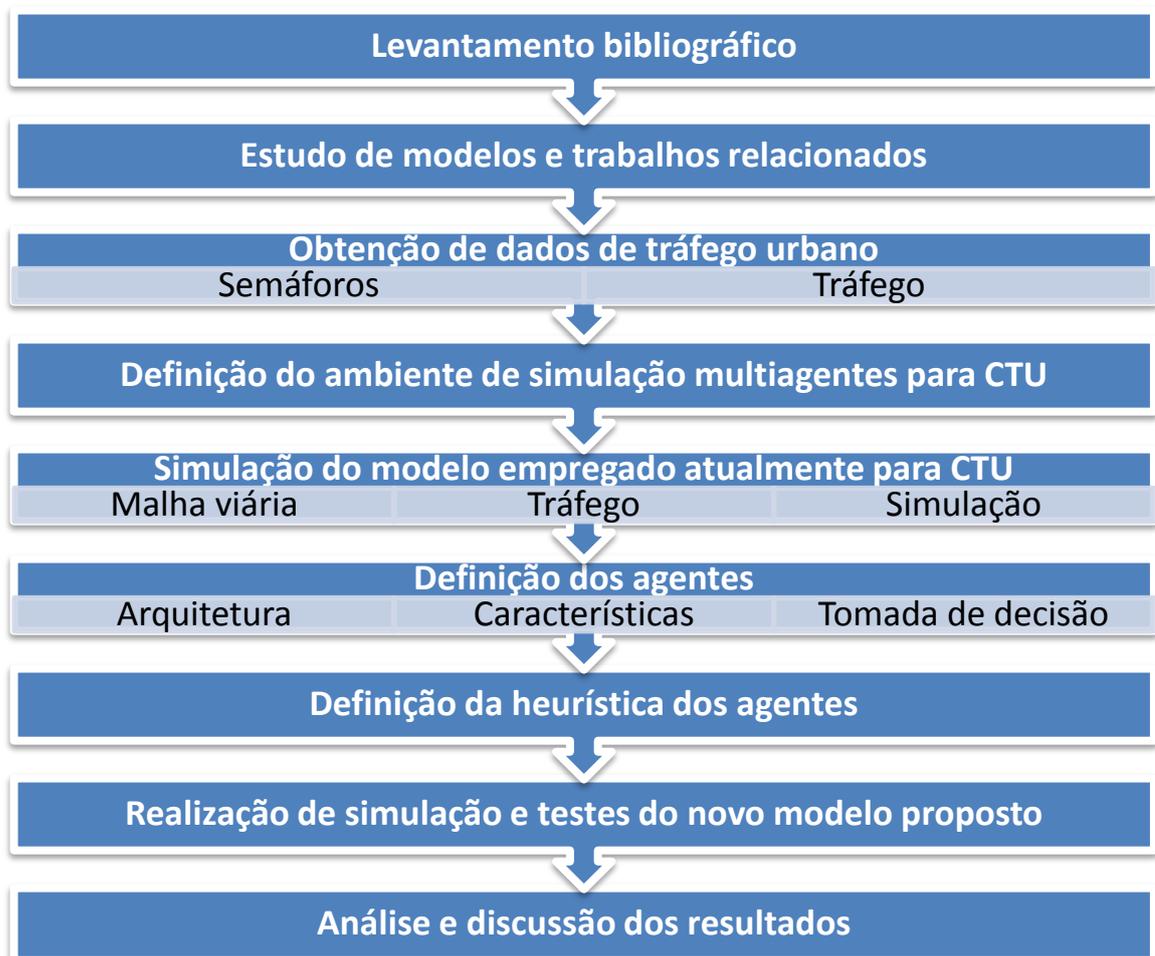
Já as variáveis analisadas durante o desenvolvimento e apresentadas nos resultados deste trabalho são de natureza quantitativa, pois medem e comparam o desempenho do sistema em função de quantidades, tempos, velocidades e distâncias. A pesquisa também se destaca por ser qualitativa, em relação à análise dos resultados gerados com a proposta da

heurística para os semáforos inteligentes, possibilitando conhecimento posterior para tomada de decisão pelos órgãos responsáveis pelo tráfego urbano, no caso deste trabalho, a EPTC em Porto Alegre.

### 3.1 Procedimentos metodológicos

Para atingir os objetivos específicos deste trabalho, o presente estudo foi estruturado de acordo com o fluxo apresentado na Figura 7.

**Figura 7 – Fluxograma executivo do projeto de pesquisa**



Fonte: Autor.

O levantamento bibliográfico ocorreu durante praticamente todo o período de execução do projeto, com maior ou menor intensidade. Nesta etapa buscou-se, principalmente, entender o estado da arte do domínio do problema escolhido. Foram realizados estudos de trabalhos relacionados ao tema proposto, buscando identificar lacunas e boas práticas nos trabalhos realizados até agora.

Foram analisados os modelos de controle de tráfego existentes, com o objetivo de entender quais foram as abordagens propostas, as dificuldades encontradas e os resultados alcançados. Além disso, foi feito um levantamento comparativo entre as ferramentas de ambientes de simulação de tráfego utilizadas, para que uma ferramenta adequada fosse selecionada e utilizada nas atividades seguintes.

Selecionada a ferramenta e levantado o conhecimento necessário acerca do estado da arte, partiu-se para a representação do modelo de controle de tráfego utilizado atualmente na ferramenta de simulação. Desta forma, obteve-se um modelo virtual da realidade atual, onde foram realizados os experimentos desejados. Para dar maior fidelidade aos experimentos, foram utilizados dados reais de tráfego urbano de alguns pontos da cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.

Concluídas as tarefas até este ponto, o modelo de simulação estava pronto, rodando sobre os dados reais. Foram então realizadas simulações, para a compreensão e análise do sistema. Além disso, foram gerados dados a respeito do tráfego produzido por este modelo, que foram utilizados posteriormente nas análises que deram origem aos resultados apresentados neste trabalho.

Deu-se início então ao processo de construção das melhorias propostas ao ambiente, com a transformação dos semáforos do sistema em agentes inteligentes. Para isso, foram realizados estudos sobre agentes relacionados ao referencial de CATU, com o objetivo de identificar as opções que melhor atendessem às necessidades específicas do novo modelo proposto. Esta foi a etapa de maior experimentação e exploração de possibilidades, até que um modelo adequado foi definido.

Optou-se pela utilização de agentes reativos neste trabalho, seguindo a linha de pesquisa da maioria dos trabalhos pesquisados, relacionados ao tema. A estes agentes foram incorporadas estruturas de coleta de dados e uma heurística, responsável por processar os dados e tomar as decisões acerca da manipulação do semáforo. O algoritmo utilizado teve como base alguns dos trabalhos estudados e propôs melhorias na maneira de identificar os congestionamentos.

Em seguida, foi repetida a simulação realizada inicialmente, sobre o modelo de controle de tráfego tradicional, porém agora com a presença dos agentes no ambiente. Novamente foram gerados dados a respeito do tráfego produzido pelo modelo, que foram utilizados em comparativos entre o novo modelo e o construído inicialmente.

Estes dados foram então analisados e serviram de base para as conclusões apresentadas neste estudo. Além de melhores resultados no novo modelo proposto, buscou-se encontrar novas oportunidades de melhorias e deixar sugestões de novos trabalhos a serem desenvolvidos no futuro, dando continuidade a este estudo.

Nas seções a seguir, cada uma das etapas apresentadas nos procedimentos metodológicos (Figura 7), será detalhada.

### **3.2 Obtenção de dados de tráfego urbano**

Com o objetivo de dar maior fidelidade aos dados utilizados nas simulações e de garantir a qualidade dos resultados obtidos, optou-se por buscar dados reais de tráfego junto a uma entidade da área. Em visita à Empresa Pública de Transportes e Circulação (EPTC), em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o projeto de pesquisa foi apresentado e a entidade se dispôs a fornecer alguns dados a respeito de pontos de tráfego, considerados relevantes por ela, em Porto Alegre.

Nos primeiros dias de fevereiro de 2014 foram realizados contatos telefônicos com a EPTC, através do seu setor de Assessoria de Comunicação, que solicitou um roteiro, com detalhes sobre os autores, a instituição de ensino e os objetivos da pesquisa. Estes dados foram utilizados para que a empresa compreendesse melhor o assunto da pesquisa e encaminhasse a solicitação ao setor adequado. O roteiro foi enviado por *e-mail* em meados de fevereiro do mesmo ano.

Cerca de um mês depois, após novos contatos telefônicos, desta vez com o setor de Pesquisas, foi marcada uma reunião presencial, na sede da EPTC, em Porto Alegre. Nesta reunião o projeto de pesquisa foi apresentado ao setor de Pesquisas que, por sua vez, apresentou o formato dos dados de que dispunha a respeito da contagem de veículos e dos planos de controle de semáforos.

Ainda nesta reunião, em comum acordo e de maneira ampla, foi definida a região de Porto Alegre, apontada pela EPTC como relevante e em que estavam sendo realizados estudos a respeito do volume de tráfego, que seria utilizada como referência neste trabalho.

Ao final da reunião, a entidade pediu que fosse realizada a solicitação formal dos dados, através do setor de Atendimento ao Cidadão. Neste setor, foi realizada e protocolada a requisição 008.001112.14.7, em que foram descritos os dados solicitados, alguns detalhes da pesquisa e a maneira como os dados seriam utilizados.

Em meados do mês de abril, a Equipe de Pesquisas de Trânsito da EPTC entrou em contato novamente, através de *e-mail*, enviando a Figura 8 para que fosse analisada. Após ser considerada adequada, a Figura 8 passou a ser utilizada como referência, para demarcar a região de foco deste trabalho.

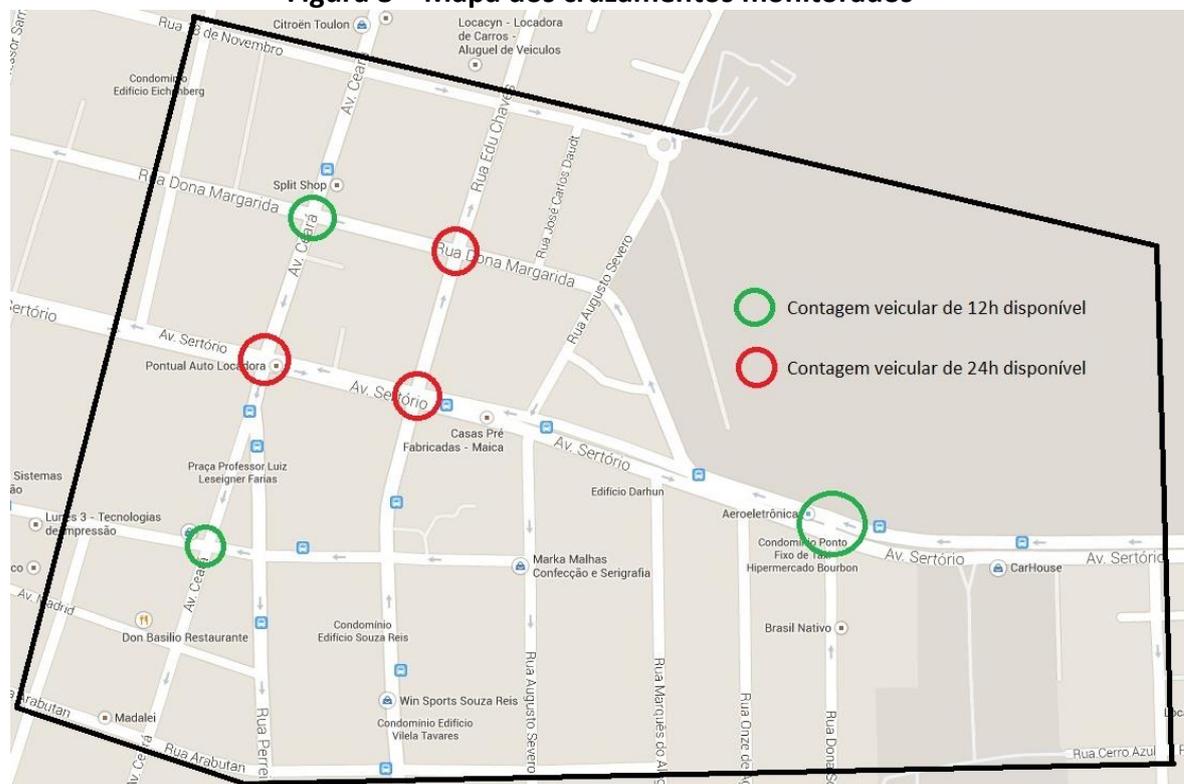
No início do mês de maio foi feito novo contato com a EPTC, que informou que a liberação dos dados dependia apenas da liberação do departamento jurídico da empresa.

Após alguns meses, nos primeiros dias do mês de agosto, em novo contato por *e-mail*, a empresa informou que os dados estavam disponíveis no setor de atendimento.

Conforme mostra a Figura 8, foram fornecidos dados a respeito do volume de tráfego em seis cruzamentos considerados relevantes pela EPTC. Também foram fornecidos os programas semafóricos para estes mesmos cruzamentos. Os cruzamentos em questão são os da Avenida Sertório com Avenida Ceará, Sertório com Rua Souza Reis, Sertório com Rua Dona Sebastiana, Rua Dona Margarida com Rua Edu Chaves, Dona Margarida com Ceará.

O único caso em que a contagem de veículos e a programação semafórica não coincidiram foi no cruzamento entre a Avenida Ceará e a Rua Dr. João Inácio, pois este não possui semáforo. Porém, neste caso, foi fornecida a programação semafórica do cruzamento mais próximo, que é o da Avenida Pereira Franco com a Rua Dr. João Inácio.

**Figura 8 – Mapa dos cruzamentos monitorados**



Fonte: (EPTC, 2015).

Embora os dados fornecidos sejam públicos e estejam disponíveis a quem por eles se interesse mediante solicitação à EPTC, a entidade solicitou a assinatura de um termo de compromisso, no qual consta que os dados fornecidos para este projeto sejam utilizados única e exclusivamente no âmbito acadêmico e apenas para este projeto. Além disso, tais dados não podem ser divulgados publicamente, sem a autorização prévia da EPTC.

Por este motivo, é importante destacar que todos os exemplos citados neste trabalho, que apresentem dados relativos ao volume de tráfego de veículos ou aos programas de

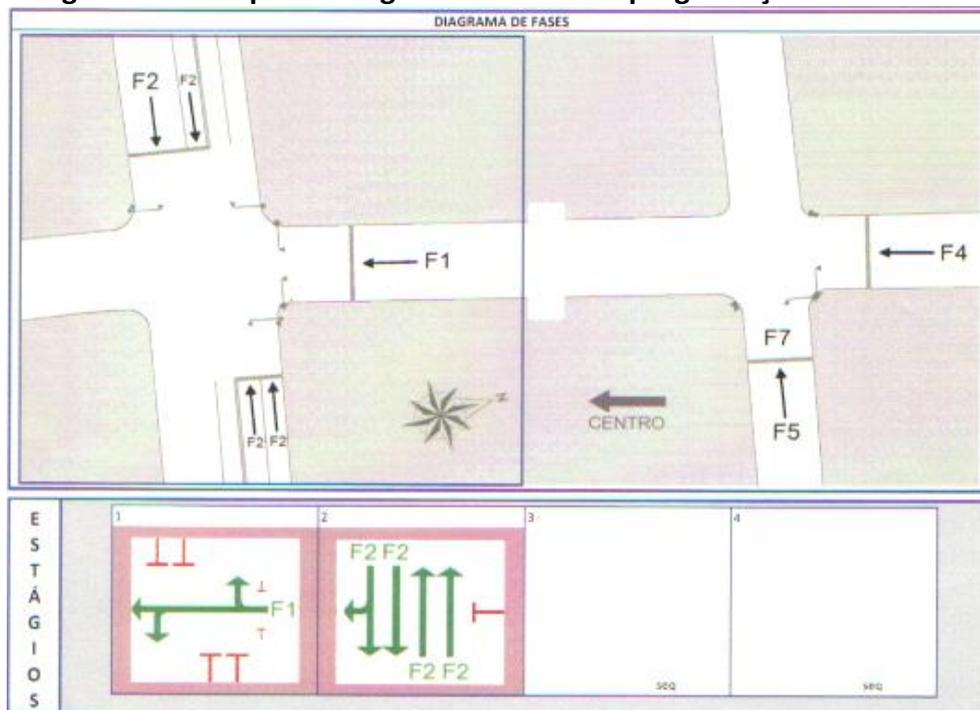
temporização dos semáforos são fictícios e de natureza didática, utilizados apenas para auxiliar na apresentação das estruturas utilizadas.

### 3.2.1 Programação semafórica

Para cada um dos cruzamentos citados anteriormente e ilustrados na Figura 8, foi fornecido um documento referente à respectiva programação semafórica. Este documento, além de outras informações complementares, apresenta os três principais blocos que foram utilizados neste trabalho: i) O diagrama de fases; ii) os planos de programação semafórica e; iii) a tabela de horários.

O diagrama de fases (Figura 9) apresenta visualmente o cruzamento de que trata o documento, inclusive com indicação geográfica de norte, para sua correta orientação. Sobre a imagem do cruzamento são exibidos os sentidos de fluxo de veículos no cruzamento, além de identificar quais dos fluxos são controlados por cada uma das fases do semáforo, aqui chamadas de estágios, na programação semafórica.

**Figura 9 – Exemplo de diagrama de fases da programação semafórica**



Fonte: Adaptado de (EPTC, 2015).

Este diagrama foi de grande importância para o completo entendimento da dinâmica de cada um dos cruzamentos. Através dele foi possível mapear os semáforos criados no simulador para que tivessem as mesmas fases e controlassem os mesmos sentidos de tráfego verificados no ambiente real. Além disso, o diagrama foi utilizado para confirmar se o sentido das vias construídas no simulador estava de acordo com o do diagrama.

O segundo bloco citado, o dos planos de programação semafórica, é o mais extenso e de maior relevância contido no documento. Para cada cruzamento são apresentados vinte e um planos de programação. Destes, dez são utilizados somente durante a semana, um durante a semana e aos finais de semana e outros dois somente aos finais de semana. Existem mais cinco que, apesar de não deixar claro, aparentam ser planos de contingência e outros três planos não estão preenchidos ou não são utilizados em momento algum.

Cada um desses planos apresenta as fases do conjunto de semáforos de um cruzamento. Cada uma dessas fases apresenta o conjunto de estados de um ou mais semáforos do cruzamento, no que diz respeito a qual cor o semáforo deve exibir e por quanto tempo. A combinação das fases e sua execução ao longo do tempo de ciclo do programa é responsável pela coordenação entre os sinais vermelho, amarelo e verde que são exibidos pelos semáforos.

**Figura 10 – Exemplo de plano de programação semafórica**

A) Plano 01					B) Plano 01						
Intervalos	1	2	3	4	Intervalos	1	2	3	4	5	6
Fase 01	V	A	R	R	Fase 01	V	A	R	R	R	R
Fase 02	R	R	V	A	Fase 02	R	R	R	V	A	R
Tempo	35	4	27	4	Tempo	35	3	1	27	3	1

Fonte: Adaptado de (EPTC, 2015).

Conforme pode ser acompanhado na Figura 10, letra A, o semáforo da Fase 01 inicia o ciclo com a luz verde acesa e permanece desta maneira por 35 segundos. Enquanto isso o semáforo da Fase 02 está com a luz vermelha acesa. A partir do segundo 36 e durante 4 segundos o semáforo da Fase 01 muda de verde para amarelo e o semáforo da Fase 02 permanece com a luz vermelha acesa. No segundo 40 o semáforo fecha para a Fase 01, abre para a Fase 02 e assim permanece durante 27 segundos. A partir do segundo 67 e durante 4 segundos, o semáforo da Fase 02 muda de verde para amarelo. Ao completar o total de 70 segundos exemplificados, o ciclo reinicia e se repete.

Como pode ser visto ainda na Figura 10, letra B, os planos fornecidos pela EPTC possuem intervalos, após o sinal amarelo de cada uma das fases, em que as duas fases ficam com o sinal vermelho. Isso ocorre para que haja um momento em que o cruzamento fique totalmente livre, antes que alguma das fases seja aberta novamente.

Como o simulador utilizado possui a característica dos carros nunca entrarem em um cruzamento quando o semáforo do seu sentido estiver no sinal amarelo, os planos fornecidos pela EPTC foram adaptados. É possível perceber que os intervalos três e seis

(Figura 10, letra B) deixaram de existir e foram incorporados, respectivamente, pelos intervalos dois e quatro (Figura 10, letra A).

Por fim, cada documento de programação semafórica possui a sua tabela de horários (Tabela 2). Esta tabela indica em quais dias da semana e em quais horários do dia cada um dos planos de programação semafórica devem ser utilizados.

Embora cada documento possua a sua tabela de horários, percebeu-se que, ao menos para os cruzamentos analisados, que todos os semáforos seguem o mesmo cronograma de dias da semana e horários do dia para a troca de planos. O plano que cada semáforo assume em um determinado dia e horário, porém, geralmente é diferente do plano que outros semáforos assumem.

**Tabela 2 – Exemplo de tabela de horários**

Plano	Tempo	Dias							Horário
Plano 01	70		S	T	Q	Q	S		04:00:00
Plano 02	90		S	T	Q	Q	S		09:30:00
Plano 03	130		S	T	Q	Q	S		12:00:00
Plano 04	100		S	T	Q	Q	S		15:00:00
Plano 05	90		S	T	Q	Q	S		17:00:00
Plano 06	70	D	S	T	Q	Q	S	S	22:00:00
Plano 07	40	D						S	09:00:00
Plano 08	70	D						S	15:00:00

**Fonte: Adaptado de (EPTC, 2015).**

Na Tabela 2, por exemplo, pode-se verificar que o Plano 01 possui duração de setenta segundos e é utilizado de segunda à sexta-feira, sempre às quatro horas da manhã. Já o Plano 07 possui duração de quarenta segundos e é utilizado somente aos finais de semana, às nove horas da manhã. Por fim, o Plano 06 possui duração de setenta segundos e é utilizado durante todos os dias da semana, sempre às vinte e duas horas.

### 3.2.2 Volume de tráfego

A EPTC também forneceu seis planilhas eletrônicas, intituladas "Tabulação e análise de contagem de veículos", contendo dados a respeito do volume de tráfego em cada um dos cruzamentos apresentados na Figura 8. Cada uma das seis planilhas contém dados referentes a uma única contagem de veículos realizada para cada um dos cruzamentos.

Cada planilha apresenta, inicialmente, a tabulação da contagem de veículos do cruzamento a que se refere, subdividida conforme o exemplo apresentado na Tabela 3: Os

dados foram registrados em intervalos de quinze minutos, para cada um dos fluxos do diagrama de fases (Figura 9) e ainda, para cada fase, subdivididos por tipo de veículo. A contagem de veículos foi realizada *in loco* ou através da análise de imagens de câmeras, feita por agentes da EPTC.

**Tabela 3 – Exemplo de tabulação de contagem de veículos**

Intervalos	Fluxo 1				Fluxo 2				Fluxo 3				Fluxo 4			
	VL	VM	VP	MT												
00:00 – 00:15	15	0	5	0	15	1	5	2	13	4	6	0	3	0	2	3
00:15 – 00:30	3	3	2	4	14	3	1	3	12	4	3	1	13	4	1	3
00:30 – 00:45	11	1	2	6	1	4	4	6	15	5	5	3	9	1	1	4
00:45 – 01:00	3	2	0	6	14	0	6	5	1	5	4	4	6	3	2	3
01:00 – 01:15	6	2	6	2	15	0	3	4	13	3	3	6	4	4	2	4
01:15 – 01:30	8	4	3	3	10	4	0	0	4	1	6	4	12	3	7	3
01:30 – 01:45	3	3	3	3	7	5	1	0	2	0	3	1	3	3	0	2
01:45 – 02:00	8	1	4	2	15	5	4	4	9	1	7	0	15	3	4	3

Fonte: Adaptado de (EPTC, 2015).

Além das motocicletas (MT), os veículos são classificados como veículos leves (VL): automóveis, utilitários e camionetas; veículos médios (VM): caminhonetes, vans e micro-ônibus; e como veículos pesados (VP): ônibus, caminhão, caminhão-trator, reboque e semirreboque.

Cada planilha eletrônica possui, ainda, alguns agrupamentos da contagem de veículos em horas e turnos e algumas análises a respeito da densidade de cada fluxo, predominância de fluxo e considerações a respeito de planos de programação semafórica. Estes dados, porém, não foram utilizados neste trabalho.

### 3.3 Definição do ambiente de simulação

Principalmente durante a etapa de estudo de trabalhos relacionados ao controle de tráfego, diversos sistemas de simulação de tráfego foram analisados. Dentre todos os sistemas com que se teve contato, os que despertaram maior interesse inicial foram: Aimsun (AIMSUN, 2015), CityTrafficSimulator (CITYTRAFFICSIMULATOR, 2015), MATSim (MATSIM, 2012), SIDRA INTERSECTION 6 (SIDRA SOLUTIONS, 2015), QuadstoneParamics (QUADSTONE PARAMICS, 2015) e SUMO (SUMO, 2015).

Em um segundo momento, ao realizar uma análise mais profunda dos sistemas citados anteriormente, a lista se reduziu aos sistemas MATSim e SUMO. Os demais sistemas foram

descartados por um ou mais dos seguintes motivos: i) disponibilizar apenas uma versão de demonstração de forma gratuita, geralmente limitada a trinta dias de uso; ii) não apresentar documentação clara e objetiva sobre o sistema para usuários e desenvolvedores; e iii) não possuir informação evidente de que o sistema continue sendo atualizado e desenvolvido.

Apesar de terem foco um pouco diferente, tanto MATSim quanto SUMO teriam sido uma boa escolha. Ambos são projetos de código fonte aberto e disponível, possuem documentação abrangente, inclusive com tutoriais que ensinam a utilizá-los e continuam em desenvolvimento. Não há dúvida de que qualquer um dos dois sistemas possibilitaria o desenvolvimento deste trabalho, porém, cada um explorando melhor suas particularidades.

O MATSim por ser, de fato, um sistema para simulação de tráfego multiagentes, permitiria explorar melhor o desenvolvimento dos agentes no sistema, disponibilizada completa estrutura para isso. Já o SUMO, apesar de não ser um sistema multiagentes, é o que apresenta melhor documentação, tanto para usuários quanto para desenvolvedores, além de maior número de ferramentas e de maneiras de organizar as simulações. Uma ferramenta que se destaca é o NetConvert, que possibilita a importação de mapas de tráfego para a estrutura do sistema, dispensando a necessidade de construí-los manualmente.

Diante de tamanha igualdade, o critério que decidiu qual dos sistemas seria utilizado foi o de produtividade. Enquanto no SUMO seria necessário construir a estrutura de agentes, no MATSim seria necessário construir todo o mapa por onde os veículos trafegariam durante a simulação. Optou-se, então, por utilizar o SUMO, julgando que o estudo necessário para realizar o mapeamento das vias e sua construção no MATSim seriam muito mais onerosos, possibilitando, inclusive, a falta de tempo hábil para o alcance dos objetivos deste trabalho.

### **3.3.1 SUMO – *Simulation of Urban MObility***

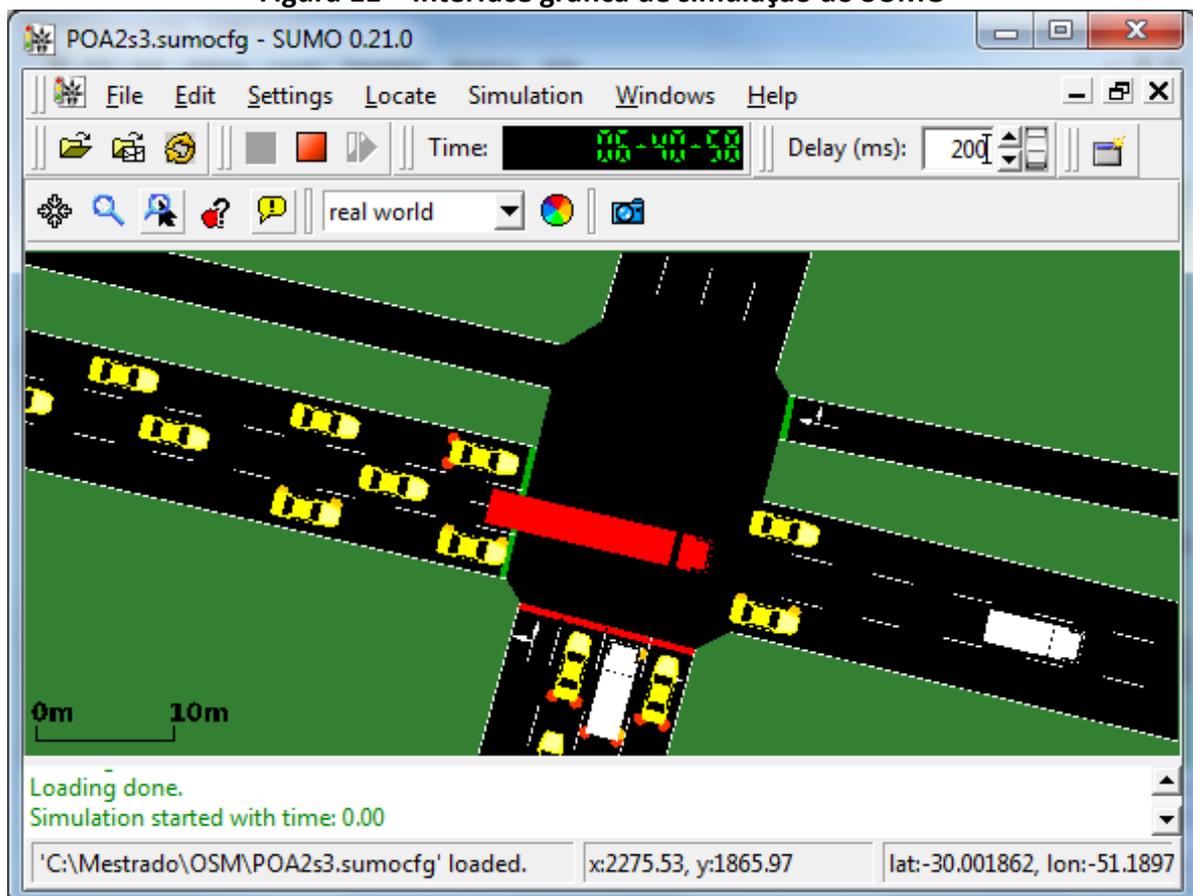
SUMO é um sistema de simulação de tráfego rodoviário de código aberto, licenciado sob a licença GPL (GNU, 2007) e mantido, principalmente, por funcionários do Instituto de Sistemas de Transporte do Centro Aeroespacial Alemão. A publicação mais recente a respeito do que está sendo desenvolvido e de como o SUMO tem sido utilizado pode ser encontrada em (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2012).

Dentre as principais características do sistema podem ser destacadas a capacidade de representar as características de diversos tipos de veículos (leves, médios, pesados, motocicletas, entre outros), a capacidade de representar semáforos simples ou com programação semaforica, a capacidade de importar mapas de diversas fontes externas, além de permitir a representação tanto de veículos de passeio como de transporte público e de pedestres.

Além da ferramenta de simulação, SUMO possui um conjunto de componentes que facilitam muito o trabalho, desde a criação dos mapas até a simulação em si. Dentre elas, destacam-se:

- NETCONVERT: Ferramenta de conversão de mapas. Basta ter um mapa de algum dos formatos compatíveis que a ferramenta o converte para um mapa do sistema.
- DUAROUTER: Gerador de rotas para os veículos. Utilizando esta ferramenta o usuário não precisa explicitar a rota de cada veículo, a ferramenta faz esta tarefa utilizando alguns algoritmos de roteamento disponíveis.
- SUMOGUI: Interface gráfica para as simulações (Figura 11). Exibe todos os elementos do ambiente (ruas, carros, semáforos, entre outros) além de fornecer informações sobre estes elementos, facilitando sua identificação.
- SUMO: Ferramenta de simulação por linha de comando. Dispensando a interface gráfica, é possível realizar simulações em menos tempo.

**Figura 11 – Interface gráfica de simulação do SUMO**



Fonte: Autor.

SUMO tem sido utilizado e desenvolvido de diversas maneiras e com diferentes propósitos. Existem projetos que exploram sua parte de análise de emissão de poluentes. Outros projetos avaliam e tentam melhorar o desempenho de semáforos. Em casos práticos,

o sistema foi utilizado para avaliar o tráfego na Alemanha, durante a visita do papa, em 2005, e durante a copa do mundo de futebol, em 2006.

### 3.4 Simulação de tráfego urbano

No SUMO, o processo de simulação do tráfego é dividido em três partes: i) a construção da malha de tráfego, em que são construídas as ruas, os semáforos e as restrições como os sentidos das vias, as conversões permitidas e proibidas e os limites de velocidade; ii) a modelagem do tráfego, em que é definido o volume e o tipo de tráfego em cada sentido e para cada momento da simulação e; iii) a simulação em si, em que juntam-se as partes anteriores para colocar o tráfego nas ruas e, por fim, coletar as informações a respeito do tráfego de veículos.

#### 3.4.1 Construção da malha de tráfego

A malha de tráfego é representada por arquivos XML no SUMO. Tradicionalmente, estes arquivos possuem a extensão ".net.xml". Neste trabalho, o arquivo de malha de tráfego utilizado nos testes finais foi chamado POA2s3.net.xml. Durante a descrição do trabalho este arquivo será citado mais vezes.

A maior parte do conteúdo armazenado nestes arquivos representa uma estrutura em forma de grafo, com vértices (*nodes*), arestas (*edges*) e outras subdivisões (*lanes*), que representam as ruas e as pistas. Os vértices, porém, não ligam uma aresta diretamente a outra. Existem as junções (*junctions*) que guardam informações sobre as arestas que chegam a um cruzamento e as vias internas deste cruzamento; e as conexões (*connections*), utilizadas para conectar o final de uma aresta ao começo de outra, através das junções. O conjunto de junções e conexões forma os cruzamentos.

Outra estrutura existente neste arquivo é a chamada lógica dos semáforos. Esta estrutura define em qual junção haverá um semáforo, além de quantas fases, quantos intervalos e de quanto tempo será cada intervalo no ciclo do semáforo.

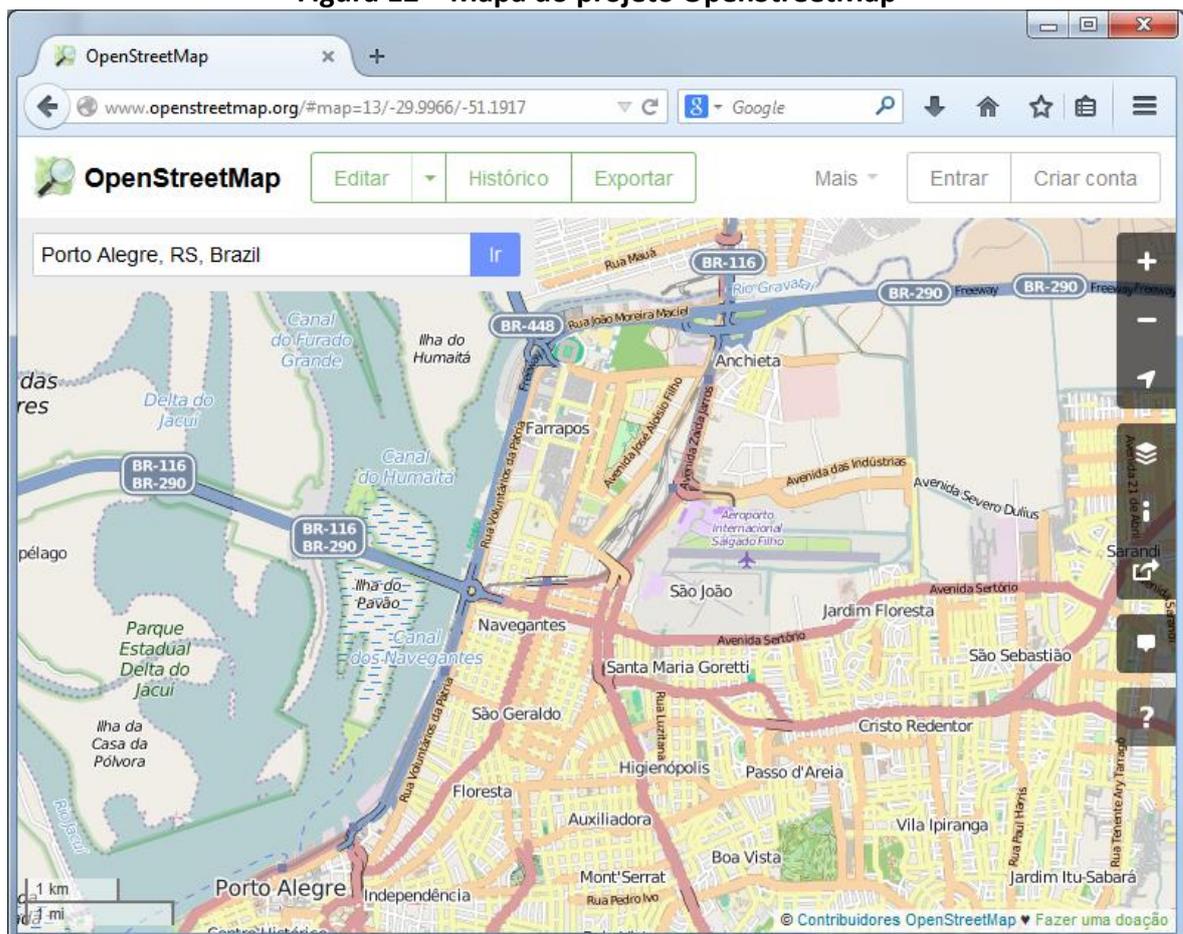
Cada uma das estruturas citadas possui vários atributos. Os que foram utilizados neste trabalho serão apresentados ao longo do texto. Para uma visão completa a respeito das estruturas e das propriedades, consulte a seção *Networks/SUMO Road Networks* do manual de usuário do SUMO.

### 3.4.1.1 OpenStreetMap

O projeto OpenStreetMap (OPENSTREETMAP, 2015) consiste em um mapa editável do mundo todo, disponível de forma gratuita para quem quiser utilizá-lo e compartilhá-lo. Embora seja coordenado pela OpenStreetMap Foundation, uma organização não governamental e sem fins lucrativos do Reino Unido, o projeto recebe a colaboração de mais de meio milhão de voluntários ao redor do mundo, que trabalham para manter e desenvolver o projeto.

Como pode ser visto na Figura 12, o projeto apresenta visualmente um mapa do mundo inteiro. O mapa contém, principalmente, a malha viária existente, com diversos detalhes a respeito das vias, sinalização, limites de velocidade, entre outros. O detalhamento e a precisão das informações são tamanhos, que o mapa do OpenStreetMap é utilizado, inclusive, por aplicativos navegadores GPS.

**Figura 12 – Mapa do projeto OpenStreetMap**



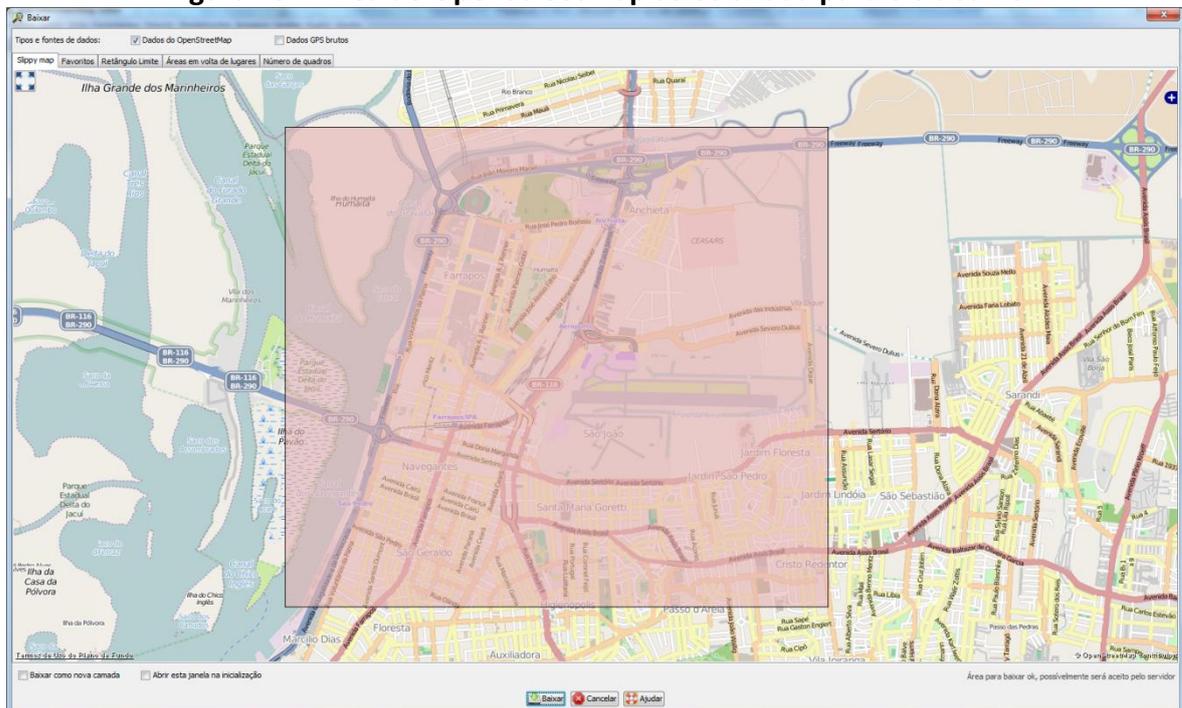
Fonte: (OPENSTREETMAP, 2015).

Áreas do mapa, conforme desejo do usuário, podem ser baixadas em arquivos no formato OSM XML. O formato consiste na arquitetura OSM representada em XML, descrevendo nós (*nodes*), arestas (*ways*) e restrições (*restrictions*). Não é objetivo deste

trabalho detalhar o formato OSM XML, mas mais detalhes podem ser encontrados na respectiva página do projeto OpenStreetMap.

Neste trabalho, foi utilizada uma área do mapa do OpenStreetMap (Figura 13) como base para a construção do arquivo de malha viária no SUMO. Através da ferramenta JOSM (*Java OpenStreetMap Editor*) (OPENSTREETMAP, 2015), a área desejada foi selecionada e o comando "Baixar" foi acionado para salvar um arquivo no formato OSM XML. Neste trabalho, o arquivo contendo a área apresentada na Figura 13 foi salvo com o nome POA2s3.osm.

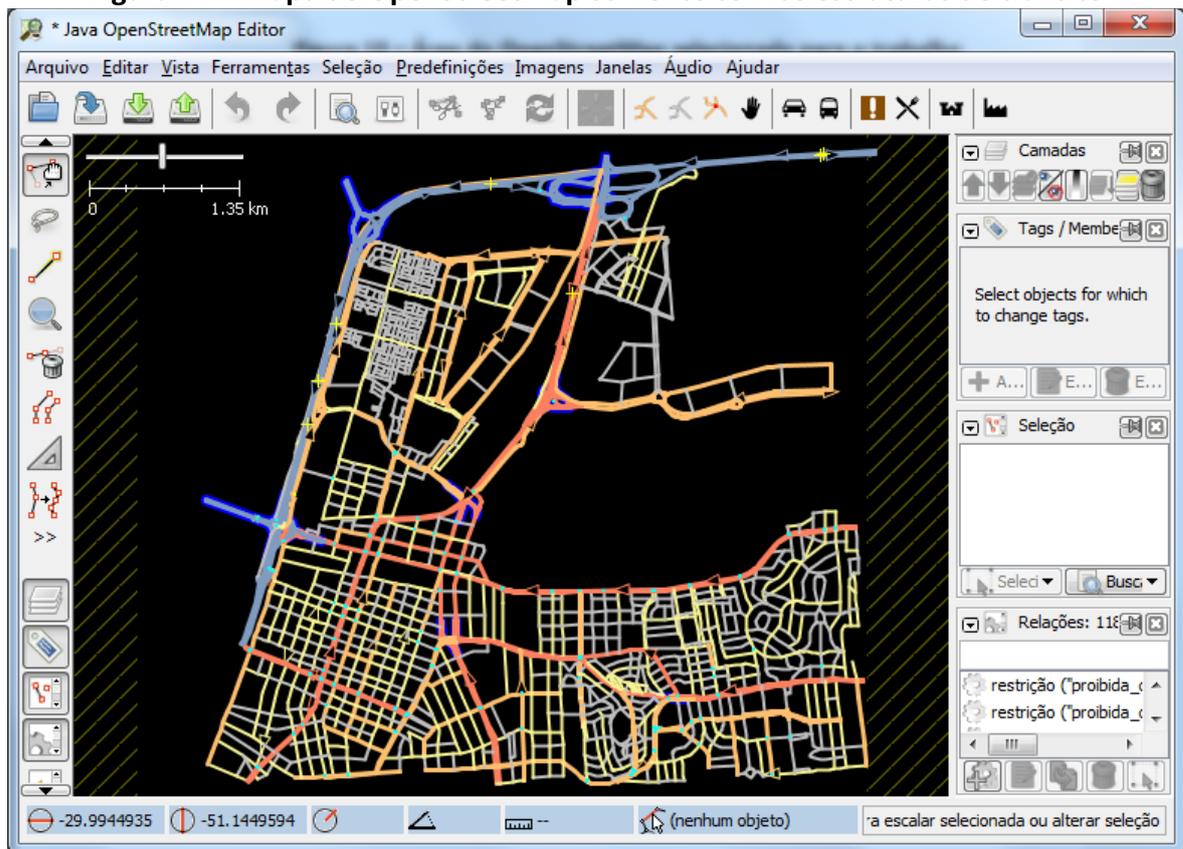
**Figura 13 – Área do OpenStreetMap selecionada para o trabalho**



**Fonte: Autor.**

Em seguida, ao abrir o arquivo baixado para edição com a ferramenta JOSM, foram exibidas diversas estruturas que não fazem parte da malha viária de trânsito, como construções, rios, vegetação, entre outros. Todas estas estruturas foram removidas, manualmente, do mapa, deixando-o conforme mostra a Figura 14, somente com as estruturas de trânsito necessárias para a simulação.

**Figura 14 – Mapa do OpenStreetMap somente com as estruturas de trânsito**



Fonte: Autor.

### 3.4.1.2 SUMO – NetConvert

NetConvert é uma ferramenta distribuída junto com o SUMO. Sua função é converter arquivos de mapas de fontes diversas em arquivos de malha viária para o SUMO. Neste trabalho, o arquivo POA2s3.osm, gerado a partir do OpenStreetMap foi submetido à ferramenta e deu origem ao arquivo POA2s3.net.xml, o arquivo que foi utilizado como malha viária nas simulações realizadas no SUMO.

A ferramenta NetConvert possui uma série de opções que podem ser utilizadas ou ativadas. A Tabela 4 exibe as opções que foram utilizadas neste trabalho, para realizar a conversão do arquivo POA2s3.osm em POA2s3.net.xml. A lista completa de opções da ferramenta pode ser encontrada na seção *NetConvert* do manual de usuário do SUMO.

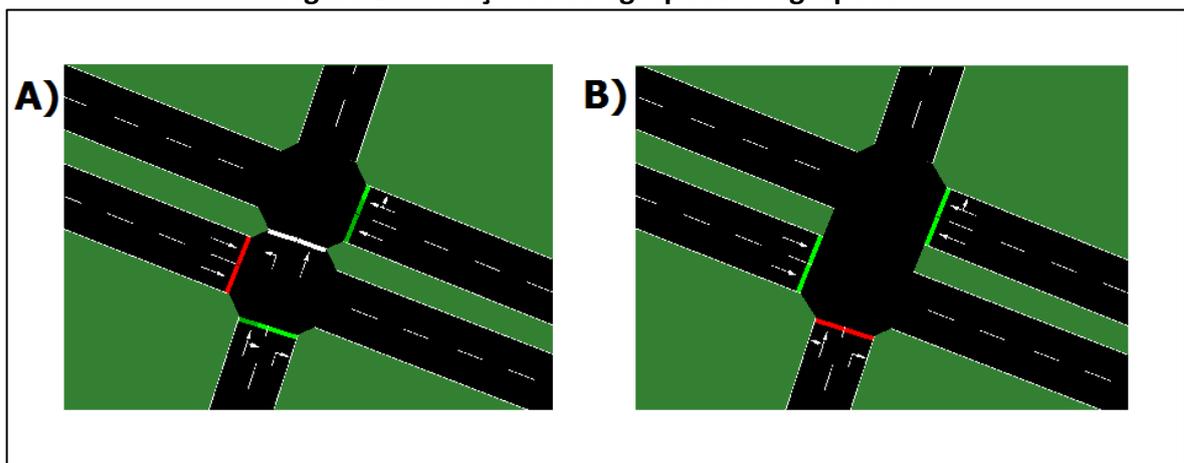
**Tabela 4 – Lista de opções utilizadas em NetConvert**

Opção	Descrição	Valor utilizado
--osm-files	Informa que um arquivo do tipo OSM XML será informado como entrada	POA2s3.osm
--output-file	O arquivo gerado será salvo com o nome informado	POA2s3.net.xml
--no-turnarounds	Desabilita a criação de retornos	
--tls.join	Agrupa nós próximos, controlados por semáforos, em um mesmo semáforo	
--junctions.join	Agrupa junções próximas	
--junctions.join-exclude	Não agrupa as junções informadas	1404633782, 1404633790, 661069278, 661069327
--tls.guess-signals	Controla semáforos próximos em um mesmo plano de controle	
--osm.elevation	Importa dados de elevação de vias	

**Fonte: Autor, com base no manual de usuário do (SUMO, 2015).**

As opções "--osm-files" e "--output-file" são básicas e informam, respectivamente, o arquivo de origem e o de destino para a conversão. A opção "--no-turnarounds" foi necessária, pois, por padrão, NetConvert cria retornos em todos os cruzamentos de ruas que possuem pistas separadas por canteiros e isso não reproduzia a realidade.

As opções "--tls.join" e "--junctions.join" foram utilizadas, pois, em vias separadas por canteiros, normalmente são construídos dois cruzamentos durante a conversão (Figura 15, letra A), um para cada um dos sentidos da via. Utilizando estas opções, estes dois cruzamentos são agrupados em um único cruzamento (Figura 15, letra B).

**Figura 15 – Junções não agrupadas e agrupadas**

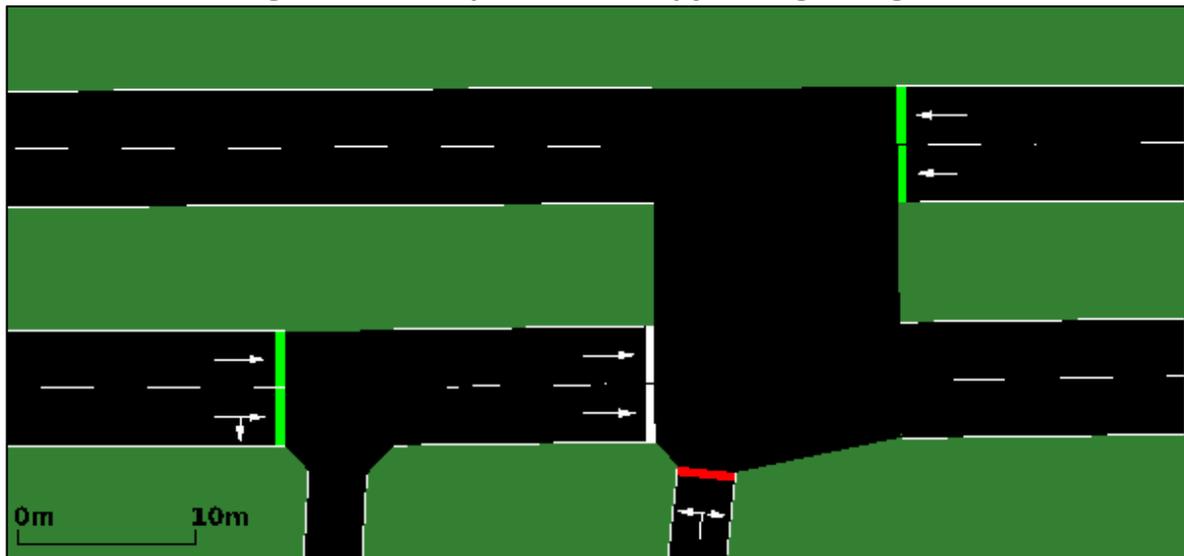
**Fonte: Autor.**

A opção "--junctions.join-exclude" foi necessária para evitar que este agrupamento fosse realizado no cruzamento das avenidas Benjamin Constant com São Pedro. As duas

avenidas possuem pistas duplas e fazendo o agrupamento, não era possível restringir as conversões à esquerda, proibidas nos quatro sentidos das duas avenidas.

A opção "--tls.guess-signals" faz com que semáforos próximos sejam controlados por um mesmo plano de controle. Esta opção é útil para casos em que um semáforo deve controlar vias que, não necessariamente formam um cruzamento. A Figura 16 exibe o exemplo do cruzamento das avenidas Sertório e Rio São Gonçalo.

**Figura 16 – Exemplo de uso da opção *TLS guesssignal***



Fonte: Autor.

Por fim, a opção "--osm.elevation" faz com que dados a respeito da elevação das vias sejam considerados durante a conversão. Esta opção é de grande importância devido à presença de viadutos e elevados. Caso a opção não seja utilizada, todas as vias são importadas em um mesmo plano vertical, gerando cruzamentos que, na realidade, não existem.

### 3.4.1.3 Programação dos semáforos

Ao converter um arquivo OSM em net.xml, todos os semáforos existentes no arquivo OSM foram mantidos no net.xml. A Figura 17 mostra um exemplo de representação de semáforo no arquivo POA2s3.net.xml. Comparando esta figura com a Figura 10, letra A, é possível identificar como as fases e os intervalos citados na seção 3.2.1 deste capítulo, sobre programação semaforica, foram representados na estrutura do SUMO.

**Figura 17 – Exemplo de semáforo representado no arquivo net.xml**

```

<tlLogic id="cluster_2871615629_661069299" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="31" state="GGGGrrrr"/> Intervalo 1
  <phase duration="7" state="yyyyrrrr"/> Intervalo 2
  <phase duration="31" state="rrrrGGGG"/> Intervalo 3
  <phase duration="7" state="rrrryyyy"/> Intervalo 4
</tlLogic>

```



Fonte: Autor.

Pode-se notar, ainda na Figura 17, que o que é chamado de "Intervalo" pela EPTC, é chamado de "Fase" (*phase*) no SUMO. Já o que é chamado de "Fase" pela EPTC é chamado de "Estado" (*state*) no SUMO. Já os termos "Tempo" e "Duração" (*duration*) possuem sentidos mais próximos tanto para EPTC quanto para o SUMO.

Um semáforo representado de acordo com a Figura 17, porém, se comportaria da mesma maneira durante todo o período de uma simulação. Como citado na seção 3.2.1 deste capítulo, sobre programação semafórica, a EPTC utiliza diversos planos de programação para cada semáforo. Para representar estes planos de programação, foi necessário criar um arquivo adicional, intitulado POA2s3.add.tls.xml, contendo os planos de programação de cada semáforo, fornecidos pela EPTC.

Para representar os planos de programação semafórica no arquivo POA2s3.add.tls.xml, foi utilizada uma estrutura chamada WAUT (SUMO, 2015), abreviação de "*Wochenschaltautomatik*", ou "comutação automática semanal", em livre tradução do idioma alemão. Apenas os atributos utilizados neste trabalho serão apresentados ao longo do texto. Para uma visão completa a respeito da estrutura e de suas propriedades, consulte a seção *Simulation/Traffic Lights* do manual de usuário do SUMO.

A estrutura WAUT é composta de duas partes: Primeiro são declarados os programas semafóricos desejados (Figura 18), da mesma maneira apresentada na Figura 17, porém agora com as devidas identificações (*programID*), que serão utilizadas na segunda parte da estrutura.

**Figura 18 – Programações semafórica para a estrutura WAUT**

```

<tlLogic id="428667940" type="static" programID="DonaMargaridaCeara01" offset="0">
  <phase duration="31" state="gggggrr"/>
  <phase duration="4" state="yyyyyrr"/>
  <phase duration="31" state="rrrrrfg"/>
  <phase duration="4" state="rrrrryy"/>
</tlLogic>

<tlLogic id="428667940" type="static" programID="DonaMargaridaCeara02" offset="0">
  <phase duration="55" state="gggggrr"/>
  <phase duration="4" state="yyyyyrr"/>
  <phase duration="37" state="rrrrrfg"/>
  <phase duration="4" state="rrrrryy"/>
</tlLogic>

<tlLogic id="428667940" type="static" programID="DonaMargaridaCeara03" offset="0">
  <phase duration="73" state="gggggrr"/>
  <phase duration="4" state="yyyyyrr"/>
  <phase duration="49" state="rrrrrfg"/>
  <phase duration="4" state="rrrrryy"/>
</tlLogic>

```

Fonte: Autor.

Depois, na estrutura WAUT (Figura 19) é indicado em qual programa o ciclo deve começar a ser executado (*startProg*) e em quais horários (*time*) cada programa (*to*) deve ser acionado. Sempre que a hora de um programa é atingida, ele é acionado e passa a ser executado, substituindo o programa anterior. Os horários são representados em segundos. Na Figura 19 apresentada a seguir, 14.400 segundos representam 4 horas, por exemplo.

**Figura 19 – Plano de troca de programas na estrutura WAUT**

```

<WAUT id="DonaMargaridaCeara" refTime="0" startProg="DonaMargaridaCeara08">
  <wautSwitch to="DonaMargaridaCeara01" time="14400"></wautSwitch>
  <wautSwitch to="DonaMargaridaCeara02" time="34200"></wautSwitch>
  <wautSwitch to="DonaMargaridaCeara03" time="43200"></wautSwitch>
  ⋮
</WAUT>

```

Fonte: Autor.

### 3.4.2 Modelagem do tráfego

Para modelar o tráfego, com o objetivo de reproduzi-lo da maneira mais fiel possível ao original, diversos passos foram realizados. Primeiro, os dados referentes à contagem de veículos de todas as planilhas citadas na seção 3.2.2, deste capítulo, a respeito do volume de tráfego, foram agrupados em uma única planilha, chamada de "Dados sintéticos". Nesta planilha constam as contagens de veículos de todos os fluxos, de todas as planilhas fornecidas pela EPTC, em intervalos de quinze minutos.

Foi então necessário realizar uma adequação na planilha "Dados sintéticos", visto que, conforme apresenta a Figura 8, alguns cruzamentos possuem contagem veicular de 12 horas, enquanto outros possuem de 24 horas. Nos cruzamentos com contagem de 12 horas, a contagem foi realizada das 7 horas até às 19 horas, inclusive.

A adequação foi realizada apenas nos cruzamentos que possuíam contagem de 12 horas e da seguinte maneira: Para cada cruzamento com contagem de 12 horas, foi escolhido um cruzamento adjacente, com contagem de 24 horas. O cruzamento Dona Margarida com Edu Chaves (24 horas) foi utilizado tanto para Ceará com Dona Margarida quanto para Sertório com Dona Sebastiana. Já o cruzamento Sertório com Ceará (24 horas) foi utilizado para Ceará com Dr. João Inácio. A Tabela 5 apresenta os dados utilizados para calcular os valores faltantes.

**Tabela 5 – Adequação realizada nos cruzamentos com contagem de 12 horas**

Intervalos	Fluxo 1				Fluxo 2				Fluxo 3				Fluxo 4			
	VL	VM	VP	MT	VL	VM	VP	MT	VL	VM	VP	MT	VL	VM	VP	MT
00:00 – 00:15					15	1	5	2					3	1	2	3
...					14	3	1	3					13	4	1	3
06:45 – 07:00	<b>A</b>	<b>E</b>			<b>B</b>	2	4	6		<b>A</b>			9	<b>B</b>	1	4
07:00 – 07:15	<b>D</b>	2	3	4	<b>C</b>	4	6	5	12	<b>D</b>	3	1	6	<b>C</b>	2	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19:45 – 20:00	6	2	<b>D</b>	6	1	4	<b>C</b>	1	1	6	4	<b>D</b>	12	1	7	<b>C</b>
20:00 – 20:15			<b>A</b>		2	5	<b>B</b>	2				<b>A</b>	3	4	2	<b>B</b>
...					15	5	4	4					15	3	4	3
23:45 – 00:00					1	4	4	6					3	2	2	3

Fonte: Autor, com base nos dados de (EPTC, 2015).

A fórmula utilizada para realizar o cálculo dos novos valores foi:  $A = (B/C) * D$ . Sendo que B, C e D eram valores conhecidos. Este cálculo foi repetido para todos os tipos de veículos, para cada faixa de 15 minutos. Primeiro das 7 horas à meia-noite, inclusive e de maneira decrescente e depois das 20 horas à meia-noite, exclusive e de maneira crescente.

Foram utilizados cruzamentos adjacentes, pois no cenário proposto, foram os que apresentaram tráfego mais parecido com o cruzamento que precisa ser calculado. Desta forma, procurou-se manter a razão de aumento ou diminuição no volume de veículos, utilizando a razão entre uma faixa e outra do cruzamento com dados de 24 horas ( $B/C$ ) e multiplicando este valor pela faixa existente no cruzamento com dados de 12 horas (D).

Para calcular o valor de E, por exemplo, no Fluxo 1, considera-se a seguinte relação: Sendo que E está uma posição à direita de A, considera-se os valores de B, C e D também

como sendo 1 posição à direita destas letras. Desta forma, tem-se que  $E = (B/C) * D$  é igual a  $E = (2/4) * 2$ . Assim, o valor de E, neste caso, seria 1.

Como descrito, optou-se por completar os cruzamentos que possuíam dados de apenas 12 horas, de modo que passassem a ter dados de 24 horas. Outra opção seria trabalhar apenas com os dados de 12 horas para todos os cruzamentos. A primeira opção foi adotada, pois na segunda opção a simulação deveria começar às 7 horas da manhã, horário em que já existe um fluxo de veículos bastante elevado.

Caso os veículos começassem a circular às 7 horas, toda a região central do mapa estaria vazia neste momento, facilitando o tráfego e tornando-o mais distante da realidade. Já na simulação com 24 de tráfego, este problema foi minimizado, pois até às 7 horas a região central do mapa já apresentava a circulação de veículos adequada para o horário.

Com a planilha totalmente preenchida, o passo seguinte foi totalizar cada um dos intervalos de 15 minutos. Eles foram totalizados de maneira geral (independente do tipo de veículo) e também por tipo de veículo. Por fim, cada coluna também foi totalizada, por tipo de veículo e de maneira geral (total de cada fluxo). As colunas, porém, foram totalizadas em blocos de 6 em 6 horas: da meia-noite às 6 horas exclusive; das 6 horas às 12 horas; das 12 horas às 18 horas e das 18 horas à meia-noite. Este agrupamento foi realizado, já que o volume de tráfego e a sua composição, de acordo com os tipos de veículos, variam de maneira relevante durante os 4 turnos do dia.

Em seguida, foi calculado o percentual que cada intervalo de 15 minutos representa em relação ao total do bloco (turno) que pertence. O total geral de veículos entre 00:00 e 00:15, por exemplo, foi dividido pelo total geral da madrugada (00:00 a 06:00). O mesmo ocorreu com o total geral de veículos entre 00:15 e 00:30. O objetivo é estabelecer a proporção de veículos por faixa de 15 minutos, dentro de cada turno.

Procedimento semelhante foi realizado com o total por tipo de veículo por turno. O total de veículos leves (VL) da manhã, por exemplo, foi dividido pelo total de veículos da manhã. O mesmo procedimento foi realizado para todos os tipos de veículos e para todos os turnos. O objetivo é estabelecer a proporção de cada tipo de veículo em cada turno.

### **3.4.2.1 Distribuição dos tipos de veículos**

A distribuição dos tipos de veículos foi, então, mapeada no arquivo "POA2s3.add.vty.xml". Este arquivo contém uma estrutura chamada de "Distribuição de tipos". Nesta estrutura podem ser definidos diversos tipos de distribuição e, para cada um dos tipos de distribuição, diversos tipos de veículos. A seguir serão apresentadas as opções que foram utilizadas neste trabalho para a representação dos tipos de veículos. Para uma

visão completa a respeito do assunto, consulte a seção *Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes* do manual de usuário do SUMO.

Inicialmente foi preciso definir quais seriam os tipos de veículos utilizados. As estruturas de tipos de veículos contêm informações como: identificação, aceleração, desaceleração, tamanho, velocidade máxima, distância do veículo à frente, entre outras. Desta forma, é possível diferenciar o comportamento de um veículo leve do comportamento de um veículo pesado, por exemplo.

SUMO possui classes de veículos chamadas de "abstratas". São classes predefinidas dos principais tipos de veículos existentes. Neste trabalho foram utilizadas quatro classes abstratas: *Passenger*, para veículos leves (VL); *Truck*, para veículos médios (VM); *Trailer*, para veículos pesados (VP); e *Motorcycle*, para motocicletas (MT). A utilização destas classes abstratas dispensou a necessidade de pesquisa a respeito do comportamento destes tipos de veículos, pois SUMO já os define.

A Figura 20 apresenta a distribuição de tipos de veículos realizada para o turno da manhã. Foram realizadas quatro distribuições de tipos de veículos distintas, sendo uma para cada turno, devido à diferença da composição do tráfego em cada um dos períodos. As distribuições foram chamadas de `typedist_00_06`, `typedist_06_12`, `typedist_12_18` e `typedist_18_24`.

**Figura 20 – Exemplo de estrutura de distribuição de tipos de veículos**

```
<vTypeDistribution id="typedist_06_12">
  <vType id="VL_06_12" vClass="passenger" probability="0.7776"/>
  <vType id="VM_06_12" vClass="truck" color="1,1,1" probability="0.0663"/>
  <vType id="VP_06_12" vClass="trailer" color="1,0,0" probability="0.0685"/>
  <vType id="MT_06_12" vClass="motorcycle" color="0,1,0" probability="0.0876"/>
</vTypeDistribution>
```

Fonte: Autor.

Ainda no exemplo apresentado na Figura 20, pode-se notar que cada um dos tipos de veículos possui uma probabilidade (*probability*). Esta probabilidade foi calculada conforme descrito na seção 3.4.2, deste capítulo, no trecho que trata da proporção de cada tipo de veículo em cada turno. Os valores apresentados são utilizados sempre que um veículo do tipo "typedist\_06\_12" deve ser criado, para definir a probabilidade de cada tipo de veículo ser o selecionado.

### 3.4.2.2 Matrizes de origem e destino

Uma das opções para modelar o tráfego no SUMO é utilizar as matrizes de origem e destino (SUMO, 2015). Estas matrizes são compostas por duas estruturas: Um mapa de zonas de atribuição de tráfego (*traffic assignment zones* – TAZ) que indica as possíveis

origens e destinos; e uma matriz, contendo a quantidade de veículos que deve trafegar de uma origem para um destino.

Para criar a estrutura TAZ deste trabalho, o mapa utilizado foi dividido em dez setores (Figura 21). Estes setores representam as principais vias de acesso aos cruzamentos analisados. Para cada um dos setores foram definidos, arbitrariamente, pontos de partida e de chegada. Como a maioria dos setores contém vias principais, iniciando ou terminando, foi dada prioridade para estas vias. O objetivo é representar o tráfego que chega ao centro do mapa, tendo partido de outras regiões e trafegando pelas vias principais.

**Figura 21 – Setores utilizados para a estrutura TAZ**



Fonte: Autor.

A Figura 22 apresenta uma parte da estrutura TAZ utilizada neste trabalho. Na figura podem ser vistos os setores 8, 9 e 10 (*id*). Dentro de cada um dos setores, constam as origens (*tazSource*) e os destinos (*tazSink*). É possível perceber, ainda, que cada origem e cada destino possuem um peso (*weight*). O arquivo com a estrutura TAZ utilizada neste trabalho foi chamado de "POA2s3.taz.xml".

No setor 9, por exemplo, é possível perceber que 60% dos veículos que partem deste setor, partirão da via identificada por "28006699", enquanto 40% partirão de "244178081#0". Já em relação aos veículos com destino ao setor 9, metade chegarão à via "98401046" e metade à via "126798185#3".

**Figura 22 – Exemplo de estrutura TAZ**

```
<tazs>
  ⋮
  <taz id="8">
    <tazSource id="131235008#0" weight="5"/>
    <tazSource id="206703899#0" weight="5"/>
    <tazSink id="131452739#1" weight="5"/>
    <tazSink id="244909118#3" weight="5"/>
  </taz>
  <taz id="9">
    <tazSource id="28006699" weight="6"/>
    <tazSource id="244178081#0" weight="4"/>
    <tazSink id="98401046" weight="5"/>
    <tazSink id="126798185#3" weight="5"/>
  </taz>
  <taz id="10">
    <tazSource id="81604395#0" weight="8"/>
    <tazSource id="-28212358#1" weight="2"/>
    <tazSink id="132365351#6" weight="8"/>
    <tazSink id="28212358#1" weight="2"/>
  </taz>
</tazs>
```

Fonte: Autor.

Depois de realizar o mapeamento dos setores, foram construídas as matrizes de origem e destino. Como o próprio nome já diz, o principal elemento desta estrutura é uma matriz, porém existem outros elementos que fazem parte dela. A Figura 23 apresenta o conteúdo do arquivo "MV\_0\_6.txt", um exemplo de estrutura utilizada neste trabalho.

Como pode ser visto na Figura 23, a primeira linha do arquivo apresenta o tipo de matriz que está sendo utilizada. O SUMO possibilita a utilização de três formatos de matriz: o "V", o "O" e o "Amitran". A principal diferença entre eles é que o formato "O" não permite a definição de classes de veículos, enquanto os outros dois permitem. O formato "V" foi escolhido, frente ao "Amitran" por ser considerado mais simples pelo autor. Maiores detalhes a respeito dos formatos e de matrizes de origem e destino podem ser encontradas na seção *Demand/Importing O/D Matrices* do manual de usuário do SUMO.

**Figura 23 – Exemplo de estrutura de matriz de origem e destino**

```

$VMR
* vehicle type
typedist_00_06
* From-Time To-Time
00.00 06.00
* Factor
1.00
* District number
10
* names:
1  2  3  4  5  6  7  8  9  10
0  0  0  0  0  0  22 0  0  0
0  0  0  0  0  0  22 0  250 22
0  0  0  0  0  0  56 0  0  56
0  0  0  0  0  0  33 0  0  33
0  0  0  0  0  0  11 0  250 11
0  0  0  0  0  0  33 0  0  33
81 81 81 81 81 81 0 0 0 0
0  0  0  0  0  0  0 0 0 0
173 173 173 0 173 0 0 0 0 0
6  6  6  6  6  0  0 0 0 0

```

Fonte: Autor.

Os asteriscos (\*) representam comentários. As linhas que começam com "\*" apresentam o título da informação que consta na linha seguinte. No arquivo do exemplo, foi utilizado o tipo de distribuição de veículos (*vehicle type*) "typedist\_00\_06". Este tipo está relacionado com o período de tráfego descrito neste arquivo. No exemplo apresentado, foi modelado o tráfego entre meia-noite e 6 horas da manhã.

Como citado anteriormente, na Figura 21, foram criados 10 setores no mapa utilizado no trabalho. No arquivo que está sendo descrito, o número de distritos (*District number*) é responsável por esta informação, que é seguida pelos nomes (*names*) dos distritos. Imediatamente abaixo dos nomes começa a matriz de origem e destino deste arquivo.

A matriz deve ser lida da seguinte maneira: Cada linha representa um dos distritos, na ordem dos nomes. Ou seja, a linha 1 (da matriz) trata das viagens com origem no distrito 1 e a linha 2 trata das viagens com origem no distrito 2. De maneira semelhante, as colunas da matriz, também de acordo com a ordem dos nomes, representam os destinos. Desta maneira, é possível perceber que entre a meia-noite e às 6 horas da manhã, devem partir 22 veículos do setor 1 com destino ao setor 7. Além disso, estes veículos devem seguir o tipo "typedist\_00\_06".

Este trabalho utilizou quatro arquivos, no formato descrito na Figura 23, porém com as diferenças apresentadas na Tabela 6. Além destas diferenças, a matriz de origem e destino de cada um dos arquivos também apresenta variação na quantidade de veículos e na relação entre origens e destinos.

**Tabela 6 – Arquivos de matriz origem e destino utilizados no trabalho**

Arquivo	Tipo de veículos	Período
MV_0_6.txt	typedist_00_06	00:00 a 06:00
MV_6_12.txt	typedist_06_12	06:00 a 12:00
MV_12_18.txt	typedist_12_18	12:00 a 18:00
MV_18_24.txt	typedist_18_24	18:00 a 00:00

**Fonte: Autor.**

Neste tipo de matriz apenas são definidas a origem e o destino de uma viagem e não há controle, por parte do usuário, sobre a rota a ser seguida. Para gerar o volume de tráfego de acordo com os dados fornecidos pela EPTC, o seguinte experimento foi realizado:

1. Foi criado um arquivo de matriz origem e destino em que nove veículos partiram do setor 1 com destino a cada um dos outros setores.
2. Os cruzamentos considerados neste trabalho foram monitorados e verificou-se o destino de cada um dos veículos que passou por algum dos cruzamentos.

Este procedimento foi repetido utilizando cada um dos outros nove setores como origem. Desta maneira foi possível identificar quais dos pares de origem e destino que deveriam ser considerados para compor o volume de tráfego fornecido pela EPTC. O resultado deste experimento foi a criação de 14 matrizes, uma para cada um dos sentidos de fluxo de cada cruzamento. Estas matrizes foram chamadas de "Matriz de fluxo de origem/destino".

As matrizes contêm o número 1 no par A/B caso o trajeto que partiu da origem "A" e chegou ao destino "B" passou pelo sentido de fluxo do cruzamento e está em branco caso não passou. Na Figura 24 é possível perceber que os trajetos com origem nos setores 7 e 10 e destino aos setores 1 ao 5, passaram pelo cruzamento das ruas Dona Margarida com Edu Chaves, no sentido de fluxo 5.

**Figura 24 – Exemplo de matriz de fluxo de origem/destino**

Dona Margarida x Edu chaves 5										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7	1	1	1	1	1					
8										
9										
10	1	1	1	1	1					

**Fonte: Autor.**

Em seguida, para cada uma das matrizes de origem/destino, foram criadas mais quatro matrizes, chamadas de "Matriz de distribuição de tráfego", com a mesma estrutura das matrizes de origem/destino, sendo uma para cada turno do dia. A Figura 25 apresenta um exemplo de matriz de distribuição de tráfego no sentido de fluxo 5, do cruzamento das ruas Dona Margarida com Edu Chaves, entre a meia-noite e às 6 horas da manhã.

**Figura 25 – Exemplo de matriz de distribuição de tráfego**

Dona Margarida x Edu chaves 5										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	74	74	74	74	74	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	74	74	74	74	74	0	0	0	0	0

Fonte: Autor, com base nos dados fornecidos por (EPTC, 2015).

Para calcular os valores da matriz, primeiro foi apurada a quantidade total de veículos no sentido de fluxo 5, do cruzamento das ruas Dona Margarida com Edu Chaves, entre a meia-noite e às 6 horas da manhã. Conforme descrito na seção 3.4.2 deste capítulo, este valor foi calculado a partir dos dados fornecidos pela EPTC. Neste exemplo, será utilizado o valor 740. Em seguida, o valor foi dividido pela quantidade de números "1" da matriz (10) da Figura 24.

Por fim, o valor calculado até aqui (74), foi multiplicado pelo valor de cada célula da matriz de distribuição de tráfego. Desta maneira, os 740 veículos que devem passar pelo sentido de fluxo 5 do cruzamento das ruas Dona Margarida com Edu Chaves, entre a meia-noite e às 6 horas da manhã, foram distribuídos entre os pares de origem/destino que passam por este sentido de fluxo. O procedimento exemplificado foi realizado para cada uma das 56 (14 sentidos de fluxo X 4 turnos) matrizes de distribuição de tráfego.

Para calcular, enfim, a matriz de origem e destino de cada arquivo, foram criadas mais 4 matrizes, uma para um dos arquivos citados na Tabela 6. Estas matrizes foram chamadas de "Matriz de origem/destino final". Cada célula desta matriz consiste da soma da célula de mesma linha e coluna de cada uma das 14 matrizes de distribuição de tráfego do turno a que o arquivo se refere.

Uma situação, porém, recebeu tratamento diferenciado. Considerando a Figura 8, suponha-se que uma rota siga, da esquerda para a direita, pela Avenida Sertório, passando pelos cruzamentos com a Avenida Ceará, a Rua Edu Chaves e com a Rua Dona Sebastiana,

respectivamente. Neste caso, não seria correto somar a quantidade de veículos que passaram pelos três cruzamentos, visto que um mesmo veículo, percorrendo a rota citada, passaria pelos três cruzamentos.

Para tratar esta situação, todas as rotas possíveis envolvendo os cruzamentos analisados foram levantadas e, ao calcular as matrizes de origem/destino finais, ao invés de somar os cruzamentos em série, foi utilizada sua média. Esta média foi somada aos demais cruzamentos, como se eles fossem um só.

### 3.4.2.3 SUMO – OD2TRIPS

OD2TRIPS é uma ferramenta distribuída junto com o SUMO. Sua função é transformar matrizes de origem e destino (OD) em viagens (*trips*). Neste trabalho, os arquivos de estrutura TAZ (POA2s3.taz.xml) e de matrizes de origem e destino (MV\_0\_6.txt, MV\_6\_12.txt, MV\_12\_18.txt e MV\_18\_24.txt), citados na seção 3.4.2.2, foram submetidos à ferramenta, dando origem ao arquivo de viagens POA2s3.trips.xml.

Neste processo também foi utilizada a opção "*departlane*", com o valor "*best*", para que no momento em que os veículos fossem adicionados ao mapa da simulação, fosse selecionada sempre a pista mais adequada ao caminho que os veículos deveriam seguir. Por exemplo, caso um veículo tivesse que dobrar à esquerda logo após de ser adicionado ao mapa, ele era adicionado na pista mais à esquerda da via. Caso tivesse que dobrar à direita, na pista mais à direita.

A ferramenta OD2TRIPS possui uma série de opções que podem ser utilizadas ou ativadas. A Tabela 7 exhibe as opções que foram utilizadas neste trabalho para a geração das viagens. A lista completa de opções da ferramenta pode ser encontrada na seção *OD2TRIPS* do manual de usuário do SUMO.

**Tabela 7 – Lista de opções utilizadas em OD2TRIPS**

Opção	Descrição	Valor utilizado
--net-file	Arquivo de zonas de atribuição de tráfego	POA2s3.taz.xml
--od-matrix-files	Informa um ou mais matrizes de origem e destino	MV_0_6.txt, MV_6_12.txt, MV_12_18.txt, MV_18_24.txt
--output-file	O arquivo gerado será salvo com o nome informado	POA2s3.trips.xml
--departlane	Pista em que o veículo deve ser adicionado ao mapa	best
--timeline	Definição da distribuição de tempo das viagens	Ver Tabela 8

**Fonte: Autor, com base no manual de usuário do (SUMO, 2015).**

O comportamento padrão da ferramenta OD2TRIPS faria com que fossem distribuídos, todos os veículos do arquivo "MV\_0\_6.txt", em intervalos de tempo uniformes, entre a meia-noite a às 6 horas da manhã. A opção "--timeline", porém, modifica esta distribuição. A opção recebe como valor uma lista no formato <HORA>:<VALOR>[,<HORA>:<VALOR>], em que tudo que está entre os colchetes pode ser repetido de zero a  $n$  vezes.

No lugar de <HORA> deve ser informado algum momento, em segundos, dentro do intervalo que as matrizes representam. Continuando o exemplo anterior, utilizando o arquivo "MV\_0\_6.txt", poderiam ser informados valores entre 0 e 21.600 para <HORA>, pois uma hora possui 3.600 segundos, logo, 6 horas possuem 21.600 segundos. No lugar de <VALOR> deve ser informada a probabilidade de uma viagem ser gerada na referida <HORA>, por exemplo, 1,16%.

Como no conjunto de dados fornecidos pela EPTC a respeito do volume de tráfego, a contagem de veículos foi realizada em intervalos de 15 minutos, neste trabalho foi criada uma lista de pares <HORA>:<VALOR> sendo que <HORA> variou em intervalos de 15 minutos e, para cada um destes intervalos, foi informado o percentual que o intervalo representa em relação ao total do turno que pertence, correspondendo ao <VALOR>. Este percentual foi calculado conforme descrito na seção 3.4.2. A Tabela 8 apresenta a lista de pares <HORA>:<VALOR> utilizados neste trabalho.

**Tabela 8 – Distribuição de viagens por turno**

Madrugada		Manhã		Tarde		Noite	
Hora	Valor	Hora	Valor	Hora	Valor	Hora	Valor
0	11,41%	21600	1,16%	43200	4,02%	64800	7,62%
900	9,81%	22500	1,52%	44100	3,80%	65700	7,56%
1800	6,70%	23400	2,42%	45000	3,59%	66600	6,57%
2700	4,43%	24300	2,93%	45900	2,95%	67500	6,68%
3600	4,22%	25200	4,09%	46800	3,95%	68400	6,36%
4500	3,20%	26100	4,46%	47700	4,24%	69300	5,85%
5400	2,85%	27000	4,30%	48600	4,05%	70200	5,58%
6300	2,15%	27900	4,53%	49500	4,16%	71100	4,90%
7200	2,97%	28800	5,05%	50400	4,16%	72000	4,35%
8100	1,76%	29700	4,79%	51300	3,99%	72900	4,03%
9000	1,46%	30600	4,63%	52200	4,29%	73800	4,02%
9900	1,06%	31500	4,80%	53100	4,11%	74700	3,39%
10800	1,19%	32400	4,14%	54000	3,86%	75600	3,38%
11700	0,82%	33300	4,46%	54900	4,19%	76500	3,46%
12600	1,66%	34200	5,09%	55800	4,15%	77400	3,14%

Madrugada		Manhã		Tarde		Noite	
13500	1,79%	35100	4,28%	56700	4,09%	78300	3,11%
14400	1,55%	36000	4,54%	57600	4,05%	79200	3,58%
15300	1,98%	36900	4,48%	58500	4,35%	80100	3,55%
16200	2,93%	37800	4,72%	59400	4,30%	81000	2,73%
17100	5,22%	38700	4,80%	60300	4,50%	81900	2,50%
18000	5,78%	39600	4,54%	61200	4,60%	82800	2,53%
18900	6,30%	40500	4,72%	62100	4,75%	83700	1,87%
19800	7,95%	41400	4,96%	63000	4,78%	84600	1,53%
20700	10,79%	42300	4,60%	63900	5,08%	85500	1,68%

Fonte: Autor, a partir dos dados de (EPTC, 2015).

O resultado do processamento da ferramenta OD2TRIPS foi o arquivo "POA2s3.trips.xml". Este tipo de arquivo é composto por todas as viagens que farão parte da simulação de tráfego. Conforme mostra a Figura 26, cada viagem (*trip*) possui uma série de atributos. Destaque para os atributos "partida" (*depart*), que indica em que momento cada viagem se inicia; "tipo" (*type*) que indica o tipo de distribuição de veículos que será utilizado; "origem" (*fromTaz*) e "destino" (*toTaz*), que correspondem ao local de origem e de destino da viagem.

Figura 26 – Exemplo da estrutura do arquivo de viagens

```
<trip id="1" depart="21803.28" from="2881" to="1267" type="typedist_00_06"
  fromTaz="5" toTaz="9" departLane="best" departSpeed="max"/>
<trip id="2" depart="21836.80" from="2800" to="2881" type="typedist_06_12"
  fromTaz="9" toTaz="2" departLane="best" departSpeed="max"/>
<trip id="3" depart="43959.58" from="2809" to="2882" type="typedist_12_18"
  fromTaz="9" toTaz="2" departLane="best" departSpeed="max"/>
<trip id="4" depart="67555.54" from="2078" to="1326" type="typedist_18_24"
  fromTaz="6" toTaz="10" departLane="best" departSpeed="max"/>
```

Fonte: Autor.

#### 3.4.2.4 SUMO - DUAROUTER

DUAROUTER é uma ferramenta distribuída junto com o SUMO. Sua função é criar rotas de viagem para diversos formatos de demanda de tráfego, inclusive as viagens (*trips*). Neste trabalho, os arquivos de malha viária (POA2s3.net.xml) e de viagens (POA2s3.trips.xml), foram submetidos à ferramenta, dando origem ao arquivo de rotas POA2s3.rou.xml.

A ferramenta DUAROUTER possui uma série de opções que podem ser utilizadas ou ativadas. A Tabela 9 exibe as opções que foram utilizadas neste trabalho para a geração das

rotas. A lista completa de opções da ferramenta pode ser encontrada na seção *DUAROUTER* do manual de usuário do SUMO.

**Tabela 9 – Lista de opções utilizadas em DUAROUTER**

Opção	Descrição	Valor utilizado
--net-file	Arquivo de malha viária que deve ser utilizado	POA2s3.net.xml
--trip-files	Arquivo de viagens	POA2s3.trip.xml
--output-file	O arquivo gerado será salvo com o nome informado	POA2s3.rou.xml

**Fonte: Autor, com base no manual de usuário do (SUMO, 2015).**

Para cada uma das viagens contidas no arquivo "POA2s3.trip.xml", DUAROUTER analisa a malha viária (POA2s3.net.xml) e calcula a rota de menor tempo entre a origem e o destino da viagem. As rotas são escritas, então, no arquivo de rotas POA2s3.rou.xml. Como mostra a Figura 27, cada rota (*route*) é composta por uma sequência de ruas (*edges*) que o veículo (*vehicle*) deve seguir. Cada rota também está atrelada a um veículo, que possui um tipo (*type*), seu momento de partida (*depart*), sua origem (*fromTaz*) e seu destino (*toTaz*).

**Figura 27 – Exemplo da estrutura do arquivo de rotas**

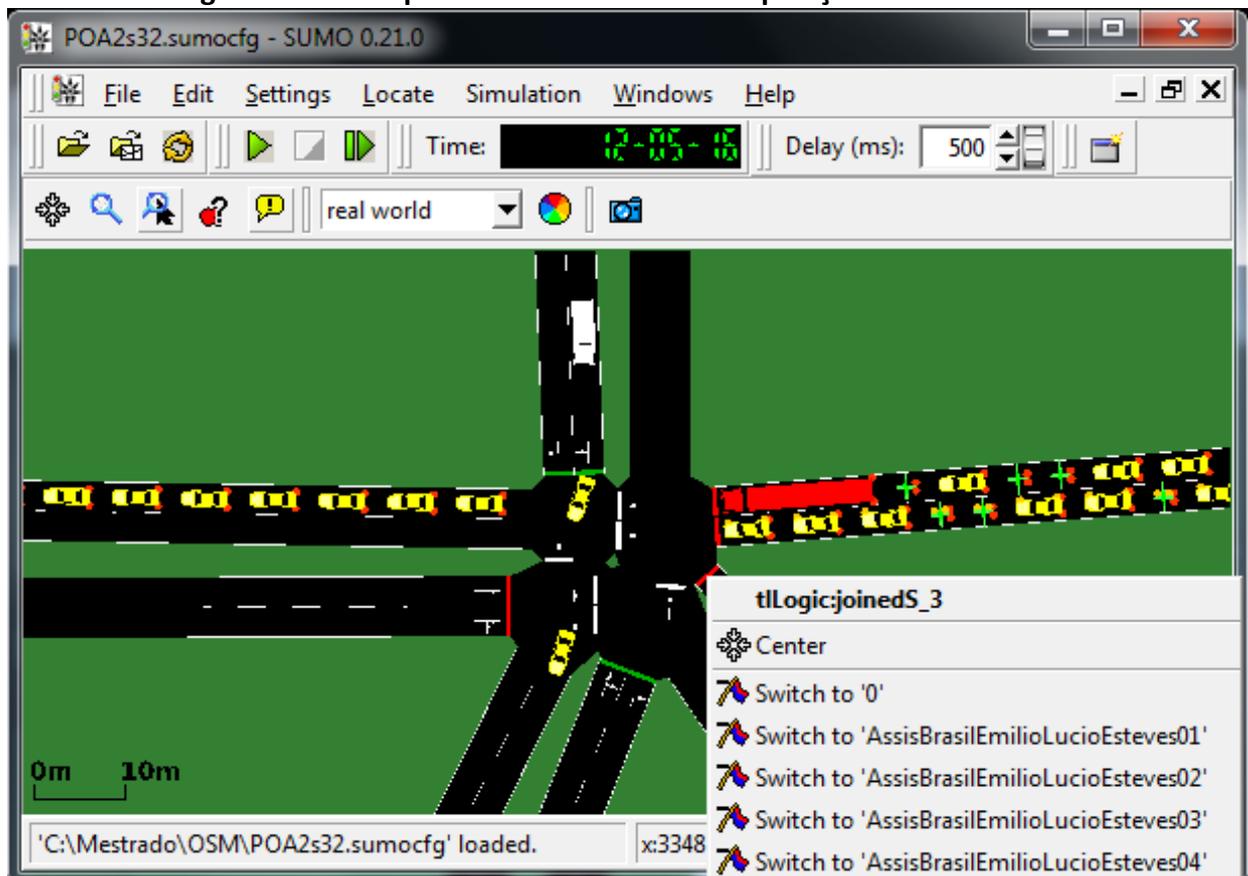
```
<vehicle id="160" type="typedist_00_06" depart="0.81"
  departLane="best" departSpeed="max" fromTaz="9" toTaz="1">
  <route edges="28006699 171973658#0 171973658#1 171973658#2
    99408080#0 99408080#1 99408080#2 75519179 169284836
    99017706#0 99017706#1 99017706#2 28006716#1 28006716#2
    28006716#3 28006716#4 32693539 51769333#0 51769333#1
    51769333#2 254852237#1 254852237#2 254852237#3
    254852237#4 254852237#5 -19164#0 -19164#1 -19164#2
    51769332 27100335 -19154#4 -19154#5 217019025 29209861#1
    254276887 297988926 254665207 297988923 253812262"/>
</vehicle>
<vehicle id="118" type="typedist_00_06" depart="1.83"
  departLane="best" departSpeed="max" fromTaz="7" toTaz="3">
  <route edges="132635662#0 132635662#1 132635664#0 132635664#1
    132635664#2 132632800#0 132632800#1 132632800#2
    132632800#3 132632800#4 132632800#5 -19162 28006340
    220677918#0 220677918#1 28006716#2 28006716#3 28006716#4
    99408068 219421422 288127007#0 288127007#1 288127007#2
    288127007#3 288127008 51770154 288127035 288127034 -19144
    288127020 288127017 288127022 288127023 288127018"/>
</vehicle>
```

**Fonte: Autor.**

### 3.4.3 Simulação

SUMO permite a realização de simulações tanto em ambiente visual quando por linha de comando, através das ferramentas “sumo-gui.exe” e “sumo.exe”, respectivamente. Neste trabalho, a maioria das simulações foi realizada em ambiente visual, pois este tipo de ambiente permite analisar o comportamento do tráfego e das estruturas de controle durante a simulação e verificar se existe algum tipo de problema ou de comportamento diferente do esperado. A Figura 28 exibe um exemplo de utilização da ferramenta de manipulação de semáforos no ambiente gráfico, durante uma simulação.

**Figura 28 – Exemplo de ferramenta de manipulação de semáforos**



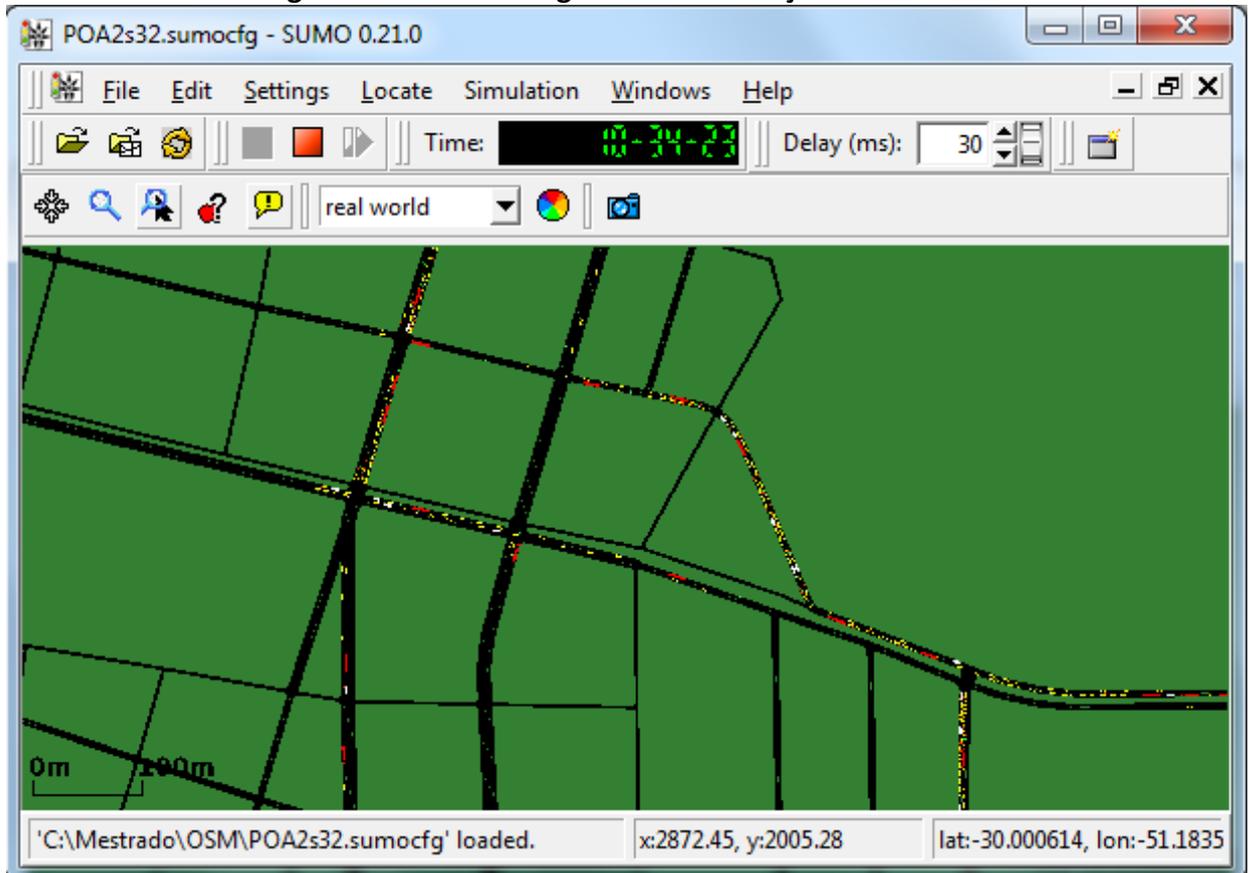
Fonte: Autor.

Durante a validação da malha viária, representação do modelo atual de controle, construção e a validação da lógica do algoritmo de controle dos agentes e das simulações preliminares, centenas de simulações foram realizadas. No desenvolvimento destas atividades, a utilização do ambiente visual, apresentado na Figura 29, foi de grande importância, pois facilitou e tornou mais rápida a análise do comportamento do sistema.

Apenas nas simulações finais, quando foram coletados os dados para as análises realizadas neste trabalho, foi utilizada a simulação por linha de comando. Neste momento não era mais necessário acompanhar visualmente as simulações e, por ser mais rápida que a

simulação em ambiente visual, a simulação por linha de comando permitiu realizar as simulações em um período menor de tempo.

**Figura 29 – Ambiente gráfico de simulação do SUMO**



**Fonte: Autor.**

Para a geração dos dados para análise, foram realizadas cinco simulações com cada um dos modelos de controle de tráfego: o atual e o controlado por agentes. Cada execução levou cerca de uma hora para realizar a simulação de um dia de tráfego no SUMO. O processo todo, porém, levou cerca de cinco horas, pois as simulações foram executadas de maneira paralela, de duas em duas, sendo uma do modelo atual e a outra do modelo controlado por agentes. Para a análise dos dados foi utilizada a média das cinco simulações realizadas com cada cenário.

Tanto para a simulação visual quanto para a por linha de comando, os arquivos que contêm as informações necessárias à simulação podem ser informados um a um, a cada simulação, ou pode ser criado um novo arquivo de configuração, que faça referência a todos os arquivos necessários. Neste trabalho foi criado o arquivo "POA2s3.sumocfg" (Figura 30) para facilitar o processo, visto que várias simulações foram realizadas.

**Figura 30 – Estrutura do arquivo de configuração da simulação**

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.sf.net/xsd/sumoConfiguration.xsd">
  ...
  <input>
    <net-file value="POA2s3.net.xml"/>
    <additional-files value="POA2s3.add.vty.xml,POA2s3.add.tls.xml"/>
    <route-files value="POA2s3.rou.xml"/>
    <gui-settings-file value="POA2s3.settings.xml"/>
  </input>

  <processing>
    <time-to-teleport value="1800"/>
    <time-to-teleport.highways value="1800"/>
  </processing>

  <output>
    <tripinfo-output value="Tripinfo1.xml"/>
  </output>
</configuration>

```

Fonte: Autor.

Após os blocos "xml" e "configuration", na Figura 30 pode-se verificar a lista de arquivos atribuídos como entradas (*input*) à simulação. No parâmetro "net-file" foi informado o arquivo que contém a malha viária do mapa (POA2s3.net.xml), conforme descrito na seção 3.4.1. No parâmetro para arquivos adicionais (*additional-files*) foram informados os arquivos referentes à distribuição de tipos de veículos (POA2s3.add.vty.xml) e de planos de programação semafórica (POA2s3.add.tls.xml), respectivamente descritos nas seções 3.4.2.1 e 3.4.1.3.

A seguir, no parâmetro "route-files", foi informado o arquivo de rotas (POA2s3.rou.xml), conforme descrito na seção 3.4.2.4. E por fim, no parâmetro de configurações de interface (*gui-settings-file*) foi informado o arquivo "POA2s3.settings.xml", contendo definições a respeito de posição e *zoom* inicial de visualização da simulação.

No bloco referente ao processamento da simulação (*processing*) foram definidos os tempos para teletransporte dos veículos (*time-to-teleport* e *time-to-teleport.highways*). Estes parâmetros são utilizados quando, durante uma simulação, um veículo fica preso pelo tempo indicado. Este comportamento evita que a simulação fique travada indefinidamente, caso algum veículo tranque o trânsito por estar em uma situação que não lhe permite mais se mover.

Segundo o manual de usuário do SUMO, na seção *Simulation/Why Vehicles are teleporting*, os veículos são teletransportados em duas situações. A primeira delas é quando um veículo colide com o veículo que está a sua frente. Embora o próprio manual diga que

esta não é uma situação comum e que só deveria ocorrer em caso de problemas na simulação.

A segunda ocorre quando o veículo tem seu avanço obstruído. Essa obstrução pode ser ocasionada por três fatores: i) quando o veículo está em uma via secundária e não consegue acesso à via principal, devido ao grande volume de tráfego; ii) quando um veículo está em uma via principal, mas a quadra a sua frente está completamente cheia e parada; ou iii) quando dois ou mais veículos tentam trocar de pista ao mesmo tempo, em sentidos opostos, e um acaba obstruindo a passagem do outro.

O último bloco do arquivo é o bloco de saídas da simulação (*output*). No parâmetro "*tripinfo-output*" foi informado o arquivo "Tripinfo1.xml", que recebe as informações a respeito de cada uma das viagens realizadas durante a simulação. Estas informações foram utilizadas para a realização das análises apresentadas neste trabalho.

Através da ferramenta de simulação por linha de comando (*sumo.exe*) e utilizando o arquivo "POA2s3.sumocfg", foi então realizada a simulação de um dia inteiro (24 horas) de tráfego, com início à meia-noite e término às 23 horas e 59 minutos, da região de Porto Alegre destacada na Figura 13, na seção 3.4.1.1, e de acordo com os dados de volume de tráfego fornecidos pela EPTC para a região.

### 3.4.3.1 Dados para análise da simulação

Cada veículo que participou da simulação realizada neste trabalho gerou um conjunto de dados a respeito da viagem que realizou. Estes dados foram armazenados no arquivo "Tripinfo1.xml". Arquivos deste tipo são formados por estruturas chamadas "*Tripinfo*" e cada uma destas estruturas armazena os dados referentes a uma viagem realizada. A seguir serão apresentados os dados utilizados neste trabalho a respeito das viagens realizadas. Para uma visão completa a respeito da estrutura "*Tripinfo*", consulte a seção *Simulation/Output/TripInfo* do manual de usuário do SUMO.

A Figura 31 apresenta um exemplo de parte da estrutura *Tripinfo* utilizada neste trabalho. Em cada registro de viagem, o veículo é identificado (*id*), bem como sua hora de partida (*depart*) e seu atraso de partida (*departDelay*). O atraso de partida ocorre quando um veículo não pode ser adicionado à simulação no momento previsto, pois o local em que ele deve ser inserido ainda está sendo ocupado por outros veículos, ou seja, está congestionado.

**Figura 31 – Exemplo de uso da estrutura *Tipinfo***

```
<tripinfo id="188" depart="18.00" departLane="28006699_0" departPos="5.10"
  departSpeed="16.67" departDelay="0" arrival="415.00"
  arrivalLane="288127012_3" arrivalPos="44.37" arrivalSpeed="21.82"
  duration="397.00" routeLength="5780.23" waitSteps="38" rerouteNo="0"
  devices="tripinfo_188" vType="VL_00_06" vaporized=""/>
<tripinfo id="217" depart="31.00" departLane="28006699_0" departPos="5.10"
  departSpeed="16.67" departDelay="0" arrival="423.00"
  arrivalLane="89383720#3_0" arrivalPos="645.41" arrivalSpeed="26.61"
  duration="392.00" routeLength="6249.08" waitSteps="23" rerouteNo="0"
  devices="tripinfo_217" vType="VL_00_06" vaporized=""/>
<tripinfo id="190" depart="39.00" departLane="28006699_0" departPos="2.30"
  departSpeed="16.67" departDelay="0" arrival="425.00"
  arrivalLane="288127012_3" arrivalPos="44.37" arrivalSpeed="20.50"
  duration="386.00" routeLength="5783.03" waitSteps="10" rerouteNo="0"
  devices="tripinfo_190" vType="MT_00_06" vaporized=""/>
```

Fonte: Autor.

Em seguida, são exibidas a hora de chegada ao fim da viagem (*arrival*) e a duração da viagem (*duration*). Com estes dados já é possível saber em que momento cada veículo fez sua viagem e quanto tempo ela durou. Outros dois dados utilizados neste trabalho foram o tempo que os veículos permaneceram parados durante as viagens (*waitSteps*) e o tipo de cada veículo (*vType*), para realizar comparações por tipo de veículo.

Com a coleta destes dados, encerrou-se o processo de simulação da situação atual do tráfego na região analisada de Porto Alegre. Nas seções seguintes serão abordadas as melhorias propostas e implementadas no controle do tráfego, bem com os resultados alcançados e as melhorias que, no entendimento do autor, caso realizadas melhorariam ainda mais as condições de tráfego.

### 3.5 Semáforos inteligentes

A solução proposta neste trabalho, com o objetivo de melhorar o tráfego dos veículos, reduzindo o tempo de suas viagens e o tempo que ficam parados em congestionamentos, foi a criação de semáforos inteligentes. Segundo as definições citadas na seção 2.2 do capítulo 2, um agente inteligente percebe o ambiente em que está inserido e tem capacidade para realizar ações de forma autônoma. Neste sentido, o código fonte da ferramenta SUMO foi alterado e um novo tipo de semáforo foi criado para representar o comportamento de um agente inteligente.

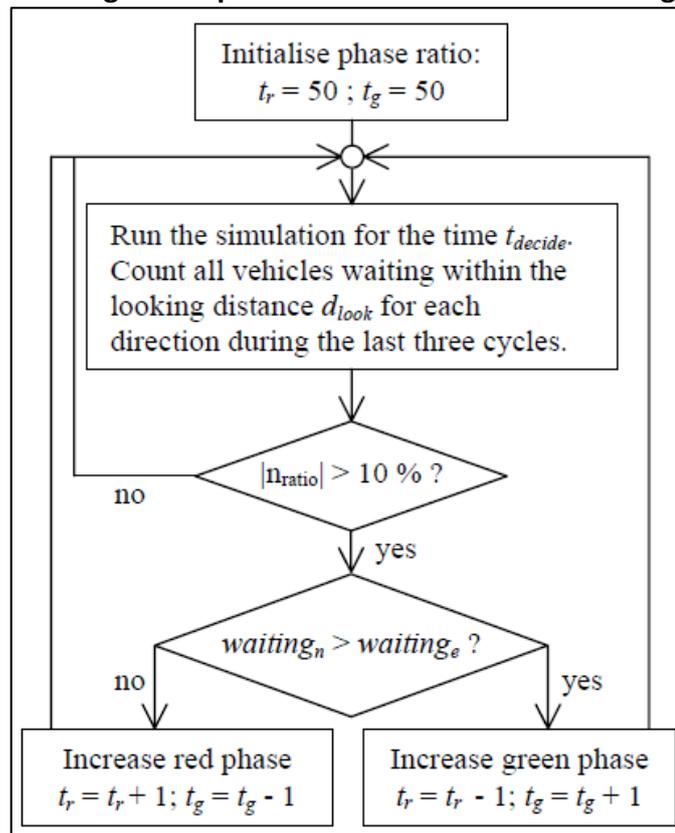
SUMO possui, oficialmente, dois tipos de semáforos: i) os estáticos (*static*), que reproduzem os estágios de tempo definidos inicialmente, pelo projetista da simulação, durante todo o período da simulação; e ii) os atuados (*actuated*), que realizam o prolongamento de fases, com base em intervalos de tempo entre veículos. Os dois tipos

podem, ainda, ser utilizados com planos de programação semafórica, conforme descrito na seção 3.4.1.3. Mais detalhes a respeito dos tipos de semáforo existentes podem ser encontrados na seção *Simulation/TrafficLights*, do manual de usuário do SUMO.

Porém, ao explorar o código fonte da ferramenta, percebeu-se a existência de um terceiro tipo de semáforo, chamado de "AgentBased" e que não consta na documentação oficial da ferramenta. Analisando este tipo e pesquisando a respeito, foram encontrados artigos referenciando o tipo "AgentBased".

O artigo de (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003) apresenta um estudo com o objetivo de melhorar o desempenho de semáforos utilizando agentes inteligentes. A simulação foi realizada em um ambiente fictício, e com malha viária e volume de tráfego controlados e simplificados. No mesmo artigo, os autores propõem um algoritmo para o controle dos semáforos inteligentes, apresentado na Figura 32.

**Figura 32 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes 1**



Fonte: (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003).

No algoritmo apresentado, o tempo das fases vermelha e verde dos semáforos são representados, respectivamente, por  $t_r$  e  $t_g$  e são inicializados com 50 segundos cada. Desta forma o tempo total do ciclo  $t_{cycle} = t_r + t_g = 100$  segundos. Em seguida, a simulação ocorre até que o tempo de decisão  $t_{decide}$  seja atingido. No estudo apresentado, o tempo de decisão foi definido como o triplo do tempo total de ciclo, ou seja, 300 segundos.

Ao atingir o tempo de decisão, o agente realiza a contagem dos veículos que estiveram parados dentro da distância de avaliação  $d_{look}$ , em cada uma das direções durante os últimos três ciclos. Esta contagem é armazenada nas variáveis  $waiting_n$  e  $waiting_e$ , respectivamente, para os sentidos norte e leste. A relação  $n_{ratio}$  é então calculada, através da fórmula  $(waiting_n - waiting_e)/waiting_n$  e indica a razão entre os sentidos norte e leste. Caso esta razão seja maior do que 10% é realizado um ajuste no tempo dos semáforos.

Por fim, avaliando a contagem de veículos armazenada nas variáveis  $waiting_n$  e  $waiting_e$ , o agente define se deve aumentar o tempo de sinal vermelho ou verde em 1 segundo no sentido norte. Caso o tempo de sinal verde seja aumentado, o tempo de sinal vermelho é reduzido, também em 1 segundo. Da mesma forma, caso o tempo de sinal verde do sentido norte seja aumentado, o tempo de sinal verde do sentido leste é reduzido e o tempo de sinal vermelho, também do sentido leste, é aumentado.

Os autores concluíram, com este estudo, que mediante as condições controladas em que as simulações foram realizadas, o desempenho dos semáforos inteligentes foi melhor do que o dos semáforos estáticos. A maior melhora pôde ser notada em situações com baixa densidade de tráfego, visto que o grande volume de veículos excede a capacidade dos sensores de medir o tamanho das filas que se formam.

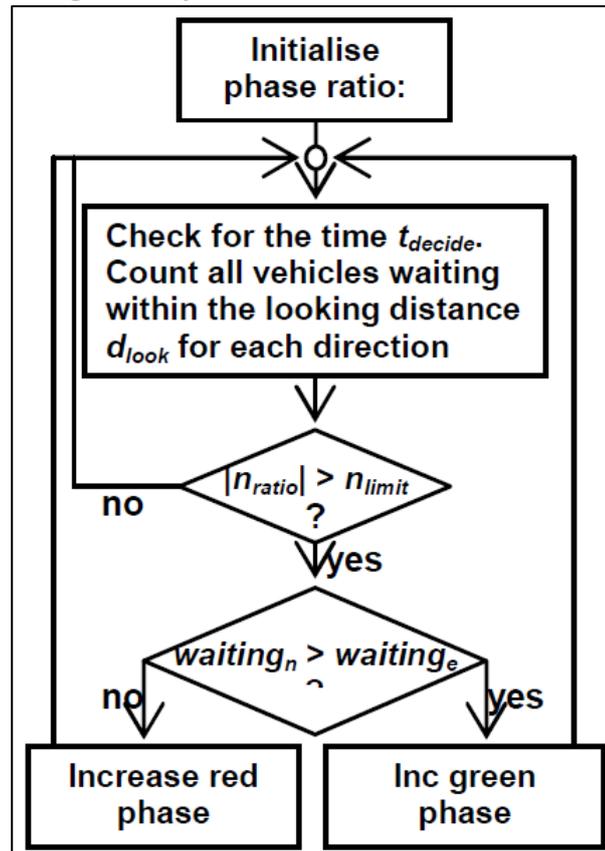
Como perspectivas de trabalhos futuros, os autores indicaram a importância de coordenar as fases de semáforos adjacentes, criando sequências de semáforos abertos em um mesmo sentido. Além disso, mencionaram a ideia de utilizar dados de tráfego reais para validar o modelo.

Posteriormente, (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005) basearam-se no algoritmo proposto por (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003) e utilizaram o SUMO para simular o uso de câmeras em cruzamentos com semáforos, com o objetivo de identificar a extensão e a quantidade de veículos que formam os congestionamentos e, desta forma, melhorar o tráfego naquele ponto.

Os autores, além de propor outra maneira de avaliar o desempenho do tráfego, realizaram algumas alterações no algoritmo original. A classe "*AgentBased*" foi criada no SUMO, com base em uma classe de controle estático de semáforos. Além disso, a estrutura dos semáforos foi alterada, permitindo a definição do tempo mínimo e máximo que cada um dos intervalos pode assumir.

Conforme apresenta a Figura 33, a cada mudança de fase, a extensão dos congestionamentos é avaliada em cada sentido com sinal verde. Estes valores são armazenados em listas que contêm o histórico da última hora de medições em cada sentido. Quando o tempo de decisão  $t_{decide}$  é atingido, a extensão média do congestionamento em cada um dos sentidos é calculada, dividindo a soma de todos os valores de cada lista pelo seu tamanho.

Figura 33 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes 2



Fonte: (KRAJZEWICZ, et al., 2005)

São identificados, então, os sentidos com a menor e a maior média de extensão de congestionamentos. Caso o sentido com a maior média não possa ter seu tempo de sinal verde aumentado, por ter atingido o tempo máximo ou o sentido com a menor média não possa ter o seu tempo de sinal verde diminuído, por ter atingido o tempo mínimo, o algoritmo reinicia e nada é feito em relação aos tempos dos intervalos do semáforo.

Caso contrário, é calculada a razão  $n_{ratio}$ , entre a maior e a menor média de extensão de congestionamentos. O cálculo da razão é realizado através da seguinte fórmula:  $(\text{maior média} - \text{menor média}) / \text{maior média}$ . Caso a razão seja maior que o limite de decisão  $n_{limit}$ , o tempo de sinal verde do sentido com a maior média de extensão de congestionamento é aumentado em 1 segundo e o tempo de sinal verde da menor média é diminuído em 1 segundo.

Os autores concluem, porém, que, apesar de apresentar melhora em alguns casos, os semáforos do tipo "AgentBased" não apresentaram grande melhora no tráfego. Os autores atribuíram tais resultados ao fato do tráfego nos cruzamentos utilizados nos testes ser pequeno e muito equilibrado entre os sentidos.

Como trabalhos futuros, os autores também destacam a importância da criação de um mecanismo de sincronização dos semáforos e sugerem a criação de outros métodos de avaliação de congestionamentos.

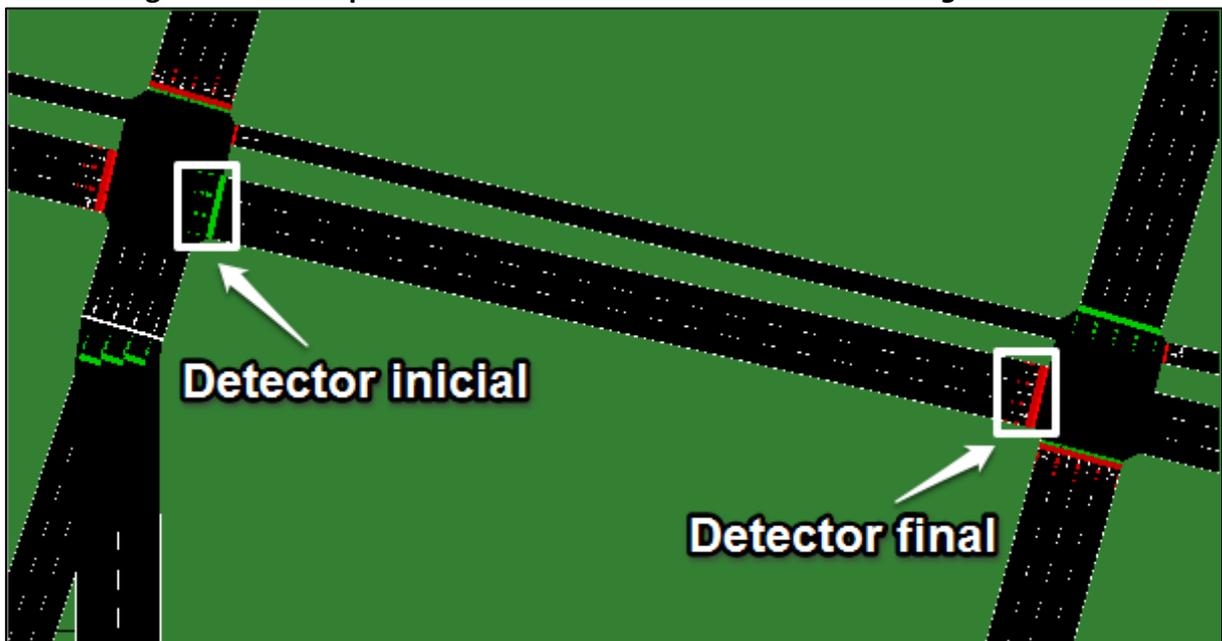
Frente aos resultados encontrados nos artigos citados, optou-se por prosseguir com o objetivo de utilizar semáforos inteligentes. Foi, então, desenvolvido um novo tipo de semáforo, o qual foi chamado de "*AgentBased2*", utilizando os mecanismos de avaliação e de controle do tráfego detalhados a seguir.

### 3.5.1 Características dos agentes

Para o desenvolvimento do tipo de semáforo "*AgentBased2*" foi criada uma nova classe de código fonte no projeto do SUMO, chamada "*MSAgentbased2TrafficLightLogic*". Este nome foi utilizado para manter o padrão de nomenclatura das outras classes de tipos de semáforos. A classe de código fonte do tipo de semáforo atuado, por exemplo, chama-se "*MSActuatedTrafficLightLogic*".

Ao utilizar um semáforo do tipo "*AgentBased2*" em uma simulação do SUMO, serão automaticamente criados detectores de tráfego nas pistas que dão acesso ao semáforo em questão. Como pode ser visto na Figura 34, todas as pistas imediatamente ligadas ao semáforo e que levam tráfego para ele, apresentam detectores verdes no seu início e vermelhos no seu fim. Todos os detectores gerados por um semáforo fazem parte unicamente da estrutura de controle daquele semáforo.

**Figura 34 – Exemplo de detectores utilizados em semáforos *AgentBased2***



Fonte: Autor.

Estes detectores são os sensores dos agentes utilizados neste trabalho. É através dos detectores que os agentes observam o ambiente em que estão inseridos e conseguem perceber qual sentido de tráfego está mais ou menos congestionado. É com base nestas

informações que os agentes tomam suas decisões e realizam as ações de ajuste de tempo dos intervalos dos semáforos.

SUMO dispõe de vários tipos de detectores. Neste trabalho, foram utilizados detectores de entrada e saída, chamados de E3. Como mostra a Figura 34, estes detectores são colocados no começo e no final do trajeto que se deseja monitorar. Desta forma, é possível saber o momento exato em que um determinado veículo entrou e saiu do detector. Maiores detalhes sobre os tipos de detectores existentes e suas formas de utilização podem ser encontrados na seção *Simulation/Output/ Simulated detectors*, do manual de usuário do SUMO.

Os detectores do tipo E3 foram selecionados com o objetivo de calcular o tempo que cada veículo leva para percorrer o percurso coberto pelo detector. Esta informação foi utilizada para avaliar o desempenho da via em que o detector está instalado. Embora existam detectores de entrada e de saída, cabe ressaltar que, conceitualmente, um detector é formado por um par de detectores, sendo um de entrada e outro de saída.

No momento em que cada detector é criado, ele avalia a sua posição no mapa e, automaticamente, classifica-se como sendo um detector do tipo Leste/Oeste (LO) ou Norte/Sul (NS). É com base nessa classificação que o semáforo, enquanto agente, sabe se dois detectores controlam o fluxo de tráfego em direções opostas ou semelhantes.

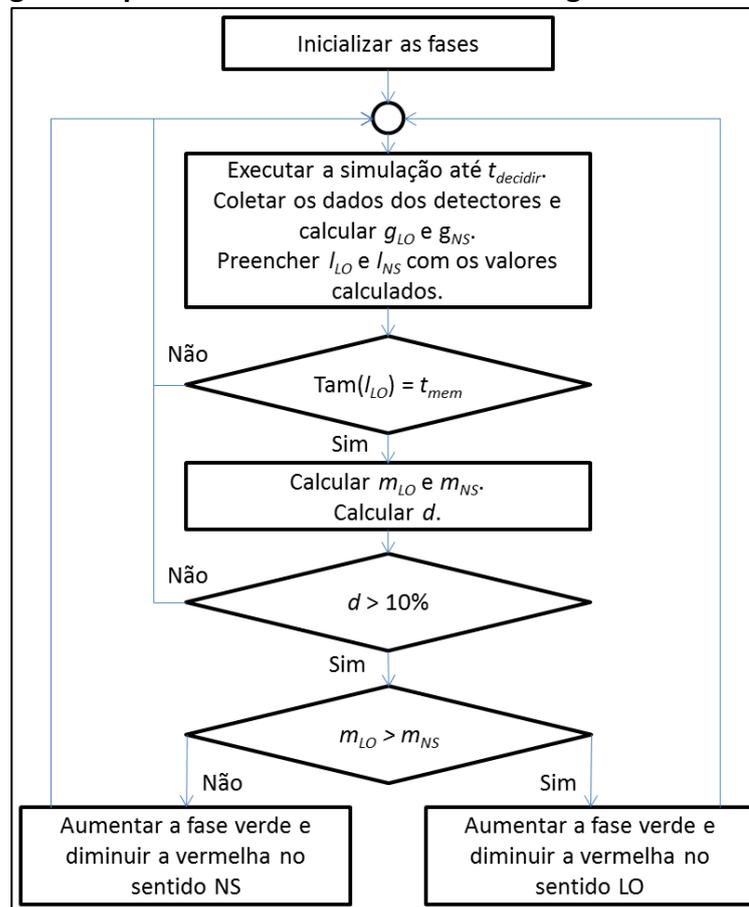
Os agentes utilizados neste trabalho são classificados como reativos, pois percebem o ambiente em que estão inseridos (detectores) e, com base na análise destas informações coletadas, realizam uma ação (percepção – ação), sem projetar ações futuras ou criar estratégias. Além disso, os agentes se comunicam com outros agentes de forma indireta, tomando conhecimento das ações e comportamentos dos outros agentes apenas através de alterações no ambiente e não através de um protocolo de comunicação direta.

De acordo com a distribuição dos 32 semáforos inteligentes no mapa de tráfego e com o nível de relação existente entre os agentes, é possível afirmar que o sistema possui apenas um nível hierárquico, visto que nenhum dos agentes possui influência sobre qualquer outro. Também é possível afirmar que os agentes não trabalham de maneira cooperativa, pois apesar de terem o mesmo objetivo em comum – aumentar o fluxo de veículos – eles não reúnem esforços para realizar esta tarefa. Os agentes buscam atingir um objetivo maior, porém trabalhando de maneira individual.

### 3.5.2 A heurística dos agentes

Com base nos trabalhos de (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003), (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005) e nos respectivos algoritmos, apresentados na Figura 32 e na Figura 33, da seção 3.5 deste capítulo, um novo algoritmo foi desenvolvido, utilizando a classe "AgentBased2". Além de utilizar detectores de tipo diferente dos trabalhos citados, o método de avaliação dos congestionamentos e alguns passos do algoritmo foram repensados neste trabalho. A Figura 35 apresenta o algoritmo desenvolvido e utilizado neste trabalho e que é descrito a seguir.

**Figura 35 – Algoritmo para controle de semáforos inteligentes utilizado no trabalho**



Fonte: Autor, adaptado de (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003) e (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005).

De tempos em tempos, todo semáforo do tipo "AgentBased2" realiza a avaliação do tráfego que passou pelo cruzamento que ele controla e, quando for preciso, realiza as adequações que julgar necessárias. Esta avaliação ocorre sempre que um ciclo de intervalos do semáforo é concluído ( $t_{decidir}$ ). Conforme descrito na seção 3.2.1, um ciclo é caracterizado pela passagem do semáforo por todos os seus intervalos de tempo e geralmente composto pelas fases verde, amarela, vermelha e, novamente, amarela.

Ao concluir um ciclo, o semáforo realiza a leitura dos dados armazenados pelos detectores de sua estrutura. Estes dados são retornados para o semáforo agrupados pelo sentido dos detectores (LO ou NS) e em formato de um índice ( $i_{eficiência}$ ). Este índice representa a eficiência do semáforo em liberar a passagem para os veículos de cada um dos sentidos (LO ou NS).

Para compreender o cálculo deste índice, primeiro é necessário compreender a estrutura dos detectores do tipo E3. Basicamente, sempre que um veículo entra em um detector, o momento da sua entrada é armazenado e o veículo é adicionado a uma lista de entradas. Posteriormente, ao sair do detector, o momento da saída é armazenado, o veículo é removido da lista de entradas e adicionado a uma lista de saídas.

Ao ler os dados de um detector, a lista de veículos que saíram do detector no último ciclo é percorrida e o tempo médio que os veículos permaneceram dentro do detector é calculado. Caso nenhum veículo tenha saído do detector, o tempo mínimo necessário para percorrer o detector é utilizado. Este tempo mínimo é calculado com base na distância do detector inicial para o final e na velocidade máxima permitida no local.

Após calcular o tempo médio ou utilizar o tempo mínimo, este valor é dividido pelo mesmo tempo mínimo. O objetivo é gerar um índice ( $i_{eficiência}$ ) que represente, em média, o quão próximo do tempo mínimo necessário para cruzar o detector estão os veículos que passaram por ele. Quanto menor for este índice, maior é o sinal de que o trânsito está congestionado no sentido daquele detector, necessitando de maior tempo de sinal verde naquele sentido.

Após ler os dados de todos os detectores que compõem sua estrutura, o semáforo possui uma lista de detectores, cada um com sua representação de sentido (LO ou NS) e com seu tempo de índice calculado. Neste momento, o semáforo verifica qual é o menor índice em cada um dos sentidos (LO e NS), assumindo este índice como sendo o índice geral de cada sentido. Neste momento, existem dois sentidos opostos (LO e NS) cada um com o índice ( $g_{LO}$  e  $g_{NS}$ ) que representa o seu tráfego.

Cada sentido possui uma lista ( $I_{LO}$  e  $I_{NS}$ ), de tamanho  $t_{mem}$ , neste trabalho definidas em 3 posições. Estas listas são preenchidas com o índice do sentido que representam, de forma sequencial, começando na posição 1, avançando até a posição  $t_{mem}$  e, após atingir esta posição, retornando à posição 1 e sobrescrevendo o valor que constava nesta posição. Desta forma, neste trabalho, cada lista guarda os três últimos índices calculados para cada sentido de tráfego. Note que, somente ao final do terceiro ciclo semafórico as listas estarão totalmente preenchidas, visto que a cada ciclo apenas uma posição é preenchida.

Enquanto as listas não tiverem suas 3 posições preenchidas, nenhuma tentativa de alteração de plano semafórico é realizada. A partir do momento que as 3 posições são preenchidas e, a cada ciclo deste momento em diante, o semáforo avalia a necessidade de realizar alguma alteração em seu plano semafórico.

O primeiro passo para realizar essa avaliação, depois de terem sido atualizadas as listas com os índices calculados no ciclo que está sendo executado, é calcular a média dos valores de cada lista, dando origem ao índice médio de cada sentido ( $m_{LO}$  e  $m_{NS}$ ). Este é o valor final que será utilizado, para cada sentido, para avaliar a necessidade de alteração do plano semafórico. Esta média foi estipulada para reduzir os ruídos causados por trânsito ocasional em algum dos sentidos.

Imagine, por exemplo, que um cruzamento tem trânsito intenso no sentido LO e nenhum trânsito no sentido NS. Após algum tempo nesta situação, o semáforo terá se adequado para ficar muito tempo aberto no sentido LO e quase nenhum no sentido NS. Caso um único veículo trafegue no sentido NS, ele provavelmente ficará muito tempo parado no semáforo e o detector que monitora o sentido NS terá um índice  $g_{NS}$  muito baixo.

Caso apenas o índice  $g_{NS}$  (daquele ciclo) fosse considerado, o semáforo concluiria que o tráfego no sentido NS está muito ruim e aumentaria o tempo de sinal verde para ele. A média  $m_{NS}$  serve, então, para diluir estes ruídos. Caso o sentido NS não tenha tido tráfego nos dois ciclos anteriores e, portanto, tenha os valores 1 e 1 em  $I_{NS}$ , caso o índice do terceiro ciclo seja de apenas 0,1,  $I_{NS}$  passa a ser 1, 1 e 0,1 e o índice médio do sentido ( $m_{NS}$ ) ainda será 0,7  $((1+1+0,1)/3)$ , que é considerado bastante alto.

Explicando o exemplo anterior, caso algum detector em um sentido "A" não apresente tráfego durante um ciclo, é atribuído a ele o maior índice possível, 1. Este comportamento foi adotado para garantir que o outro sentido ("B"), caso apresente tráfego, possua um índice menor do que "A". Desta forma, um sentido que possui tráfego, por menor que seja o volume, é sempre priorizado em relação a um sentido que não tenha tráfego algum. Já o índice 0,1 foi utilizado para exemplificar uma condição muito ruim de tráfego, sendo que o índice pode variar de 0 a 1, sendo 0 a pior condição e 1 a melhor.

Tamanhos diferentes de 3 posições para  $t_{mem}$  foram avaliados, porém tamanhos menores faziam pouco efeito e tamanhos maiores acabavam fazendo com que somente variações muito grandes no sentido ou no volume de tráfego fossem reconhecidos como relevantes. A consequência disso era que os semáforos acabavam demorando muito tempo para se adequar às mudanças no tráfego.

Este índice médio, que representa o quanto o tempo que os veículos levaram para passar por um detector se aproximou do tempo mínimo necessário para passar por aquele detector, é o método de avaliação dos congestionamentos adotado neste trabalho. Os trabalhos de (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003) e (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005) utilizaram o tamanho das filas formadas pelos congestionamentos como método de avaliação. Optou-se por utilizar o índice médio devido ao problema relatado nos trabalhos citados, ocasionado quando a fila de congestionamento ocupa todo o detector.

No caso dos trabalhos citados, quando todo o espaço de medição do detector, ou da câmera, é ocupado pelo congestionamento, em todos os sentidos de tráfego, o semáforo

tende a equilibrar os tempos de sinal verde. Isso ocorre porque os índices de desempenho dos sentidos tendem para o pior caso, pois todos os detectores estão congestionados e a fila que se forma fora dos detectores não pode ser avaliada.

Utilizando o índice proposto, a eficiência dos semáforos em liberar o tráfego em cada um dos sentidos é avaliada utilizando a velocidade praticada pelos veículos em relação à velocidade máxima permitida na via. Neste caso, independente do tamanho do congestionamento, o sentido que estiver desempenhando a menor média de velocidade, em relação à velocidade máxima permitida, será beneficiado com mais tempo de sinal verde, para que esta média aumente.

Calculado o índice médio de cada sentido ( $m_{LO}$  e  $m_{NS}$ ), é calculada a diferença absoluta entre os dois índices ( $d$ ). Caso esta diferença seja inferior ou igual a 0,1 (10%), nenhuma tentativa de alteração de plano semaforico é realizada. Esta restrição foi adotada considerando que, caso a diferença entre os dois índices seja pequena ( $\leq 0,1$ ), a distribuição do tráfego naquele cruzamento está equilibrada e, portanto, não deve ser alterada. Por fim, caso a diferença seja maior do que 0,1, o plano semaforico é ajustado.

O ajuste do plano semaforico consiste em aumentar em 1 segundo o tempo de sinal verde no sentido com pior desempenho de tráfego e o tempo de sinal vermelho no sentido oposto e, conseqüentemente, diminuir em 1 segundo o tempo de sinal vermelho no sentido com pior desempenho de tráfego e o tempo de sinal verde do sentido oposto. A este ajuste ainda podem ser aplicadas duas restrições.

A primeira restrição é que os intervalos do plano semaforico nunca podem ficar com seu tempo de sinal vermelho inferior a 8 segundos. A outra restrição é que os intervalos do plano semaforico nunca podem ficar com seu tempo de sinal verde maior do que o dobro do seu tempo de sinal verde inicial. Caso alguma das fases vermelhas atinja seu tempo mínimo de 8 segundos, sua respectiva fase verde poderá continuar sendo aumentada até atingir o dobro de seu valor inicial, enquanto a fase vermelha permanecerá com 8 segundos.

Estas restrições foram adotadas para, respectivamente, evitar que um semáforo fique fechado de maneira indefinida em algum dos sentidos e para se adequar às condições de tráfego intenso em algum dos sentidos. Estas restrições podem, porém, alterar o tempo total do ciclo do semáforo. Essa condição foi considerada aceitável, pois esta prática é utilizada, inclusive, nos planos semaforicos fornecidos pela EPTC, para adequar os intervalos do semáforo ao volume de tráfego em determinados momentos do dia.

### 3.5.3 Simulando novamente

Após realizar a implementação do comportamento descrito na seção anterior na classe *MSAgentbased2TrafficLightLogic*, a simulação apresentada na seção 3.4.3 foi realizada novamente, porém, com as adequações necessárias à utilização dos semáforos inteligentes.

Inicialmente, o arquivo "POA2s3.add.tls.xml" foi duplicado, e o novo arquivo foi chamado de "POA2s32.add.tls.xml". Neste novo arquivo, todos os planos da estrutura WAUT (Figura 19 da seção 3.4.1.3) foram removidos. Além disso, de todas as programações semafóricas da estrutura WAUT (Figura 18 da seção 3.4.1.3), apenas o programa "02" de cada semáforo foi mantido, sendo todos os outros programas removidos. Em seguida, o tipo (*type*) do programa "02" restante em cada um dos semáforos foi alterado de "static" para "agentbased2", transformando o semáforo em um semáforo inteligente.

Depois disso, foi realizada uma cópia do arquivo "POA2s3.sumocfg". Esta cópia foi nomeada como "POA2s32.sumocfg". Neste arquivo, inicialmente igual ao exibido na Figura 30 da seção 3.4.3, deste capítulo, o parâmetro de arquivos adicionais (*additional-files*) foi alterado, substituindo o arquivo "POA2s3.add.tls.xml" pelo arquivo "POA2s32.add.tls.xml", que contém a definição dos semáforos inteligentes.

Por fim, no parâmetro "tripinfo-output" foi informado o arquivo Tripinfo2.xml, para separar as informações a respeito das viagens realizadas durante a simulação com semáforos inteligentes das geradas na simulação inicial, com os semáforos controlados por planos de programação.

Através da ferramenta de simulação por linha de comando (sumo.exe) e utilizando o arquivo "POA2s32.sumocfg", foi então realizada a simulação de um dia inteiro (24 horas) de tráfego, com início à meia-noite e término às 23 horas e 59 minutos, da região de Porto Alegre destacada na Figura 13, na seção 3.4.1.1, e de acordo com os dados de volume de tráfego fornecidos pela EPTC para a região.

## 4 RESULTADOS

A partir das duas simulações realizadas: a primeira simulando o comportamento atual do trânsito e tendo como resultado o arquivo "Tripinfo1.xml"; e a segunda utilizando os semáforos inteligentes, com a lógica do algoritmo de controle dos semáforos definida, e tendo como resultado o arquivo "Tripinfo2.xml", foram realizadas análises dos dados de tráfego gerados. Para isso, o conteúdo dos dois arquivos foi adicionado a uma planilha, sendo classificado como do tipo "Static" para o arquivo "Tripinfo1.xml" e "AgentBased2" para o arquivo "Tripinfo2.xml".

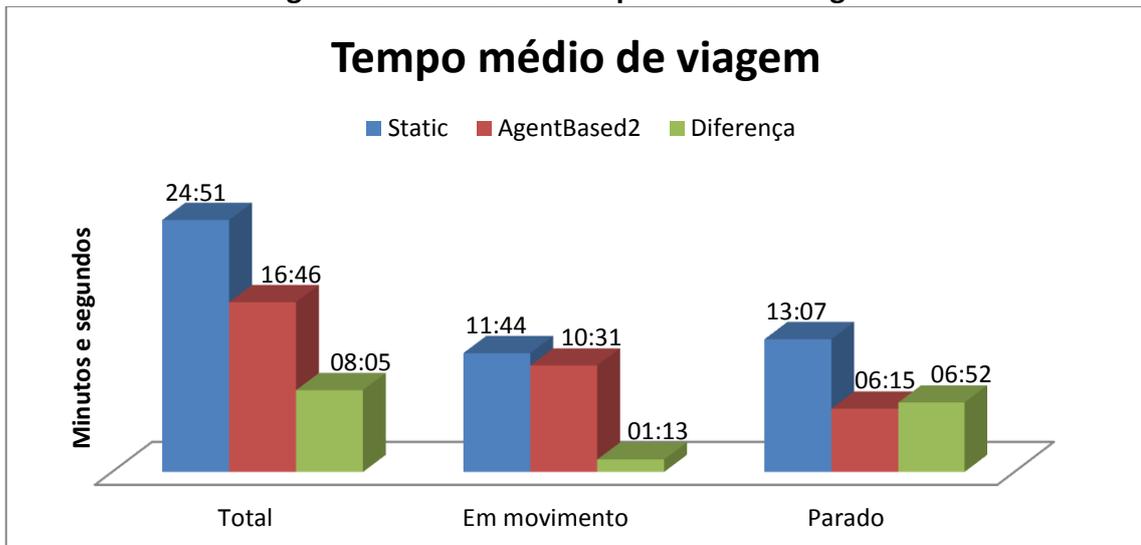
De todos os dados apresentados na Figura 31 e descritos na seção 3.4.3.1, a respeito da estrutura *Tripinfo*, os principais utilizados nas análises realizadas neste trabalho foram: a hora de partida dos veículos (*depart*), a duração das viagens (*duration*) e o tempo que os veículos permaneceram parados durante as viagens (*waitSteps*).

### 4.1 Resultados obtidos

O primeiro resultado foi obtido através do cálculo do tempo médio das viagens e do tempo médio que os veículos permaneceram parados. Por consequência, obteve-se, também, o tempo médio em que os veículos permaneceram em movimento durante as viagens. Este cálculo foi realizado, inicialmente, para cada uma das simulações e sobre o número total de viagens realizadas.

A Figura 36 apresenta o resultado geral da melhoria proposta para o sistema de controle de tráfego analisado. Nela, pode-se perceber o tempo médio (total) do modelo de semáforo utilizado atualmente (*Static*), do novo modelo proposto (*AgentBased2*) e a diferença entre eles. Além disso, também é apresentado o tempo médio que os veículos permaneceram em movimento e parados, nas duas simulações, e a diferença entre eles. Para cada um destes três casos, a soma do tempo em movimento com o tempo parado resulta no tempo total.

Figura 36 – Gráfico do tempo médio de viagem



Fonte: Autor.

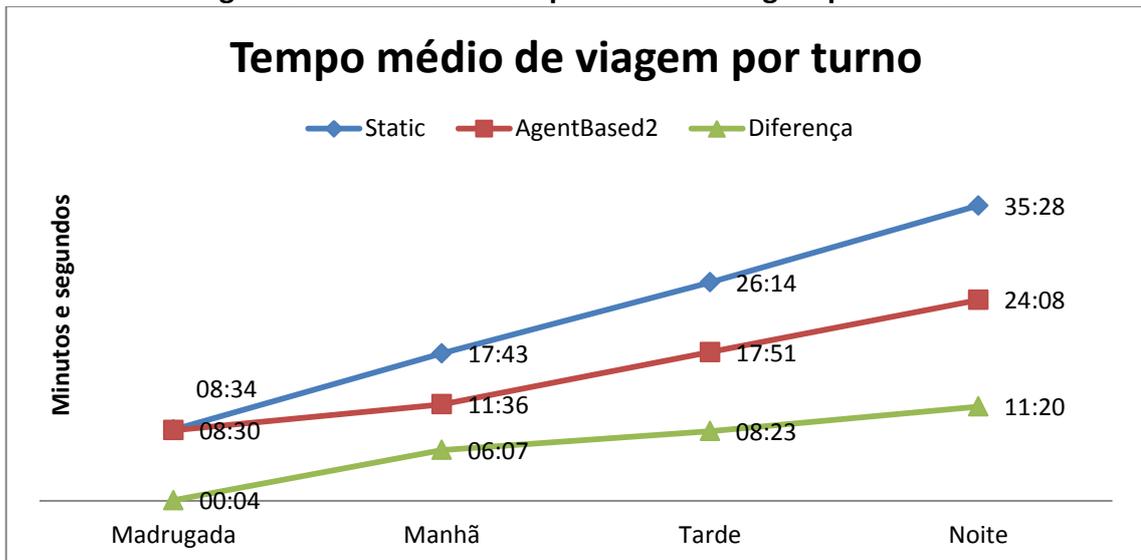
Na Figura 36 é possível perceber uma redução de 8 minutos e 5 segundos no tempo médio das viagens realizadas na simulação utilizando os semáforos propostos, na região e no período analisado. É uma redução de 32,53% em relação ao tempo médio das viagens verificado na simulação que não utilizou os semáforos inteligentes.

Do tempo total reduzido, 6 minutos e 52 segundos foram reduzidos do tempo médio que os veículos permaneciam parados no trânsito. Isso representa mais da metade (52,31%) do tempo total parado na primeira simulação. Atribui-se esta redução ao melhor gerenciamento dos semáforos, pois o principal objetivo dos agentes inteligentes, neste trabalho, foi o de maximizar o fluxo de veículos. Com o aumento do fluxo de veículos, o tempo parado diminuiu.

Já 1 minuto e 13 segundos foram reduzidos do tempo médio que os veículos estão em movimento. Atribui-se esta redução à maior velocidade média desempenhada pelos veículos durante as viagens, visto que menos paradas em semáforos e congestionamentos foram realizadas. É possível chegar a esta conclusão constatando que, nas duas simulações, as viagens realizadas foram as mesmas. Desta forma, se a distância percorrida se manteve e o tempo para percorrê-la diminuiu, a velocidade média das viagens aumentou.

Para detalhar melhor o comportamento do tráfego analisado, uma análise semelhante foi realizada, porém com os dados agrupados por turnos do dia e não mais de maneira geral. Para realizar a análise apresentada na Figura 37, a hora inicial das viagens foi utilizada para a criação dos turnos. Os turnos considerados foram os da madrugada, entre 0 e 6 horas; manhã, entre 6 e 12 horas; tarde, entre 12 e 18 horas; e noite, entre 18 e 0 horas. A hora final sempre foi utilizada de maneira exclusiva, ou seja, até os 59 minutos e 59 segundos da hora anterior.

Figura 37 – Gráfico do tempo médio de viagem por turno



Fonte: Autor.

Na Figura 37 é possível perceber que, tanto na simulação utilizando os semáforos tradicionais (*Static*) quanto na que utiliza os agentes (*AgentBased2*), o tempo médio das viagens aumenta ao longo do dia. Porém, a principal informação percebida nesta análise foi na comparação entre os turnos da manhã, das duas simulações. Os semáforos inteligentes conseguiram reduzir o tempo médio das viagens neste turno em 34,56%, resultado acima da média geral de 32,53%.

Atribui-se este desempenho acima da média ao fato deste ser o turno em que começam a se formar os congestionamentos. Neste momento, os semáforos inteligentes conseguem se adaptar muito bem ao tráfego, atingindo seu melhor desempenho em relação aos semáforos estáticos. Isso faz com que os congestionamentos demorem mais a se formar e se formem de maneira mais gradual, passando a ocorrer somente quando o trânsito se torna saturado em muitos sentidos.

Esta constatação também foi percebida por (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005), ao realizar testes com o tipo de semáforo "*AgentBased*". Conforme os autores citam nos resultados de seu trabalho, este tipo de semáforo apresenta melhor desempenho em cruzamentos onde há grande variação no volume e no sentido do tráfego, justamente por causa da sua grande capacidade de se adaptar.

## 4.2 Considerações

Os resultados apresentados neste trabalho não podem ser comparados, diretamente, aos de (MIKAT, BROCKFELD e WAGNER, 2003) e (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2005), principalmente pelo caráter experimental em que foram desenvolvidos os trabalhos citados. Nos dois trabalhos, os semáforos, o sentido e o volume de tráfego foram controlados para gerar os cenários que os autores desejavam avaliar. Isso lhes permitiu, por exemplo, avaliar a velocidade média dos veículos de acordo com a densidade do tráfego que era gerado.

Enquanto os trabalhos citados têm seus semáforos inicializados com tempos iguais nos dois sentidos, este trabalho, por utilizar dados reais, tem seus semáforos inicializados já com tempos adequados ao tráfego que vão gerenciar. Além disso, são utilizados os planos de programação semaforica, que são adequados aos programas dos semáforos de tempos em tempos. Desta forma, não é possível isolar as densidades de tráfego e comparar o desempenho do semáforo "*AgentBased2*" com os semáforos originais, pois estes não estarão operando com tempos iguais nos dois sentidos.

De modo geral, enquanto os trabalhos citados tiveram como foco avaliar o desempenho de semáforos inteligentes, frente aos semáforos estáticos, em cenários específicos, este trabalho direcionou seu foco para a avaliação do desempenho de semáforos inteligentes em relação aos que possuem planos de programação, durante sua operação em um ambiente real. Por este motivo, neste trabalho, as comparações realizadas foram feitas em relação ao ambiente real e não aos trabalhos utilizados com base para o desenvolvimento deste.

Os resultados obtidos neste trabalho foram considerados bastante relevantes, pois apresentaram redução significativa no tempo das viagens realizadas na área analisada, quando utilizados os semáforos inteligentes propostos. Mediante os resultados apresentados, será avaliada a possibilidade de propor à EPTC uma apresentação dos resultados alcançados, para que a entidade avalie a possibilidade de expandir esta pesquisa e a viabilidade de utilizá-la de forma prática.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou êxito ao atingir seu objetivo principal, de tornar mais eficiente o fluxo de veículos em centros urbanos, ao utilizar agentes inteligentes para a coordenação e melhoria de desempenho das políticas de gerenciamento de tráfego. Nos resultados apresentados, pôde-se verificar a redução do tempo das viagens e dos congestionamentos e, por consequência, o menor tempo dos motores dos veículos em operação.

Efeito este que afeta, ao mesmo tempo, as esferas social, ao proporcionar maior qualidade de vida ao motorista e menor tempo de exposição ao *stress* do trânsito; econômica, ao permitir que o tempo melhor aproveitado seja investido de maneira produtiva, ou ainda, que reduza o custo das atividades que envolvam deslocamento de veículos; e ambiental, ao manter o motor dos veículos ligado por menos tempo e em velocidades maiores, gerando menos poluição.

Quanto aos objetivos específicos, foi realizado um estudo de trabalhos relacionados ao controle de tráfego, apresentado na Figura 6, da seção 2.7, do capítulo 2, em que foram classificadas as diferentes técnicas, arquiteturas e estratégias de controle utilizadas. Este estudo serviu como base para a verificação do que tem sido produzido na área de CATU e guiou o desenvolvimento do trabalho, principalmente nas definições a respeito da arquitetura e da estratégia de controle utilizadas.

Ao classificar este trabalho de acordo com a análise feita para a construção da Figura 6, da seção 2.7, do capítulo 2, o objetivo poderia ser descrito como: Tornar mais eficiente o fluxo de veículos em centros urbanos. Já a técnica utilizada foi a de agentes inteligentes com uma heurística. A arquitetura selecionada para estruturar os agentes neste trabalho foi a distribuída. E, por fim, a estratégia utilizada nos agentes foi a responsiva.

Também foi realizado um estudo a respeito de SMA que realizassem simulações de modelos de CATU, conforme descrito nas seções 3.3 e 3.3.1, do capítulo 3. Este estudo resultou na seleção do pacote de ferramentas SUMO que, além de outras ferramentas, contém um simulador de tráfego urbano, no qual foram implementados os agentes inteligentes utilizados neste trabalho.

O formato dos agentes desenvolvidos foi descrito na seção 3.5 e 3.5.1, do capítulo 3, onde foi especificada a arquitetura utilizada pelo sistema, além das características e da lógica de tomada de decisão dos agentes inteligentes. Lógica esta implementada através de um algoritmo de controle e das variáveis consideradas durante o processo de tomada de decisão, apresentados na seção 3.5.2, do capítulo 3, e utilizados pelos agentes para realizar as adequações necessárias ao controle do tráfego.

Por fim, mediante os dados fornecidos pela EPTC e os acessados através do *OpenStreetMap*, o atual sistema de tráfego foi representado de maneira satisfatória, dando fidelidade aos resultados atingidos. Os números apresentados na seção 4.1 do capítulo 4, referentes aos resultados obtidos, não deixam dúvida a respeito da melhora no desempenho do tráfego causada pelo mecanismo de semáforos inteligentes proposto, frente ao atual sistema de controle de tráfego empregado no local analisado.

Além dos expressivos resultados, este trabalho criou uma base para que outros trabalhos sejam desenvolvidos, aprofundando as pesquisas realizadas, desenvolvendo novos mecanismos de controle e propondo novas e melhores maneiras de realizar as tarefas aqui abordadas.

Enfim, um cenário atual foi simulado e analisado, uma melhoria ao atual cenário foi proposta, avaliada e obteve sucesso nos resultados apresentados. A seguir, apresenta-se um conjunto de sugestões, para que este estudo continue vivo. Desta maneira, os objetivos propostos foram considerados atingidos pelos autores e o trabalho, ao menos por enquanto, foi finalizado.

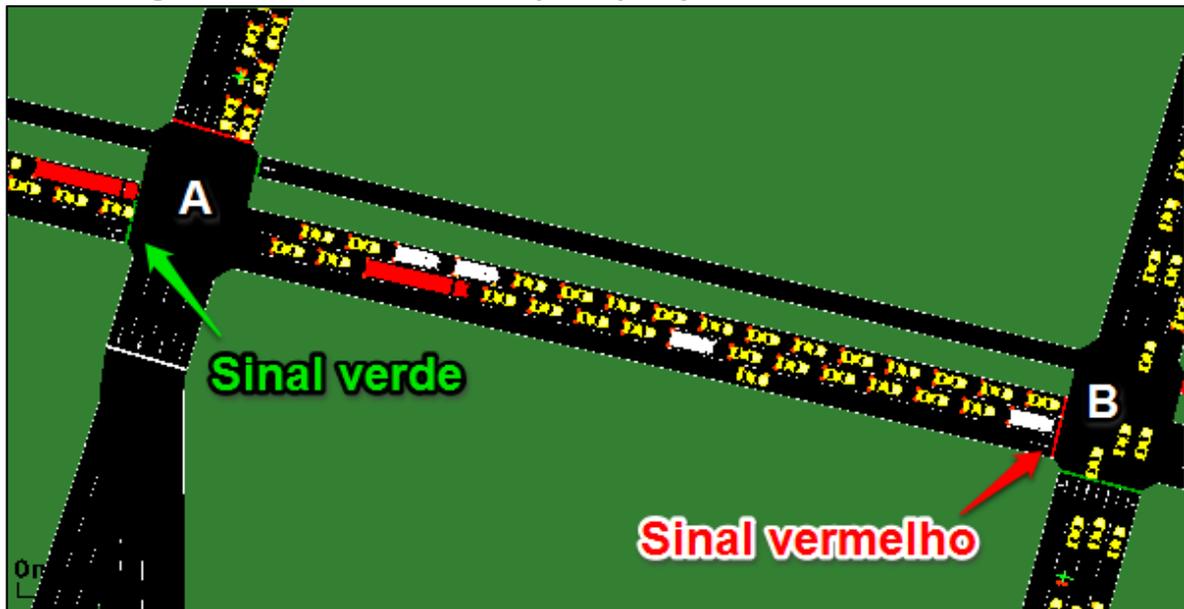
## **5.1 Trabalhos Futuros**

Embora apenas o tempo médio das viagens e o tempo médio que os veículos permanecem parados no trânsito tenham sido avaliados, já é possível perceber o potencial na melhoria proposta neste trabalho. Isso nos permite projetar avanços no desenvolvimento deste projeto, com o objetivo de melhorar ainda mais os resultados.

Um dos principais problemas que ainda pode ser verificado no comportamento dos semáforos inteligentes propostos é o fato deles operarem de forma individual. Por causa disso, cruzamentos subsequentes acabam, em muitos casos, reduzindo o desempenho de seus antecessores, causando uma diminuição relevante ao desempenho do tráfego.

Conforme ilustra a Figura 38, caso um semáforo A fique aberto por muito tempo em determinado sentido e, logo a sua frente, um semáforo B esteja fechado neste sentido, o tempo do semáforo A estará sendo desperdiçado, pois os veículos que quiserem avançar em direção ao semáforo B só poderão fazê-lo a partir do momento em que o semáforo B abrir e o trânsito represado por ele se mover.

**Figura 38 – Problema causado pela operação individual dos semáforos**



Fonte: Autor.

Portanto, considera-se de grande importância o desenvolvimento de um mecanismo de negociação entre os agentes, para que consigam sincronizar o funcionamento de semáforos consecutivos. A análise preliminar realizada visualmente durante as simulações aponta que a resolução deste problema resultaria em ganho relevante para o desempenho do tráfego.

Outra melhoria que merece ser explorada se refere à arquitetura dos agentes do sistema. Atualmente os agentes são do tipo reativo, por isso consideram as condições de tráfego com base no algoritmo desenvolvido para sua operação. Agentes cognitivos poderiam adquirir conhecimento a respeito do sistema de tráfego e empregá-lo na construção de novas e melhores soluções de controle.

Uma das possibilidades recomendada como de grande relevância é o emprego do conceito de algoritmos de aprendizagem aos agentes, dando-lhes a capacidade de expandir seu universo de soluções e tornarem-se ainda mais eficazes ao realizar o controle do tráfego. O desenvolvimento desta capacidade elevaria a qualidade deste estudo, colocando-o em nível semelhante aos trabalhos mais recentes desenvolvidos sobre o tema.

Conforme descrito na seção 4.1 do capítulo 4, acerca dos resultados, os semáforos inteligentes apresentam seu melhor desempenho em momentos de variação no volume e na direção do tráfego. Desta forma, quando o trânsito se torna saturado em todos os sentidos, um semáforo inteligente não terá um desempenho muito melhor do que um semáforo estático, mesmo se adequando a melhor condição de tráfego.

Sob este ponto de vista, é importante estudar outras maneiras de controlar o tráfego, além dos semáforos inteligentes. Um dos estudos avaliados para a continuidade deste trabalho é o de placas de trânsito inteligentes. Ele consiste em placas, de diversos tipos, que

sejam adequadas às condições do trânsito a cada momento. Estas placas poderiam sugerir caminhos com menor tráfego, permitir ou não o estacionamento em determinados locais e horários, proibir ou permitir conversões, entre diversos outros usos.

Evoluindo na mesma linha, os próprios veículos poderiam passar a fazer parte do sistema inteligente, interagindo com as estruturas fixas (semáforos, placas, entre outros), modificando suas rotas de acordo com as condições do trânsito e auxiliando, por exemplo, os semáforos a não ficar sobrecarregados, melhorando seu desempenho.

Uma análise que deve ser desenvolvida é a de emissão de poluentes gerados pelo tráfego. Embora esta análise não tenha sido feita neste trabalho, acredita-se que, devido ao menor tempo parado em congestionamentos e ao menor tempo de duração das viagens e, portanto, de funcionamento dos motores, a quantidade de poluentes emitidos pelos veículos que participaram da simulação tenha sido, de maneira bastante relevante, menor do que a quantidade de poluentes produzida no sistema original.

Esta análise deve ser realizada em breve, visto que o SUMO possui um mecanismo de geração de dados a respeito de alguns poluentes emitidos pelos veículos durante uma simulação. Em breve esta ferramenta deve ser estudada e seus dados analisados, com o objetivo de enriquecer os resultados produzidos pelo trabalho desenvolvido. Esta análise, porém, deve apresentar resultados ainda mais relevantes caso seja realizada depois que as demais melhorias propostas sejam desenvolvidas.

Por fim, lembrando a situação citada na seção 3.4.2 do capítulo 3, uma análise que também tornaria os resultados deste trabalho mais robustos e confiáveis seria a comparação entre a utilização dos dados de 24 horas de tráfego, como foi feito neste trabalho, e a utilização dos dados de apenas 12 horas de tráfego. Para realizar simulações de 24 horas de tráfego foi necessário gerar dados sintéticos para completar os cruzamentos que possuem dados de apenas 12 horas. Simulando apenas 12 horas de tráfego, poderiam ser utilizados apenas os dados reais fornecidos pela EPTC.

## REFERÊNCIAS

AGAFONOV, E.; BARGIELA, A.; BURKE, E.; PEYTCHEV, E. Mathematical justification of a heuristic for statistical correlation of real-life time series. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 1, p. 275–286, Outubro 2009.

AIMSUN. TSS - Transport Simulation Systems, 2015. Disponível em: <<http://www.aimsun.com>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

AZIZ, A.; UKKUSURI, H. M.; SATISH, V. Unified framework for dynamic traffic assignment and signal control with cell transmission model. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, p. 73–84, 2012.

BAKER, K. R. An experimental study of rolling schedules in production planning. **Decision Sci**, v. 8, p. 19-27, 1977.

BALAJI, P. G.; SRINIVASAN, D. Type-2 fuzzy logic based urban traffic management. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 24, p. 12–22, 2011.

BATISTA JR, A. A.; COUTINHO, L. R. A Multiagent System for Urban Traffic Control. **Anais do VII Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações**, 2013. 57-62.

BAZZAN, A. L. C. A Distributed Approach for Coordination of Traffic Signal Agents. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 10, p. 131–164, 2005.

BAZZAN, A. L. C. Opportunities for multiagent systems and multiagent reinforcement learning in traffic control. **Autonomous Agents and Multiagent Systems**, v. 18, n. 3, p. 342–375, 2009.

BAZZAN, A. L. C. Lessons learned from one decade of developing agent-based tools for traffic modeling, simulation, and control: how to make cities smarter. **VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação**, p. 67-72, 2012.

BAZZAN, A. L. C.; DE OLIVEIRA, D.; DA SILVA, B. C. Learning in groups of traffic signals. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, p. 560–568, 2010.

BITTENCOURT, G. Inteligência Artificial Distribuída. **Anais: I Workshop de Computação do ITA**, 1998.

BOILLOT, F.; BLOSSEVILLE, J.; LESORT, J.; MOTYKA, V.; PAPAGEORGGIOU, M.; SELLAM, S. Optimal signal control of urban traffic networks. In: **Proc. of Conference on Road Traffic Monitoring and Control**, p. 75–79, 1992.

BONET, B.; HANSEN, E. A. Heuristic Search for Planning under Uncertainty. In: DECHTER, R.; GEFNER, H.; HALPERN, J. Y. **Heuristics, Probability and Causality: A Tribute to Judea Pearl**. Reino Unido: College Publication, 2010. p. 3-22.

CASTELFRANCHI, C. **Modelling social action for AI agents**. Roma, Itália: Istituto di Psicologia del CNR - Unit of "AI, Cognitive Modelling & Interaction". 1998.

CHIOU, S. An efficient computation algorithm for area traffic control problem with link capacity expansions. **Applied Mathematics and Computation**, v. 188, n. 2, p. 1094–1102, Maio 2007.

CIPRIANI, E.; GORI, S.; PETRELLI, M. Transit network design: a procedure and an application to a large urban area. **Transportation Research Part C**, v. 20, n. 1, p. 2–14, 2012.

CITYTRAFFICSIMULATOR. CityTrafficSimulator | cszb.net - the Home of Christian Schulte zu Berge, 2015. Disponível em: <<http://www.cszb.net/>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

CONTE, R.; GILBERT, N. Computer simulation for social theory. In: CONTE, R.; GILBERT, N. **Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life**. London: UCL Press, 1995. p. 1-15.

DAGANZO, C. F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 28, n. 4, p. 269-287, 1994.

DAHAL, K.; ALMEJALLI, K.; HOSSAIN, M. A. Decision support for coordinated road traffic control actions. **Decision Support Systems**, v. 54, p. 962–975, 2013.

DAVIDSSON, P. Multi Agent Based Simulation: Beyond social simulation. In: MOSS, S.; AND DAVIDSSON, P. **Multi Agent Based Simulation**. [S.l.]: Springer Verlag LNCS series, 2000.

DE OLIVEIRA, L. B.; CAMPONOGARA, E. Multi-agent model predictive control of signaling split in urban traffic networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 18, n. 1, p. 120–139, 2010.

DENATRAN. Frota de veículos. **DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito**, 2013. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 12 Setembro 2013.

DIAKAKI, C.; PAPAGEORGIU, M.; ABOUDOLAS, K. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. **Control Engineering Practice**, v. 10, n. 2, p. 183–195, 2002.

DIETTERICH, T. Hierarchical reinforcement learning with the maxq value function decomposition. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 13, p. 227–303, 2000.

EPTC. Empresa Pública de Transportes e Circulação, 2015. Disponível em: <<http://www.eptc.com.br>>. Acesso em: 07 Janeiro 2015.

FARGES, J.; HENRY, J.; TUFAL, J. The PRODYN real-time traffic algorithm. In: **Proc. 4th IFAC Symposium of Transportation Systems**, p. 307–312, 1983.

FERBER, J. **Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence**. Great Britain: Addison Wesley, 1999.

GARTNER, N. Simulation study of OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. **Transportation and Traffic Theory**, p. 233–250, 1983.

GASSER, L. Social conceptions of knowledge and action: DAI foundations and open systems semantics. **Artificial intelligence**, v. 47, n. 1-3, p. 107-138 , 1991.

GNU. The GNU General Public License v3.0 - GNU Project - Free Software Foundation, 2007. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

GRAVES, D.; PEDRYCZ, W. Fuzzy prediction architecture using recurrent neural networks. **Neurocomputing**, v. 72, n. 7-9, p. 1668–1678, 2009.

HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D. The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique (Glasgow). **Traffic Engineering & Control**, v. 23, n. 4, p. 190–192, 1982.

JACOB, C.; ABDULHAI, B. Machine learning for multi-jurisdictional optimal traffic corridor control. **Transportation Research Part A**, v. 44, p. 53–64, 2010.

JENNINGS, N. R. On Agent-Base Software Engineering. **Artificial Intelligence**, v. 117, n. 2, p. 277–296, 2000.

KEYARSALAN, M.; MONTAZER, G. A. Designing an intelligent ontological system for traffic light control in isolated intersections. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 24, p. 1328–1339, 2011.

KEYVAN-EKBATANI, M.; PAPAGEORGIOU, M.; PAPAMICHAIL, I. Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental diagrams. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 33, p. 74–87, 2013.

KHAN, Z. H.; ALIN, T. S.; HUSSAIN, M. A. Price Prediction of Share Market using Artificial Neural Network (ANN). **International Journal of Computer Applications**, v. 22, n. 2, 2011.

KHOSRAVIFAR, B.; BENTAHAR, J.; MIZOUNI, R.; OTROK, H.; ALISHAHI, M.; THIRAN, P. Agent-based game-theoretic model for collaborative web services: Decision making analysis. **Expert Systems with Applications**, v. Vol. 40, n. 8, p. 3207–3219, 2013.

KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C.; OSSOSWSKI, S. Agents in traffic and transportation. **Transportation Research Part C - Emerging Technologies**, v. 18, n. 1, p. 69-70, 2010.

KOGA, M. L.; SILVA, V. F.; COZMAN, F. G.; COSTA, A. H. R. Speeding-up reinforcement learning through abstraction and transfer learning. **AAMAS - International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**, 2013. 119-126.

KONDRO, W. Big city blues: health disparities within the world's largest urban centres. **Canadian Medical Association Journal**, v. 182, n. 17, p. 1838-1839, 2010.

KRÓL, D.; MROZEK, M. Swarm-based Multi-agent Simulation: a Case Study of Urban Traffic Flow in the city of Wrocław. **International Conference on Computational Collective Intelligence Technologies and Applications**, 2011. 191–200.

KRAJZEWICZ, D.; BROCKFELD, E.; MIKAT, J.; RINGEL, J.; RÖSSEL, C.; TUCHSCHEERER, W.; WAGNER, P.; WÖSLER, R. Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO. **Proceedings of the 3rd Industrial Simulation Conference**, p. 299-302, 2005.

KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. **International Journal On Advances in Systems and Measurements**, v. 5, p. 128-138, 2012.

LEVINSON, D. Network structure and city size. **Plos One**, v. 7, n. 1, p. e29721, 2012.

LIN, S.; DE SCHUTTER, B.; XI, Y.; HELLENDORRN, H. Efficient network-wide model-based predictive control for urban traffic networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 24, p. 122–140, 2012.

LONG, J.; SZETO, W. Y.; HUANG, H. A bi-objective turning restriction design problem in urban road networks. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 2, p. 426–439, Setembro 2014.

LOWRIE, P. R. SCATS: the Sydney co-ordinated adaptive traffic system Principles, methodology, algorithms. In: **Proceedings of the IEE International Conference on Road Traffic Signalling**, p. 67–70, 1982.

LUCK, M.; MCBURNEY, P.; SHEHORY, O.; WILLMOTT, S. **Agent technology: computing as interaction (a roadmap for agent based computing)**. Liverpool, UK: AgentLink, 2005.

LYKOURENTZOU, I.; GIANNOUKOS, I.; NIKOLOPOULOS, V.; MPARDIS, G.; LOUMOS, V. Dropout prediction in e-learning courses through the combination of machine learning techniques. **Computers & Education**, v. 53, p. 950–965, 2009.

MAMIDI, S.; CHANG, Y.; MAHESWARAN, R. Improving building energy efficiency with a network of sensing, learning and prediction agents. In: CONITZER, et al. **Proceedings of the**

**11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Innovative Applications Track (AAMAS 2012)**. Valencia, Spain.: [s.n.], 2012.

MATSIM. Agent-Based Transport Simulations, 2012. Disponível em: <<http://www.matsim.org>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

MCGOVERN, E. **Autonomous discovery of temporal abstractions from interaction with an environment, Ph.D. Thesis**. Amherst: University of Massachusetts. 2002.

MCKENNEY, D.; WHITE, T. Distributed and adaptive traffic signal control within a realistic traffic simulation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, p. 574–583, 2013.

MIKAT, J.; BROCKFELD, E.; WAGNER, P. **Agent Based Traffic Signals on a basic grid**. Proceedings of the 4th Workshop on Agent-Based Simulation. Montpellier, França: SCS European Publishing House. 2003.

MIN, W. L.; WYNTER, L. Real-time road traffic prediction with spatio-temporal correlations. **Transportation Research Part C - Emerging Technologies**, v. 19, n. 4, p. 606-616, 2011.

MOSS, S.; DAVIDSSON, P. **Multi-Agent-Based Simulation**. 1979. ed. Berlin: Springer, 2001.

NUXOL, A. M.; LAIRD, J. E. Extending cognitive architecture with episodic memory. **Twenty-Second Conference on Artificial Intelligence (AAAI-07)**, v. 2, p. 1560–1565, 2007.

OLIVEIRA, D.; BAZZAN, A. L. C. Swarm Intelligence Applied to Traffic Lights Group Formation. **VI Encontro Nacional de Inteligência Artificial (ENIA 2007)**, 2007. 1003-1012.

OPENSTREETMAP. OpenStreetMap, 2015. Disponível em: <<http://wiki.openstreetmap.org>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

PEARL, J. **Heuristics: Intelligent search strategies for computer problem solving**. Reading, MA: Addison Wesley, 1984.

QUADSTONE PARAMICS. Quadstone Paramics | Traffic and Pedestrian Simulation, Analysis and Design Software, 2015. Disponível em: <<http://www.paramics-online.com/>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

ROBERTSON, D. I. **TRANSYT**: A traffic network study tool. Crowthorne, England: Road Research Laboratory, 1969.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence**: A Modern Approach. 3. ed. London: Prentice Hall, 2010.

SANTOS, A. R. **Metodologia Científica**: A construção de conhecimento. 3ª. ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2000.

SEN, S.; HEAD, K. Controlled optimization of phases at an intersection. **Transportation Science**, v. 31, n. 1, p. 5–17, 1997.

SHAMSHIRBAND, S. A. Distributed Approach for Coordination Between Traffic Lights Based on Game Theory. **The International Arab Journal of Information Technology**, 2012. 148–152.

SHIRAI, T.; KONAKA, Y.; YANO, J.; NISHIMURA, S.; KAGAWA, K.; MORITA, T.; NUMAO, M.; KURIHARA, S. Multi-agent traffic light control framework based on direct and indirect coordination. **Proceedings of the 7th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation**, 2012. 9–17.

SICHMAN, J. S.; DEMAZEAU, Y.; BOISSIER, O. When can knowledge-based systems be called agents? **Anais do IX Seminário Brasileiro de Inteligência Artificial**, p. 172-185, 1992.

SIDRA SOLUTIONS. Traffic Engineering | Network Analysis Software | INTERSECTION 6, 2015. Disponível em: <<http://www.sidrasolutions.com>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

SIEBERS, P. O.; AICKELIN, U. Introduction to multi-agent simulation. In: ADAM, F.; HUMPHREYS, P. **Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies**. Pennsylvania: Idea Group Publishing, 2008. p. 554-564.

SUBAGDJA, B.; WANG, W.; TAN, A.; TAN, Y.; TEOW, L. Memory formation, consolidation, and forgetting in learning agents. **AAMAS - International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**, 2012. 1007-1014.

SUMO. DLR - Institute of Transportation Systems - SUMO – Simulation of Urban MObility, 2015. Disponível em: <<http://www.dlr.de/ts/sumo/en>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

TAGHIZADEH, N.; BEIGY, H. A novel graphical approach to automatic abstraction in reinforcement learning. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 8, p. 821-835, 2013.

TAYLOR, M. E.; STONE, P. An Introduction to Intertask Transfer for Reinforcement Learning. **Ai Magazine**, v. 32, n. 1, p. 15-34, 2011.

TIWARY, A.; ROBINS, A.; NAMDEO, A.; BELL, M. Air flow and concentration fields at urban road intersections for improved understanding of personal exposure. **Environment International**, v. 37, p. 1005–1018, 2011.

TORREÃO, P. G. B. C. **Project Management Knowledge Learning Environment: Ambiente Inteligente de Aprendizado para Educação em Gerenciamento de Projetos**. Dissertação de Mestrado: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 2005.

TORREY, L.; TAYLOR, M. E. Teaching on a budget: agents advising agents in reinforcement learning. **AAMAS - International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**, 2013. 1053-1060.

TUYLS, K.; WEISS, G. Multiagent learning: basics, challenges, and prospects. **AI Magazine**, v. 33, n. 3, p. 41-52, 2012.

VASIRANI, M.; KLUGL, F.; CAMPONOGARA, E.; HATTORI, H. **Proceedings of the 7th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT), AAMAS 2012**. Valencia, Spain: [s.n.]. 2012.

VASIRANI, M.; OSSOWSKI, S. A Market-Inspired Approach for Intersection Management in Urban Road Traffic Networks. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 43, p. 621-659, 2012.

WALLER, S. T.; ZILIASKOPOULOS, A. K. A chance-constrained based stochastic dynamic traffic assignment model: analysis, formulation and solution algorithms. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 14, n. 6, p. 418–427, 2006.

WEISS, G. Multiagent systems: A modern introduction to distributed artificial intelligence. **MIT PRESS**, p. 25-77, 1999.

WERNZ, C.; DESHMUKH, A. Unifying temporal and organizational scales in multiscale decision-making. **European Journal of Operational Research**, v. 223, n. 3, p. 739–751, 2012.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2009.

WU, F.; ZILBERSTEIN, S.; CHEN, X. Online planning for multi-agent systems with bounded communication. **Artificial Intelligence**, v. 175, n. 2, p. 487–511, 2011.

WU, J.; ABBAS-TURKI, A.; EL MOUDNI, A. Cooperative driving: an ant colony system for autonomous intersection management. **Applied Intelligence**, v. 37, n. 2, p. 207-222, Settembre 2012.

WU, X.; LIU, H. X.; GETTMAN, D. Identification of oversaturated intersections using high-resolution traffic signal data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 18, n. 4, p. 626–638, 2010.

XIAO-FENG, X.; SMITH, S. F.; LU, L.; BARLOW, G. J. Schedule-driven intersection control. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 24, p. 168–189, 2012.

XIE, X.; BARLOW, G. J.; RUBINSTEIN, Z. B. Platoon-Based Self-Scheduling for Real-Time Traffic Signal Control. **IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, 2011. 879–884.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1. **Information Sciences**, v. 8, p. 199–249, 1975.

ZHAO, F.; ZENG, X. Optimization of user and operator cost for large scale transit networks. **Journal of Transportation Engineering**, v. 133, n. 4, p. 240–251, 2007.