

Simulação de controle adaptativo de tráfego urbano por meio de sistema multiagentes e com base em dados reais

Gilberto Dessbesell Jr.¹

Rejane Frozza¹

Rolf Fredi Molz¹

Resumo: A população urbana cresce rapidamente e a quantidade de veículos, mais rápido ainda. Esse crescimento satura a infraestrutura de transportes, gerando lentidão, congestionamentos e aumentando o tempo das viagens. Os engarrafamentos têm causado transtornos econômicos, sociais e ambientais. Com o aumento do tempo das viagens e da quantidade de veículos nas ruas, aumentam também a poluição sonora e do ar. Além disso, 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. 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 dos congestionamentos. Foi utilizado o simulador de tráfego urbano SUMO para realizar a simulação do tráfego de veículos em uma região de Porto Alegre, RS. Dados reais a respeito da programação dos semáforos e do volume de tráfego foram utilizados. Após, foi desenvolvido um semáforo inteligente, que utiliza uma heurística para tomar suas decisões e a simulação foi realizada novamente. O resultado das duas simulações foi, então, comparado e os resultados encontrados foram considerados de grande relevância.

Palavras-chave: Controle de tráfego urbano. Heurísticas para semáforos inteligentes. Simulação de tráfego urbano.

Abstract: *The urban population is growing quickly and the amount of vehicles grows even faster. All this growth saturates the transport infrastructure, causing delays, congestion and increasing travels time. Traffic jams have caused economic, social and environmental disorders to the population. With the rise of the travel time and the largest number of vehicles on the streets, also increase the noise and air pollution. Moreover, daily drivers face traffic stressful situations. Improvements in the traffic control systems have been proposed, but still much remains to be done. In this study the efficacy of the use of intelligent agents for the control of urban traffic in multi-agent simulation environment was evaluated, in order to reduce the negative effects caused mainly by congestion. Then, we used the urban traffic simulator SUMO to perform the simulation of vehicular traffic in a region of Porto Alegre, RS. Actual data were used about the programming of traffic lights and traffic volume. Then we developed an intelligent traffic light, which uses a heuristic to make its decisions and the simulation was performed again. The results of two simulations were then compared and the results were considered highly relevant.*

Keywords: *Heuristics for intelligent traffic lights. Urban traffic control. Urban traffic simulation.*

1 Introdução

A população urbana cresce rapidamente e a quantidade de pessoas que utiliza veículos próprios como meio de transporte cresce ainda mais, enquanto a de pessoas que utiliza o transporte público cresce a índices bem mais modestos. O crescimento do número de veículos faz com que a infraestrutura de transportes fique saturada rapidamente. Situação que se agrava devido ao tempo necessário para que obras de mobilidade urbana sejam realizadas. Isso faz com que o fluxo de veículos seja prejudicado, gerando lentidão, congestionamentos e

¹Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais, Unisc, Avenida Independência, 2293, Bairro Universitário–Santa Cruz do Sul (RS) - Brasil.

{gjunior@unisc.br, frozza@unisc.br, rolf@unisc.br}

aumentando o tempo que as pessoas passam dentro dos veículos diariamente. Os constantes engarrafamentos têm causado diversos transtornos econômicos, sociais e ambientais à população. Dentre os aspectos relacionados à mobilidade urbana, podem ser destacados os congestionamentos e o tempo de duração das viagens. Melhorias nos sistemas de controle de tráfego têm sido propostas, tais como: a aplicação de heurísticas nos processos de tomada de decisão e construção de modelos de controle. Mesmo assim, ainda há muito a ser feito nesse sentido.

Principalmente em grandes metrópoles, novas obras de infraestrutura que explorem espacialmente o uso do território podem apresentar 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. Nesses casos, faz-se necessário aplicar técnicas que visem aumentar a eficiência da infraestrutura já instalada. 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. Isso ocorre porque as estruturas residenciais podem facilmente se expandir de forma vertical, enquanto as estruturas de tráfego se expandem de forma mais limitada [1].

Com o aumento de tempo das viagens e a maior quantidade de veículos nas ruas, também aumenta a poluição sonora e do ar. Segundo [2], mesmo com a evolução da tecnologia, o tráfego de veículos ainda é o maior responsável pela emissão de poluentes em centros urbanos. Os autores constatarem ainda, que o maior índice de emissão de poluentes é verificado no momento em que os carros estão parados e arrancam. Situação que ocorre com muita frequência em congestionamentos. Diariamente, os condutores enfrentam situações de estresse no trânsito. Para [3], o aumento da quantidade de veículos é necessário para atender às necessidades da população. Porém, isso também resulta na ocorrência de mais casos de estresse e doenças mentais, causados pelo tempo gasto nos deslocamentos, afetando diretamente a qualidade de vida e a saúde dos condutores.

Atualmente, as autoridades de tráfego basicamente reagem às situações que ocorrem diariamente, buscando maneiras de tratá-las somente depois que já ocorreram e causaram transtornos. Isso ocorre, pois essas autoridades não conseguem identificar possíveis problemas com antecedência. Para um controle mais efetivo e inteligente do 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 [4].

Segundo [5], agentes são tomadores de decisão natos, que guiam suas ações da maneira que julgam mais adequadas para atingir seus objetivos. Sistemas multiagentes (SMA), são compostos por vários agentes que interagem entre si para atingir objetivos individuais e compartilhados. Como o conhecimento e a capacidade operacional dos agentes são limitados, muitas vezes eles precisam interagir para alcançar seus objetivos. Para [6], SMA são capazes de representar o comportamento dos participantes de um sistema de tráfego, possibilitando entender e especificar esses participantes, reproduzindo seu comportamento e sua tomada de decisão. Na área de coordenação e controle adaptativo de tráfego, os SMA são capazes de promover a utilização eficaz da infraestrutura instalada. Além disso, nota-se a utilização de SMA em pesquisas relacionadas aos problemas complexos de tráfego, indicando um caminho interessante para as pesquisas na área.

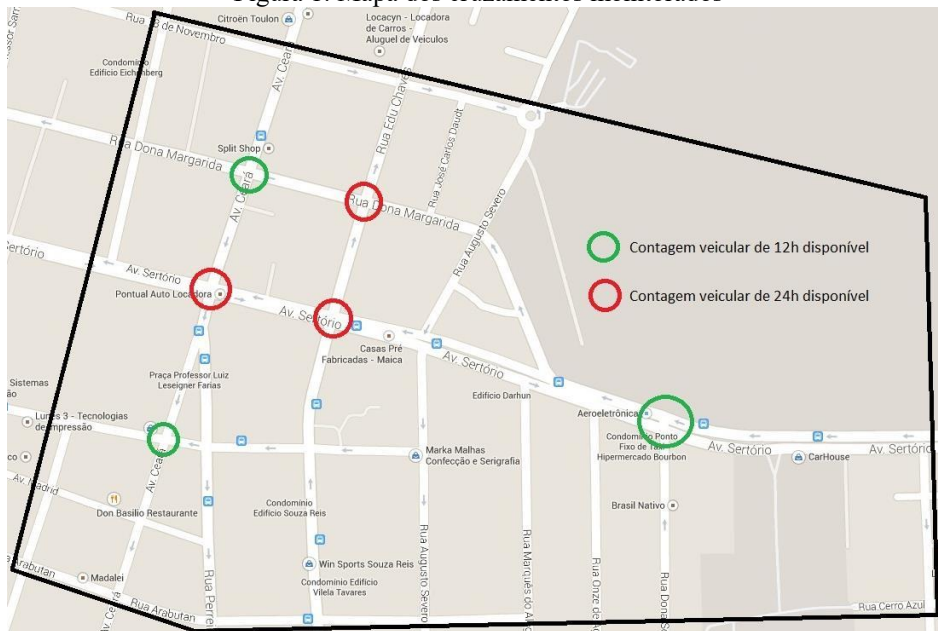
Porém, [7] alertam que o processo de tomada de decisão é complexo, já que pode envolver muitos fatores, principalmente quando engloba objetivos de diferentes níveis hierárquicos e, por consequência, de curto e longo prazo. O desafio é alinhar esses objetivos e coordenar os agentes dos diversos níveis hierárquicos, para que tomem as decisões da maneira mais eficiente possível.

Este estudo verifica, por meio 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 das políticas de gerenciamento de tráfego, a fim de reduzir os efeitos negativos, sendo eles sociais, econômicos e ambientais, causados pelos congestionamentos. O capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 2 descreve a metodologia empregada e os procedimentos realizados neste trabalho. No capítulo 3, são apresentados os resultados da pesquisa, com descrição das análises realizadas a partir dos dados gerados nas simulações. Por fim, é apresentada a conclusão dos autores.

2 Metodologia

Com o objetivo de dar maior fidelidade aos dados utilizados 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, este projeto foi apresentado e a entidade se dispôs a fornecer alguns dados a respeito do tráfego de Porto Alegre.

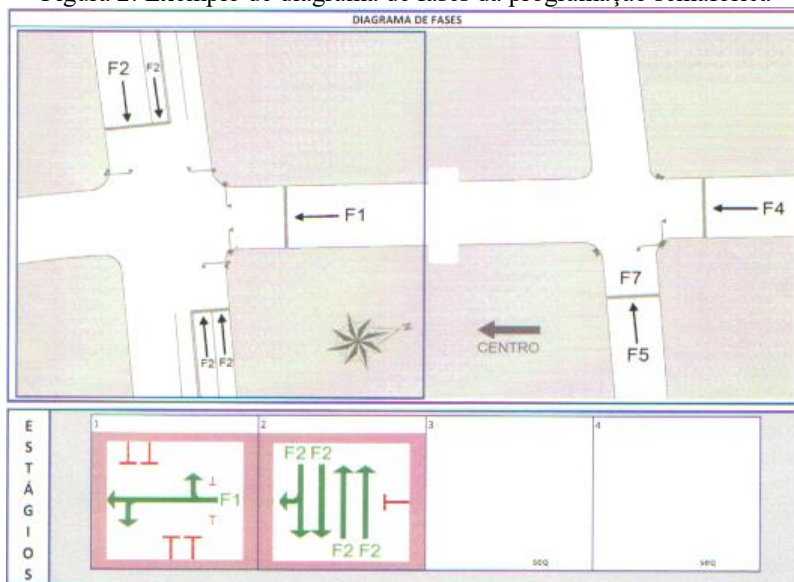
Figura 1: Mapa dos cruzamentos monitorados



Para cada um dos cruzamentos citados anteriormente e ilustrados na Figura 1, foi fornecida a respectiva programação semafórica, que contém 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 2) apresenta o cruzamento de que trata o documento. São exibidos os sentidos de fluxo dos veículos, e identificados os fluxos controlados por cada uma das fases do semáforo.

Figura 2: Exemplo de diagrama de fases da programação semafórica



O bloco dos planos de programação semafórica é o mais extenso e de maior relevância. Para cada cruzamento, são apresentados dez planos de programação que são utilizados apenas durante a semana, um que é utilizado durante a semana e aos finais de semana e outros dois, utilizados somente aos finais de semana.

Cada um desses planos apresenta as fases do conjunto de semáforos de um cruzamento. Cada fase apresenta o conjunto de estados dos semáforos, que indica qual cor cada semáforo deve exibir em determinado momento e por quanto tempo. A execução das fases ao longo do tempo de ciclo do programa resulta na coordenação entre os sinais vermelho, amarelo e verde que são exibidos pelos semáforos.

Figura 3: Exemplo de plano de programação semafórica

A)

Plano 01				
Intervalos	1	2	3	4
Fase 01	V	A	R	R
Fase 02	R	R	V	A
Tempo	35	4	27	4

B)

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

Como pode ser visto na Figura 3, letra B, nos planos fornecidos pela EPTC sempre existem dois estados (3 e 6) em que o semáforo fica vermelho em todos os sentidos. Isso ocorre para garantir que o cruzamento fique vazio antes que o sentido oposto de tráfego receba o sinal verde. Porém, como no simulador utilizado os carros nunca passam por um cruzamento quando o semáforo está no sinal amarelo, os planos fornecidos pela EPTC foram adaptados. É possível perceber que os intervalos 3 e 6 (Figura 3, letra B) deixaram de existir e foram incorporados pelos intervalos 2 e 4 (Figura 3, letra A).

Por fim, cada documento de programação semafórica tem a sua tabela de horários (Tabela). Essa tabela indica em quais dias da semana e em quais horários do dia cada um dos planos de programação semafórica devem ser utilizados. Na Tabela , pode-se verificar que o Plano 01 tem duração de 70 segundos e é utilizado de segunda à sexta-feira, sempre às 4 horas da manhã. Já o Plano 02 tem duração de 90 segundos e é utilizado durante a semana toda, sempre às 22 horas. Por fim, o Plano 03 tem duração de 40 segundos e é utilizado somente aos finais de semana, às 9 horas da manhã. A EPTC também forneceu 6 planilhas eletrônicas contendo dados a respeito do volume de tráfego em cada um dos cruzamentos apresentados na Figura 1. Cada uma das planilhas contém dados referentes a um dos cruzamentos.

Tabela 1: Exemplo de tabela de horários

Plano	Tempo	Dias							Horário
Plano 01	70		S	T	Q	Q	S		04:00:00
Plano 02	90	D	S	T	Q	Q	S	S	22:00:00
Plano 03	40	D						S	09:00:00

Tabela 2: Exemplo de tabulação de contagem de veículos

Intervalos	Fluxo1				Fluxo2				Fluxo3				Fluxo4			
	VL	VM	VP	MT	VL	VM	VP	MT	VL	VM	VP	MT	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

Cada planilha apresenta a contagem de veículos do cruzamento que se refere, subdividida conforme apresentado na

Tabela 2. Os dados foram registrados em intervalos de quinze minutos, para cada um dos fluxos do diagrama de fases (Figura 2) e ainda, subdivididos por tipo de veículo. Além das motocicletas (MT), os veículos são classificados como leves (VL): automóveis, utilitários e camionetas; médios (VM): caminhonetes, vans e micro-ônibus; e como pesados (VP): ônibus, caminhão, caminhão-trator, reboque e semirreboque.

2.1 Definição do ambiente de simulação

Durante a etapa de estudo de trabalhos relacionados, diversos sistemas de simulação de tráfego foram analisados. Os sistemas que despertaram maior interesse foram: Aimsun [8], CityTrafficSimulator [9], MATSim [10], SIDRA INTERSECTION 6 [11], QuadstoneParamics [12] e SUMO [13]. Em seguida, ao analisar os sistemas citados, a lista se reduziu aos sistemas MATSim e SUMO. Os demais foram descartados por um ou mais motivos: i) disponibilizar apenas 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.

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 por utilizar o SUMO, julgando que o esforço necessário para realizar o mapeamento das vias e a sua construção no MATSim seria muito maior.

SUMO é um sistema de simulação de tráfego rodoviário de código aberto, licenciado sob a licença GPL [14] e mantido por funcionários do Instituto de Sistemas de Transporte do Centro Aeroespacial Alemão. A publicação mais recente a respeito do que está sendo desenvolvido com SUMO pode ser encontrada em [15]. Dentre as principais características do sistema podem ser destacadas a capacidade de representar semáforos simples ou com programação semaforica, de importar mapas de diversas fontes externas e de permitir tanto a representação de veículos de passeio como de transporte público e de pedestres. 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, 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 e; iii) a simulação, em que juntam-se as partes anteriores.

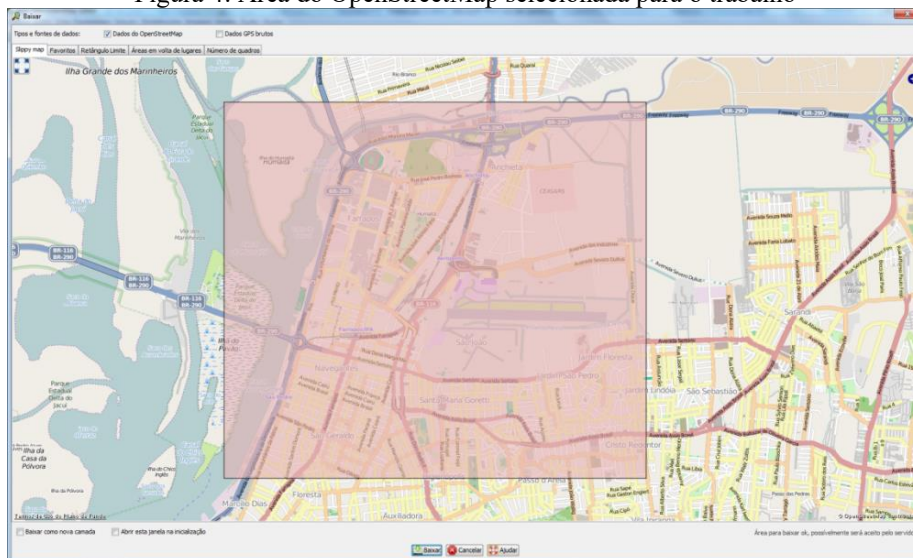
2.2 Simulação de tráfego urbano

O projeto OpenStreetMap [16] 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.

O projeto apresenta um mapa do mundo inteiro. O mapa contém 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 por aplicativos navegadores GPS.

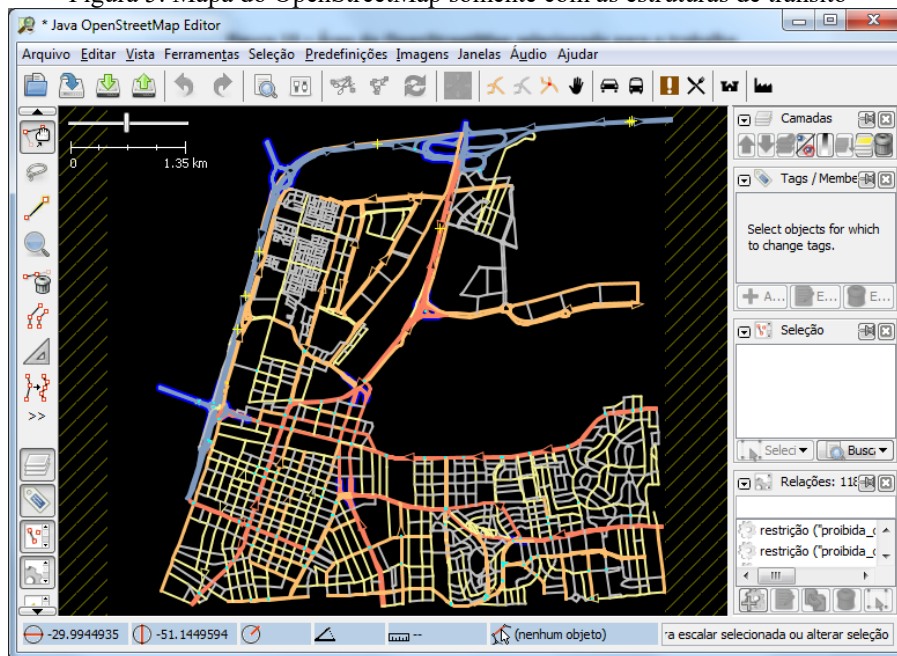
Áreas do mapa podem ser baixadas em formato OSM XML. Não é objetivo deste trabalho detalhar o formato OSM XML, mas mais detalhes podem ser encontrados na página do projeto OpenStreetMap. Neste trabalho, foi utilizada uma área do mapa (Figura 4) como base para a construção da malha viária no SUMO.

Figura 4: Área do OpenStreetMap selecionada para o trabalho



Por meio da ferramenta JOSM (Java OpenStreetMap Editor) [16], a área desejada foi selecionada e o comando "Baixar" foi acionado para salvar um arquivo no formato OSM XML. Em seguida, ao abrir o arquivo 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. Essas estruturas foram removidas do mapa, deixando-o conforme mostra a Figura 5, somente com as estruturas de trânsito necessárias para a simulação.

Figura 5: Mapa do OpenStreetMap somente com as estruturas de trânsito



NetConvert é uma ferramenta distribuída junto com o SUMO. Sua função é converter mapas de fontes diversas em arquivos de malha viária para o SUMO. Neste trabalho, o arquivo gerado no OpenStreetMap foi submetido à ferramenta e deu origem ao arquivo que foi utilizado como malha viária nas simulações realizadas. Ao converter um arquivo OSM em net.xml, todos os semáforos existentes no arquivo OSM foram mantidos. A Figura 6 mostra um exemplo de representação de semáforo no arquivo net.xml. Comparando essa figura com a Figura 3, letra A, é possível identificar como as fases e os intervalos citados foram representados.

Figura 6: 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>
```



Um semáforo representado de acordo com a Figura 6, se comportaria da mesma maneira durante todo o período de uma simulação. Porém, a EPTC utiliza diversos planos de programação para cada semáforo. Para representar esses planos de programação fornecidos pela EPTC, foi necessário criar um arquivo adicional. Foi utilizada uma estrutura chamada WAUT [13]. Para uma visão completa a respeito da estrutura e de suas propriedades, consulte a seção Simulation/TrafficLights do manual de usuário do SUMO.

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 foram agrupados, em intervalos de quinze minutos, em uma única planilha chamada de "Dados sintéticos". Foi então necessário realizar uma adequação na planilha "Dados sintéticos", visto que alguns cruzamentos têm contagem veicular de 12 horas, enquanto outros de 24 horas. Nos cruzamentos com contagem de 12 horas, a contagem foi realizada das 7 horas até às 19 horas. A adequação foi realizada apenas nos cruzamentos que tinham contagem de 12 horas. Para cada cruzamento com contagem de 12 horas, foi escolhido um cruzamento próximo com contagem de 24 horas. A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para calcular os valores faltantes.

Tabela 3: 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
06:45 – 07:00	A	E			B	2	4	6		A			9	B	1	4
07:00 – 07:15	D	2	3	4	C	4	6	5	12	D	3	1	6	C	2	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19:45 – 20:00	6	2	D	6	1	4	C	1	1	6	4	D	12	1	7	C
20:00 – 20:15			A		2	5	B	2				A	3	4	2	B

A fórmula utilizada para realizar o cálculo dos novos valores foi: $A = (B/C) * D$. Sendo que B, C e D eram conhecidos. O cálculo foi repetido para todos os tipos de veículos, para cada faixa de 15 minutos. Primeiro das 7 horas à meia-noite, de maneira decrescente e depois das 20 horas à meia-noite, de maneira crescente. A Figura 7 apresenta a distribuição de tipos de veículos realizada para o turno da manhã. Foi realizada uma distribuição de tipo de veículos para cada turno, devido à composição do tráfego. Pode-se notar que cada tipo de veículo possui uma probabilidade (probability). Os valores apresentados são utilizados sempre que um veículo deve ser criado, para definir a probabilidade de cada tipo de veículo ser o selecionado.

Figura 7: 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>
```

Uma das opções para modelar tráfego no SUMO é utilizar as matrizes de origem e destino [13]. Essas 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, com a quantidade de veículos que trafega das origens para os destinos. Para criar a estrutura TAZ deste trabalho, o mapa utilizado foi dividido em dez setores (Figura 8). Esses setores representam as principais vias de acesso aos cruzamentos analisados. Para cada um dos setores foram definidos pontos de partida e de chegada, prioridade para as vias principais. Depois de realizar o mapeamento dos setores, foram construídas as matrizes de origem e destino. Como o próprio nome já diz, o principal elemento dessa estrutura é uma matriz, porém existem outros elementos que também fazem parte.

Figura 8: Setores utilizados para a estrutura TAZ



Como pode ser visto na Figura 9, 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 9: 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	

As linhas que começam com "*" são o título da informação da linha seguinte. No exemplo, foi utilizado o tipo de distribuição de veículos (vehicletype) "typedist_00_06". Esse tipo está relacionado ao período de tráfego descrito. No exemplo apresentado, foi modelado o tráfego entre meia-noite e 6 horas da manhã.

Como citado anteriormente, na Figura 8, foram criados 10 setores no mapa utilizado no trabalho. O número de distritos (Districtnumber) é seguido pelos nomes (names) dos distritos. Após os nomes, começa a matriz de origem e destino. 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. Dessa maneira, é possível perceber que entre a meia-noite e as 6 horas da manhã, devem partir 22 veículos do setor 1 com destino ao setor 7. Além disso, esses veículos devem seguir o tipo "typedist_00_06". Este trabalho utilizou quatro arquivos, no formato descrito na Figura 9, sendo um para cada turno do dia (madrugada, manhã, tarde e noite).

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 e de matrizes de origem e destino foram submetidos à ferramenta, dando origem a um arquivo de viagens, no formato trips.xml. Em seguida, foi utilizada a ferramenta DUAROUTER, também distribuída junto com o SUMO. Sua função é criar rotas para as viagens (trips). Neste trabalho, os arquivos de malha viária, no formato net.xml, e de viagens, no formato trips.xml, foram submetidos à ferramenta, dando origem a um arquivo de rotas, no formato rou.xml.

Para a geração dos dados para análise, foram realizadas cinco simulações, por meio da ferramenta de simulação por linha de comando (sumo.exe) e utilizando os arquivos citados até aqui, com cada um dos modelos de controle de tráfego: o atual e o proposto, controlado por agentes. Cada execução simulou um dia (24 horas) de tráfego no SUMO, com início à meia-noite e término às 23 horas e 59 minutos, da região de Porto Alegre destacada na Figura 4, e de acordo com os dados de volume de tráfego fornecidos pela EPTC para a região. Para a análise dos dados, foi utilizada a média simples das cinco simulações realizadas com cada cenário.

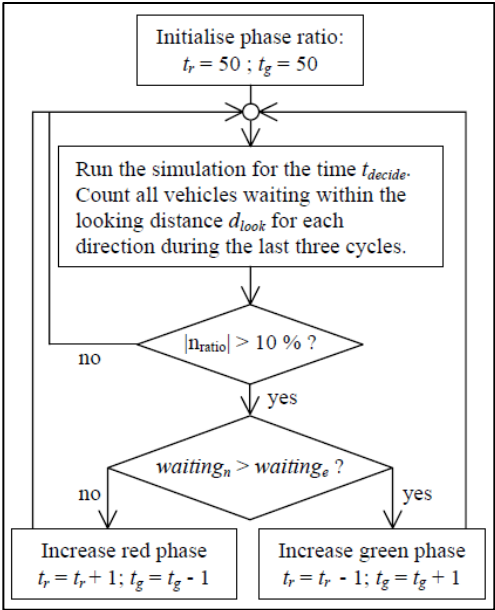
Cada veículo que participou da simulação gerou um conjunto de dados a respeito da viagem que realizou. Esses dados foram armazenados em estruturas chamadas "Tripinfo". Para uma visão completa a respeito da estrutura "Tripinfo", consulte a seção Simulation/Output/TripInfo do manual de usuário do SUMO. 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 oportunidades de trabalhos futuros.

2.3 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. Nesse 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. Mais detalhes a respeito dos tipos de semáforo existentes podem ser encontrados na seção Simulation/Traffic Lights, 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", que não consta na documentação oficial da ferramenta. Analisando e pesquisando a respeito, foram encontrados artigos referenciando o tipo "AgentBased". O artigo de [17] apresenta um estudo com o objetivo de melhorar o desempenho de semáforos utilizando agentes inteligentes. A simulação foi realizada em um ambiente fictício, com malha viária e volume de tráfego controlados e simplificados. No artigo, os autores propõem um algoritmo para o controle dos semáforos inteligentes, apresentado na Figura 10.

Figura 10: Algoritmo para controle de semáforos inteligentes



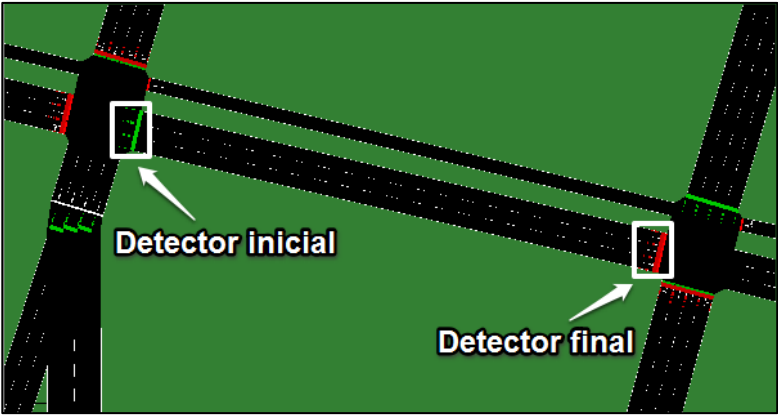
Este algoritmo avalia a quantidade de veículos trafegando em cada sentido de um cruzamento e ajusta os tempos de sinal verde e vermelho, em variações de 1 segundo. Para maiores detalhes a respeito de características e do funcionamento do algoritmo, consulte o artigo citado. Posteriormente, [18] basearam-se no algoritmo proposto por [17] 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, dessa 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 então criada no SUMO.

Em [17] concluiu-se que nas condições controladas em que as simulações foram realizadas, o desempenho dos semáforos inteligentes foi melhor do que o dos semáforos estáticos. Já em [18], concluiu-se 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.

Frente aos resultados encontrados nos artigos citados, optou-se por desenvolver um novo tipo de semáforo, o qual foi chamado de "AgentBased2". Ao utilizar um semáforo do tipo "AgentBased2" no SUMO, serão automaticamente criados detectores de tráfego nas pistas que dão acesso ao semáforo em questão. Como pode ser visto na Figura 11, 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 11: Exemplo de detectores utilizados em semáforos AgentBased2



Esses detectores são os sensores dos agentes utilizados neste trabalho. É por meio 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 nessas 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 11, esses detectores são colocados no começo e no final do trajeto que se deseja monitorar. Dessa 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.

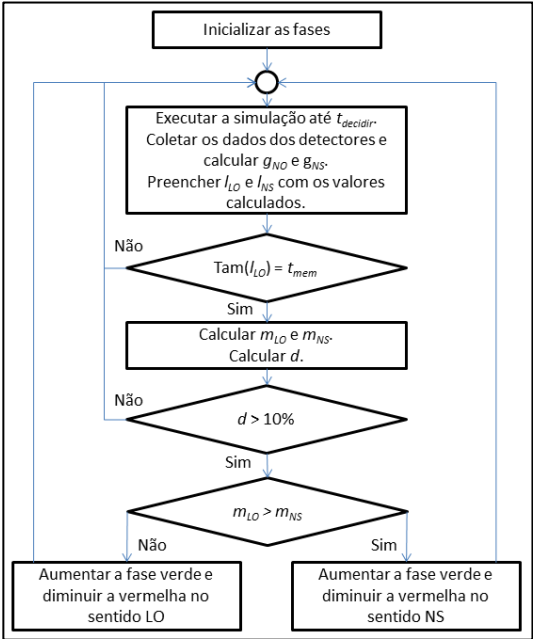
Os detectores E3 foram selecionados com o objetivo de calcular o tempo que os veículos levam para percorrer o percurso coberto pelo detector. Essa informação foi utilizada para avaliar o desempenho da via em que o detector está instalado. No momento em que cada detector é criado, ele avalia a sua posição e classifica-se como sendo um detector do tipo Leste/Oeste (LO) ou Norte/Sul (NS). É com base nessa classificação que o semáforo sabe se dois detectores controlam o fluxo de tráfego em direções iguais ou diferentes.

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 por meio de alterações no ambiente e não por intermédio 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 tem apenas um nível hierárquico, visto que nenhum dos agentes tem influência direta 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.

Com base nos trabalhos de [17] e [18], 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 12 apresenta o algoritmo desenvolvido e utilizado neste trabalho, que é descrito a seguir.

Figura 12: Algoritmo para controle de semáforos inteligentes utilizado no trabalho



Todo semáforo "AgentBased2" realiza a avaliação do tráfego que passou pelo cruzamento que ele controla e realiza as adequações que julgar necessárias. Esta avaliação ocorre sempre que um ciclo do semáforo é concluído ($t_{decidir}$). Um ciclo é caracterizado pela passagem do semáforo por todos os intervalos de tempo e 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 ($i_{eficiência}$). Esse 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, é necessário compreender a estrutura dos detectores E3. Sempre que um veículo entra em um detector, o veículo é adicionado a uma lista de entradas. Posteriormente, ao sair do detector, 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. Esse 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, esse valor é dividido pelo mesmo tempo mínimo. O objetivo é gerar um índice ($i_{eficiência}$) que represente o quão próximo do tempo mínimo necessário para cruzar o detector estão os veículos que passaram por ele. Quanto menor for este índice, mais 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 tem uma lista de detectores, cada um com sua representação de sentido (LO ou NS) e com seu tempo de índice calculado. 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. Existem dois sentidos opostos (LO e NS), cada um com o índice (g_{LO} e g_{NS}) que representa o seu tráfego.

Cada sentido tem uma lista (l_{LO} e l_{NS}), de tamanho t_{mem} , neste trabalho, definido em3. Essas 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 essa posição, retornando à posição 1 e sobrescrevendo o valor que constava nessa posição. Dessa 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. Para realizar

essa avaliação, é calculada a média dos valores de cada lista, gerando o índice médio de cada sentido (m_{LO} e m_{NS}). Este é o valor que será utilizado, para cada sentido, para avaliar a necessidade de alteração dos semáforos.

Essa média foi estipulada para reduzir os ruídos causados por trânsito ocasional em algum dos sentidos. Imagine que um cruzamento tem trânsito intenso no sentido LO e nenhum trânsito no sentido NS. Após algum tempo nessa 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 esses ruídos. Caso o sentido NS não tenha tido tráfego nos dois ciclos anteriores e, portanto, tenha os valores 1 e 1 em l_{NS} , caso o índice do terceiro ciclo seja de apenas 0,1, l_{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.

Caso algum detector em um sentido "A" não tenha tráfego durante um ciclo, é atribuído a ele o maior índice possível, 1. Esse comportamento foi adotado para garantir que o outro sentido ("B"), caso apresente tráfego, tenha um índice menor do que "A". Assim, um sentido que tem tráfego, por menor que seja, é sempre priorizado em relação a um sentido que não tenha tráfego algum. Esse índice médio é o método de avaliação dos congestionamentos adotado neste trabalho. Os trabalhos de [17] e [18] utilizaram o tamanho das filas formadas pelos congestionamentos como método de avaliação. Optou-se por utilizar esse método 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 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 neste trabalho, 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. Nesse caso, independente do tamanho do congestionamento, o sentido que estiver desempenhando a menor velocidade média terá seu tempo de sinal verde aumentado, para que a média de velocidade também 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 semafórico 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 semafórico é ajustado.

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

A primeira restrição é que os intervalos do plano semafórico nunca podem ficar com seu tempo de sinal vermelho inferior a 8 segundos. A outra restrição é que os intervalos do plano semafórico 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.

Essas 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. Essas restrições podem, porém, alterar o tempo total do ciclo do semáforo. Essa condição foi considerada aceitável, pois essa prática é utilizada, inclusive, nos planos semafóricos fornecidos pela EPTC, para adequar os intervalos do semáforo ao volume de tráfego em determinados momentos do dia.

Após realizar a implementação do comportamento descrito, a simulação foi realizada novamente, porém, com as adequações necessárias à utilização dos semáforos inteligentes. Inicialmente apenas o programa "02" de cada semáforo foi mantido, sendo todos os outros programas removidos. Em seguida, o tipo (type) do programa restante foi alterado de "static" para "agentbased2", transformando o semáforo em um semáforo inteligente.

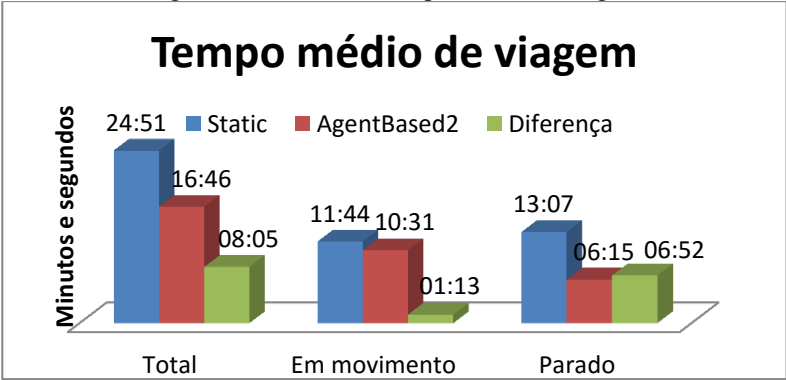
Através da ferramenta de simulação por linha de comando (sumo.exe) foi então realizada uma nova simulação, nos mesmos moldes da anterior, porém, agora, com a utilização dos semáforos inteligentes.

3 Resultados

A partir das duas simulações, foram realizadas análises dos dados de tráfego gerados. Os dados foram adicionados a uma planilha, sendo classificados como "Static" e "AgentBased2". Os principais dados utilizados 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). 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 13 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 desses três casos, a soma do tempo em movimento com o tempo parado resulta no tempo total.

Figura 13: Gráfico do tempo médio de viagem



A Figura 13 exibe uma redução de 8 minutos e 5 segundos no tempo médio das viagens realizadas na simulação em que foram utilizados 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 que os veículos permaneciam parados no trânsito. Isso representa mais da metade (52,31%) do tempo total parado na primeira simulação. Atribui-se essa redução ao melhor gerenciamento dos semáforos, pois o principal objetivo dos agentes inteligentes foi o de maximizar o fluxo de veículos. Com o aumento do fluxo de veículos, o tempo parado diminuiu.

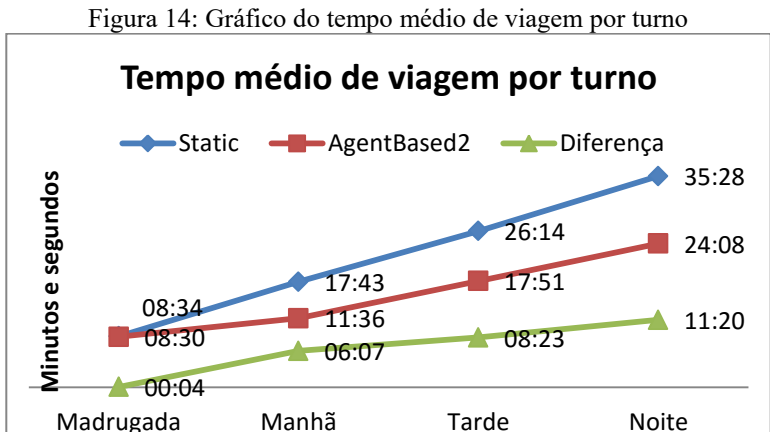
Já 1 minuto e 13 segundos foram reduzidos do tempo que os veículos estão em movimento. Atribui-se esta redução à maior velocidade média desempenhada durante as viagens, visto que menos paradas em semáforos e congestionamentos foram realizadas. É possível chegar a esta conclusão constatando que, nas duas simulações, as viagens realizadas foram as mesmas. Dessa 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. Para realizar a análise apresentada na Figura 14, a hora inicial das viagens foi utilizada para a criação dos turnos. Os turnos considerados foram: madrugada, entre 0 e 6 horas; manhã, entre 6 e 12 horas; tarde, entre 12 e 18 horas; e noite, entre 18 e 0 hora. A hora final sempre foi utilizada de maneira exclusiva, ou seja, até os 59 minutos e 59 segundos da hora anterior.

Na Figura 14, 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 nessa análise foi na comparação entre os turnos da manhã, das duas simulações.

Os semáforos inteligentes conseguiram reduzir o tempo médio das viagens nesse turno em 34,56%, resultado acima da média geral de 32,53%.

Atribui-se tal desempenho ao fato desse ser o turno em que começam a se formar os congestionamentos. Nesse 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, ocorrendo somente quando o trânsito se torna muito saturado. Essa constatação também foi percebida por [18], ao realizar testes com o tipo de semáforo "AgentBased". Conforme os autores, esse 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.



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.

4 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 a 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 esse que afeta, ao mesmo tempo, as esferas social, ao proporcionar maior qualidade de vida ao motorista e menor tempo de exposição ao estresse 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 trafegando em velocidades maiores, gerando menos poluição.

Um dos principais problemas que ainda pode ser verificado nos semáforos inteligentes propostos é o fato deles operarem de forma individual. Por causa disso, cruzamentos subsequentes acabam reduzindo o desempenho de seus vizinhos, causando uma diminuição relevante ao desempenho do tráfego. Outro ponto que merece ser explorado é a arquitetura dos agentes. Atualmente, os agentes são do tipo reativo. Agentes cognitivos poderiam adquirir conhecimento a respeito do tráfego e construir novas e melhores soluções de controle.

É importante, ainda, 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. Essas 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.

É importante ressaltar que esse estudo foi conduzido em caráter experimental e em ambiente de simulação computacional, como forma de validação de uma hipótese. Dessa forma, sua aplicação prática passa pela

construção dos mecanismos lógicos e físicos necessários e pela condução de testes práticos que validem o modelo proposto. Estima-se que a aplicação prática do modelo demande a construção de controladores (semáforos) que contenham a lógica apresentada na Figura 12 embarcada em seus sistemas de controle. Além disso, sensores ou radares terão que ser instalados nas vias e interligados aos semáforos, para que realizem a coleta de dados do tráfego. Outra opção seria utilizar semáforos e sensores de maneira independente, porém interligados a um sistema computacional que implemente a lógica de controle proposta.

Agradecimentos

Agradecimento especial à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

Referências

- [1] LEVINSON, D. Network structure and city size. *Plos One*, Web, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2012.
- [2] TIWARY, A. et al. Air flow and concentration fields at urban road intersections for improved understanding of personal exposure. *Environment International*, Web, v. 37, n. 5, p. 1005–1018, 2011.
- [3] KONDRO, W. Big city blues: health disparities within the world's largest urban centres. *Canadian Medical Association Journal*, Ottawa, v. 182, n. 17, p. 1838-1839, 2010.
- [4] 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. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*. São Paulo, Brasil: [s.n.]. 2012. p. 67-72.
- [5] KHOSRAVIFAR, B. et al. Agent-based game-theoretic model for collaborative web services: Decision making analysis. *Expert Systems with Applications*, Web, v. Vol. 40, n. 8, p. 3207–3219, 2013.
- [6] KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C.; OSSOSWSKI, S. Agents in traffic and transportation. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, Web, v. 18, n. 1, p. 69-70, 2010.
- [7] WERNZ, C.; DESHMUKH, A. Unifying temporal and organizational scales in multiscale decision-making. *European Journal of Operational Research*, Web, v. 223, n. 3, p. 739–751, 2012.
- [8] AIMSUN. TSS - Transport Simulation Systems, 2015. Disponível em: <<http://www.aimsun.com>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.
- [9] CITYTRAFFICSIMULATOR. CityTrafficSimulator | cszb.net - the Home of Christian Schulte zu Berge, 2015. Disponível em: <<http://www.cszb.net/>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.
- [10] MATSIM. Agent-Based Transport Simulations, 2012. Disponível em: <<http://www.matsim.org>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.
- [11] SIDRA SOLUTIONS. Traffic Engineering | Network Analysis Software | INTERSECTION 6, 2015. Disponível em: <<http://www.sidrasolutions.com>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] KRAJZEWICZ, D. et al. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, Web, v. 5, n. 3 & 4, p. 128-138, 2012.
- [16] OPENSTREETMAP. OpenStreetMap, 2015. Disponível em: <<http://wiki.openstreetmap.org>>. Acesso em: 10 janeiro 2015.

- [17] 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. p. 51-56.
- [18] KRAJZEWICZ, D. et al. Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO. Proceedings of the 3rd Industrial Simulation Conference. Berlin, Germany: ACTA Press. 2005. p. 299-302.