

Simulação de multidões e planejamento probabilístico para otimização dos tempos de semáforos

Renato S. P. Coelho

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Renato S. P. Coelho e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 2 de março de 2012.

Siome Klein Goldenstein (Orientador)

Jacques Wainer (Co-orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
MARIA FABIANA BEZERRA MULLER - CRB8/6162
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E
COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA - UNICAMP

C65s Coelho, Renato Schattan Pereira, 1987-
Simulação de multidões e planejamento probabilístico para
otimização dos tempos de semáforos / Renato Schattan Pereira
Coelho. – Campinas, SP : [s.n.], 2012.

Orientador: Siome Klein Goldenstein.
Coorientador: Jacques Wainer.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Computação.

1. Inteligência artificial. 2. Multidões - Simulação por
computador. 3. Probabilidades - Planejamento. 4. Semáforo. 5.
Trânsito - Fluxo. I. Goldenstein, Siome Klein, 1972-. II. Wainer,
Jacques, 1958-. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de
Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Crowd simulation and probabilistic planning for traffic light optimization

Palavras-chave em inglês:

Artificial Intelligence
Crowd - Computer simulation
Probabilities - Planning
Road signs
Traffic flow

Área de concentração: Ciência da Computação

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora:

Siome Klein Goldenstein [Orientador]
Ana Lucia Cetertich Bazzan
Ariadne Maria Brito Rizzoni Carvalho

Data de defesa: 02-03-2012

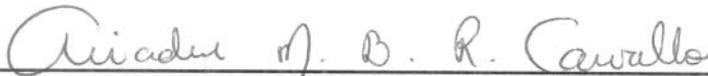
Programa de Pós-Graduação: Ciência da Computação

TERMO DE APROVAÇÃO

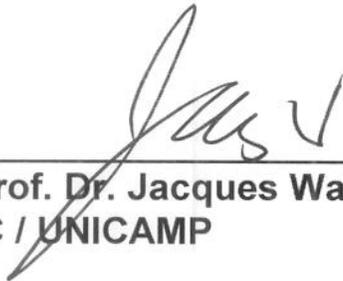
Dissertação Defendida e Aprovada em 02 de Março de 2012, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Profª. Drª. Ana Lucia Cetertich Bazzan
I. INFORMÁTICA / UFRGS



Profª. Drª. Ariadne Mª. Brito Rizzoni Carvalho
IC / UNICAMP



Prof. Dr. Jacques Wainer
IC / UNICAMP

Simulação de multidões e planejamento probabilístico para otimização dos tempos de semáforos

Renato S. P. Coelho¹

2 de março de 2012

Banca Examinadora:

- Siome Klein Goldenstein (Orientador)
- Jacques Wainer (Co-orientador)
- Ana Lúcia C. Bazzan
Departamento de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- João Cucci Neto
Departamento de Engenharia Civil da Universidade Presbiteriana Mackenzie
- Ariadne Maria Brito Rizzoni Carvalho
Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas
- Anderson de Rezende Rocha
Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas

¹Suporte financeiro de: Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (processo 2009/12690-6) 2010–2011.

Resumo

O trânsito é um problema cada vez maior nas cidades, consumindo recursos e agravando a poluição; em São Paulo perdem-se cerca de R\$33 bilhões por ano por causa do trânsito. Neste trabalho de mestrado desenvolvemos um sistema que une as áreas de simulação de multidões e planejamento probabilístico para otimizar semáforos de tempo fixo. Essas duas áreas apresentam algoritmos que permitem soluções eficientes para os problemas, mas a sua aplicação ainda depende largamente da intervenção de especialistas no problema a ser estudado, seja descrevendo o problema de planejamento probabilístico, seja interpretando os dados devolvidos pelo simulador. Nosso sistema diminui essa dependência ao utilizar autômatos celulares para simular o tráfego e gerar informações que são então utilizadas para descrever o problema de planejamento probabilístico. Com isso podemos: (i) reduzir a necessidade de coleta de dados, que passam a ser gerados pelo simulador e (ii) produzir bons planos para o controle de semáforos de tempo fixo sem que seja necessária a intervenção de especialistas para a análise dos dados. Nos dois testes realizados a solução proposta pelo sistema diminuiu o tempo médio de percurso em 18.51% e 13.51%, respectivamente.

Abstract

Traffic is an ever increasing problem, draining resources and aggravating pollution. In Sao Paulo, for instance, financial losses caused by traffic represent a sum of about R\$33 billions a year. In this work we've developed a system that puts together the areas of Crowd Simulation and Probabilistic Planning to optimize fixed time traffic lights. Although both areas present good algorithms their use is limited by their reliance on specialists, whether to describe the probabilistic planning problem or to analyze the data produced by the simulations. Our approach contributes to minimize this dependence by using cellular automata simulations to generate the data that is used to describe the probabilistic planning problem. This allows us to: (i) reduce the amount of data collection, since the data is now generated by the simulator and (ii) produce good policies for fixed time traffic light control without the intervention of specialists to analyze the data. In the two tests performed the solution proposed by the system was able to reduce travel times by 18.51% and 13.51%, respectively.

Agradecimentos

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho recebi o apoio e colaboração de muitas pessoas. Gostaria de agradecer, em especial, algumas pessoas que estiveram mais envolvidas nesse processo.

- Ao Siome que desde nossa primeira conversa confiou em mim e me apoiou
- Ao Jacques que fez este trabalho ir muito mais longe do que eu teria conseguido sozinho
- À minha companheira inseparável, que pode não saber me ajudar a programar, mas sempre me ajuda a resolver os problemas difíceis
- Ao meu pai, que me apoia desde o momento em que nasci e que ainda hoje é muitas vezes o homem mais inteligente e mais forte do mundo
- À minha mãe, leitora incansável de todos os meus escritos que ainda nutre a esperança de que eu vire um acadêmico
- À minha avó Eva, a melhor vizinha que terei em toda a minha vida
- À minha avó Maria Teresa que apesar de morar longe é sempre uma grande amiga
- Aos meus avôs, dois homens brilhantes que até hoje me inspiram
- Ao Pedro que por alguma razão que ainda não entendi me ajudou a coletar os dados
- Aos meus outros familiares, que não agradeço individualmente porque a página está acabando
- Ao Japonês que me tirou de algumas grandes enrascadas
- À Moara que leu o meu texto mesmo sem entender nem metade

“Oh mundo atroz! Com minha besta abati um albatroz.”
Donald Fauntleroy Duck

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Agradecimentos	vii
1 Introdução	1
1.1 O problema do trânsito	1
1.2 Solução desenvolvida	2
1.3 Organização	3
2 Revisão dos métodos para otimização de semáforos	5
2.1 Semáforos de tempo fixo	5
2.1.1 Métodos analíticos	6
2.1.2 Métodos computacionais	7
2.2 Semáforos atuados	8
2.2.1 SCOOT	9
2.2.2 SCATS	10
2.3 Seleção dinâmica	10
2.4 Análise dos métodos	10
2.5 Situação em São Paulo	11
3 Simulação de multidões	12
3.1 Modelos estudados	12
3.1.1 <i>Microscopic follow-the-leader</i>	12
3.1.2 Autômatos celulares	13
3.1.3 Modelos de cinética de gases	13
3.1.4 <i>Master equation</i>	13
3.1.5 Modelos fluidodinâmicos	14
3.2 Modelo escolhido e implementação	14

4	Planejamento probabilístico	17
4.1	Modelos de planejamento	17
4.2	Spudd	18
4.2.1	Diagramas algébricos de decisão	19
4.2.2	Iteração de valor em ADDs	20
4.3	Modelagem do problema	20
4.4	Múltiplas resoluções do tempo	21
4.5	Banco de dados	23
5	Testes	24
5.1	Validação do simulador	24
5.1.1	Testes qualitativos	24
5.1.2	Testes quantitativos	29
5.1.3	Discussão dos resultados	34
5.2	Eficiência do sistema	34
5.2.1	Alameda Barros x Rua Dr. Gabriel dos Santos	34
5.2.2	Avenida Lavandisca	36
5.2.3	Discussão dos resultados	37
6	Trabalhos futuros	39
6.1	Simulador de multidões	39
6.2	Planejador probabilístico	39
7	Conclusão	41
	Apêndices	43
A	Diagrama UML do simulador	44
B	Banco de dados	46
C	Linguagem de descrição de mapas	48
D	Dados levantados	51
D.1	Alameda Barros x R. Doutor Gabriel dos Santos	51
D.1.1	Topografia	51
D.1.2	Tempos de chegada	51
D.1.3	Taxas de conversão	54
D.1.4	Tempos de percurso	54
D.1.5	Número de paradas	54

D.2	Av. Lavandisca com Ruas Tuim, Inhambú e Canário	57
D.2.1	Topografia	57
D.2.2	Tempos de chegada	57
D.2.3	Taxas de conversão	57
D.2.4	Tempos de percurso	63
D.2.5	Número de paradas	65
	Bibliografia	66
	Glossário	70
	Acrônimos	74

Lista de Tabelas

5.1	Comparação do fluxo de veículos a cada dez minutos na região da Al. Barros (observado e simulado)	32
5.2	Comparação das taxas de conversão dos veículos da Al. Barros no cruzamento com a R. Dr. Gabriel dos Santos (observadas e simuladas)	33
5.3	Comparação das taxas de conversão dos veículos da R. Dr. Gabriel dos Santos no cruzamento com a Al. Barros (observadas e simuladas)	33
5.4	Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas na região do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos (observados e simulados)	33
5.5	Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas na região da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário (observados e simulados)	33
5.6	Política de tempos do semáforo devolvida pelo planejador para o cruzamento da Al. Barros com a R. Gabriel dos Santos	34
5.7	Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas observados no cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos e simulados com a política proposta pelo planejador	36
5.8	Resultados do teste t não pareado aplicado aos resultados de 20 simulações com a política atual e a política proposta. A hipótese alternativa é de que a diferença entre as médias é diferente de 0	36
5.9	Política de tempos do semáforo devolvida pelo planejador para os cruzamentos da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário	36
5.10	Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas observados nos cruzamentos da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário e simulados com a política proposta pelo planejador	37
5.11	Resultados do teste t não pareado aplicado aos resultados de 20 simulações com a política atual e a política proposta. A hipótese alternativa é de que a diferença entre as médias é diferente de 0	37
D.1	Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos	53

D.2	Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos em três intervalos de 15 minutos	55
D.3	Tempo de percurso de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada origem na região da Al. Barros	56
D.4	Número de paradas de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada origem na região da Al. Barros	56
D.5	Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da Av. Lavandisca.	57
D.6	Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da R. Tuim.	58
D.7	Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 5 minutos na chegada da R. Inhanmbú.	58
D.8	Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da R. Canário.	58
D.9	Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Tuim	60
D.10	Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Inhambú	61
D.11	Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Canário	62
D.12	Tempo de percurso (segundos) de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada quadra. Os números das colunas representam a indicação no esquema topográfico da Figura D.2	63
D.13	Tempo de percurso (segundos) de 5 veículos escolhidos aleatoriamente nos cruzamentos de acordo com a origem e destino	64
D.14	Número de paradas de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada quadra .	65

Lista de Figuras

1.1	Módulos do sistema	2
4.1	Diagrama algébrico de decisão que representa o efeito da ação <i>pegar B1</i> sobre a variável <i>naGarraB1</i> no mundo dos blocos	19
4.2	Exemplo das variáveis utilizadas no arquivo de entrada do sistema SPUDD	21
4.3	Exemplo da ação <i>mudar S1</i> no arquivo de entrada do sistema SPUDD	22
5.1	Série que mostra os veículos começando a andar após a abertura do semáforo	25
5.2	Série que mostra o comportamento de troca de faixas quando os veículos encontram um veículo parado à sua frente	26
5.3	Série que mostra o fenômeno das ondas Stop and Go. Nesse caso a onda foi iniciada por uma freagem excessiva do primeiro veículo verde na primeira imagem	27
5.4	Diferentes comportamentos dos veículos em um semáforo. As figuras (a) e (b) mostram um veículo que espera os veículos que vêm no outro sentido para poder realizar uma conversão; as figuras (c) e (d) mostram um veículo que espera os veículos à sua esquerda passarem para poder realizar uma conversão; as figuras (e) e (f) mostram um veículo que realiza uma conversão antes que o veículo que vem no outro sentido chegue	28
5.5	Ilustração da topografia do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos	30
5.6	Ilustração da topografia dos cruzamentos estudados na região da Av. Lavandisca	31
5.7	Número de veículos X iterações do simulador para afluxo e efluxo de veículos em um período de 15 minutos. Os gráficos mostram o melhor e o pior resultado do simulador em cinco diferentes simulações	32
5.8	Parte do grafo que representa a política devolvida pelo planejador	35
A.1	Diagrama UML de classes do simulador de multidões	45
B.1	Diagrama de entidade-relacionamento do banco de dados que guarda as informações das simulações	47

D.1	Ilustração da topografia do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos	52
D.2	Ilustração da topografia dos cruzamentos estudados na região da Av. Lavandisca	59

Capítulo 1

Introdução

1.1 O problema do trânsito

Há muito tempo se estuda o problema do trânsito, em grande parte devido ao custo econômico e ambiental dos engarrafamentos (Helbing 2001). Apenas na cidade de São Paulo calcula-se que o trânsito provoque um prejuízo anual da ordem de R\$ 33 bilhões (Albuquerque 2008).

Uma das maneiras mais efetivas para melhorar o fluxo de veículos é o aperfeiçoamento dos tempos dos *semáforos*¹² (Spall e Chin 1997), tanto pelo seu alto impacto quanto pela facilidade de se realizar estas alterações. Por essa razão, diferentes abordagens para a otimização de semáforos vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, utilizando-se cada vez mais dos recursos computacionais disponíveis. Em uma cidade como São Paulo, com 5638 intersecções controladas por semáforo (Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo 2011), a necessidade de otimizar esses tempos é ainda mais evidente.

Um dos trabalhos clássicos da área foi desenvolvido por Webster (Webster 1957) que, apesar de apresentar um método que não utilizava computadores para o cálculo dos tempos de semáforos, se baseou em simulações computacionais de tráfego. Dois dos métodos mais utilizados atualmente para o cálculo dos tempos de verde e da *defasagem* entre semáforos são o TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) e o SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*), colocados em uso respectivamente em 1967 e em 1979 (Robertson 1986), o que não significa que o trabalho nesta área está concluído, como mostram o constante desenvolvimento de novas versões desses sistemas e o desenvolvimentos de novas ferramentas, como o SIRI, o otimizador de tempos de semáforos desenvolvido pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET-SP) (Vilanova 2006).

¹Os conceitos e termos relacionados à engenharia de tráfego e alguns conceitos da área de computação foram detalhados no glossário. Em sua primeira aparição no texto estes termos aparecem em itálico.

²Tecnicamente os tempos de ciclo, de verde e de defasagem são programados nos controladores. Entretanto, para facilitar a leitura utilizaremos o termo semáforo ao invés de controlador semafórico.

Com este problema em mente, procuramos maneiras alternativas para o cálculo automático dos *tempos de verde* em redes de semáforos. Desenvolvemos nosso sistema com base na premissa de que avanços no sentido da automação de tomada de decisões podem ser obtidos através de algoritmos de *planejamento probabilístico* (Givan, Leach e Dean 1997). Estes, quando alimentados com informações precisas, devolvem *políticas* interessantes para o controle de ambientes. Um bom exemplo disso são os resultados obtidos em Pesquisa Operacional (Boutillier, Dean e Hanks 1999, Puterman 2005). No entanto, uma das maiores dificuldades para o uso eficiente dos planejadores já desenvolvidos reside na descrição de problemas; geralmente, são utilizados problemas sem interesse prático ou é necessário que um especialista descreva o problema de maneira que ele possa ser resolvido por um algoritmo de planejamento probabilístico (Givan, Leach e Dean 1997, Trevizan, Cozman e Barros 2007). Neste sentido, buscamos ao longo deste trabalho de mestrado unir as áreas de *simulação de multidões* e planejamento probabilístico para desenvolver um sistema capaz de automaticamente descrever as situações como problemas de planejamento probabilístico e resolvê-los. Assim, nosso sistema é capaz de propor novos tempos de verde em redes de semáforos para otimizá-los e diminuir os custos relativos ao trânsito.

1.2 Solução desenvolvida

Este trabalho de mestrado teve como principal objetivo otimizar o controle de *semáforos de tempo fixo* para maximizar o fluxo de veículos em uma interseção ou em uma rede de ruas. Para alcançar este objetivo criamos um sistema que combina a simulação de multidões, para realizar a simulação do tráfego e o levantamento de dados sobre uma região, com algoritmos de planejamento probabilístico, que calculam os melhores tempo de verde e defasagens para os semáforos da região a partir dos dados obtidos pelas simulações. A **Figura 1.1** mostra os módulos básicos do sistema.

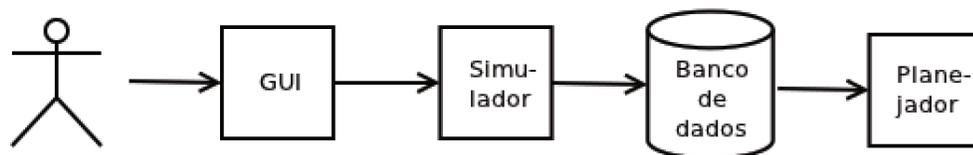


Figura 1.1: Módulos do sistema

O primeiro passo para a integração dessas duas técnicas foi a definição de quais são as variáveis do mundo que descrevem os estados do problema de planejamento probabilístico como, por exemplo, volume de veículos em cada rua, se a próxima quadra pode receber mais veículos,

fluxo de veículos.

Ao definir as variáveis que consideramos em um estado no problema de planejamento probabilístico devemos levar em conta o fato de que, para que a política devolvida pelo planejador tenha interesse prático, ela deve ser definida para estados que podem ser verificados nos cruzamentos onde o sistema for instalado. Isso implica, por exemplo, em não definir a política levando-se em conta a posição exata e a velocidade de cada veículo no sistema. Entretanto, os modelos de simulação de multidões levam em conta essas características do sistema para poder simular sua dinâmica. Assim, cada estado descrito no problema de planejamento probabilístico representa diferentes estados que podem ser encontrados no modelo de simulação. Ou seja, os estados considerados pelo planejador serão arquétipos dos estados encontrados no *simulador de multidões*. É nesse momento que surge a imprecisão no efeito das ações, pois as diferentes configurações do mundo representadas em um mesmo estado no planejador podem reagir de maneiras diferentes a uma mesma ação.

Com essas variáveis definidas podemos analisar as simulações e verificar, em cada instante de tempo, qual era a situação em que o modelo se encontrava, qual foi a ação tomada (para realizar as simulações as ações são escolhidas de maneira aleatória) e qual foi o resultado. Se tivermos realizado um número suficiente de simulações poderemos descrever as funções de transição de estados e suas respectivas probabilidades. Como os estados e as ações possíveis foram definidos previamente, temos a descrição de um Processo Markoviano de Decisão (*Markovian Decision Process* - MDP) que pode ser usada como entrada para um algoritmo de planejamento probabilístico.

Essa maneira de unir os algoritmos das duas áreas apresenta algumas características interessantes, como a facilidade de se trocar as partes do sistema independentemente (interface, simulador, banco de dados e planejador) e a possibilidade de reaproveitar os cálculos ao obter novas observações do ambiente.

As soluções propostas pelo planejador podem ser aplicadas tanto a semáforos de tempo fixo, como a semáforos sob o controle de sistemas de seleção dinâmica.

1.3 Organização

Nesta dissertação faremos uma revisão das áreas de interesse para o nosso sistema e discutiremos as implementações e os testes realizados. No **Capítulo 2**, faremos uma breve revisão bibliográfica sobre métodos existentes para a otimização de semáforos, no **Capítulo 3** descreveremos os métodos mais comuns para simulação de multidões e discutiremos o método escolhido e pontos importantes da implementação realizada. No **Capítulo 4** apresentaremos o algoritmo de planejamento escolhido e a modelagem realizada para a descrição dos problemas. No **Capítulo 5** apresentaremos os testes de validação dos modelos e de eficiência dos tempos propostos pelo sistema. No **Capítulo 6** discutiremos diferentes aspectos deste trabalho que ainda podem

ser pesquisados e no **Capítulo 7** apresentaremos as conclusões deste trabalho de mestrado.

Capítulo 2

Revisão dos métodos para otimização de semáforos

O problema da otimização dos semáforos recebeu grande atenção ao longo dos anos. Como parte deste trabalho realizamos uma pesquisa bibliográfica sobre as técnicas existentes para a otimização de semáforos. A seguir descreveremos algumas das soluções propostas, que representam diferentes abordagens para o problema. Damos preferência a soluções que são utilizadas pelos engenheiros de tráfego na determinação dos tempos dos *semáforos*, mas também é possível encontrar diversas técnicas propostas nos meios acadêmicos, como as descritas por Bazzan, Oliveira e Silva, Mikami e Kakazu e Hoar, Penner e Jacob. As soluções apresentadas foram agrupadas de acordo com o tipo de semáforo em que se aplicam, *semáforos de tempo fixo* ou *semáforos atuados*, mas o trabalho desenvolvido se aplica apenas a semáforos de tempo fixo.

2.1 Semáforos de tempo fixo

Os semáforos de tempo fixo representam grande parte dos semáforos brasileiros (Bonetti Jr. e Pietrantonio 2006). Nestes semáforos os tempos são programados de acordo com dados históricos sobre a intersecção. Estes semáforos podem ser programados com diversos planos de temporização, que são carregados dependendo do dia e horário (Bonetti Jr. e Pietrantonio 2006). Nesta seção discutiremos alguns métodos para o cálculo do tempo do *ciclo* dos semáforos e dos *tempos de verde* para semáforos de tempo fixo.

2.1.1 Métodos analíticos

Método de Webster

O método de Webster (Webster 1957) para otimização dos tempos de semáforo pode ser dividido em duas partes. Em um primeiro momento calcula-se a proporção dos tempos de verde para cada um dos grupos de movimentos. Em um segundo momento, calcula-se o tempo ótimo do ciclo.

O cálculo das proporções de tempos de verde é feito de acordo com o grau de saturação de cada grupo de movimento que pode ser definido como:

$$y_g = \frac{\text{Fluxo de veículos do grupo } g}{\text{Fluxo de saturação do grupo } g} \quad (2.1)$$

Para cada grupo semaforico define-se o valor do grau de saturação (y'_k) como o máximo dos valores dos grupos de movimento que pertencem ao grupo semaforico. A proporção do tempo de verde de cada grupo semaforico em relação ao tempo do ciclo pode ser calculada como:

$$\lambda_k = \frac{c - L y'_k}{c Y} \quad (2.2)$$

em que Y é a somatória de y'_k , c é o tempo de ciclo e L o tempo perdido em um ciclo, que pode ser descrito como:

$$L = nl + R, \quad (2.3)$$

em que n é o número de fases, l é o tempo médio perdido por fase e R o tempo em que todos os semáforos estão vermelhos ou amarelos. A partir desses tempos é possível calcular o valor da duração do ciclo ótimo, mas o autor considera que ela é muito complicada e propõe que se use uma aproximação. Dessa forma, o tempo ótimo de ciclo proposto por Webster pode ser calculado como:

$$c^* = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} \quad (2.4)$$

note que esse valor pode ser muito pequeno. Por essa razão é adotado um valor mínimo de 25 segundos para os ciclos.

Método de Roess

O método descrito por Roess (Roess, Prassas e McShane 2010) aborda o problema de uma maneira diferente. O tempo de cada ciclo é calculado de acordo com a fórmula

$$c^* = \frac{L}{1 - \left[\frac{V_c}{S * PHF * y^*} \right]}, \quad (2.5)$$

em que V_c é soma das demandas das *faixas críticas*, S é o fluxo de saturação, PHF é o *Peak-Hour Factor*, um fator que ajusta o tempo do semáforo para se adaptar ao fluxo dos piores 15 minutos de cada hora e y^* é o grau de saturação que se deseja alcançar. O grau de saturação utilizado em geral está no intervalo 0.85 a 0.95, uma vez que taxas mais baixas podem causar atrasos porque um semáforo permanece aberto com pouco fluxo e taxas mais altas podem causar falhas nas fases.

Uma vez calculado o tempo do ciclo a divisão dos tempos de verde é feita calculando-se o *tempo de verde efetivo*

$$\lambda_{TOT} = c^* - L, \quad (2.6)$$

e dividindo-se esse tempo de acordo com a demanda da faixa crítica de cada grupo semaforico:

$$\lambda_g = \lambda_{TOT} * \left(\frac{V_{cg}}{V_c} \right). \quad (2.7)$$

2.1.2 Métodos computacionais

TRANSYT

O TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) tem como principal objetivo o cálculo de *defasagens* entre os semáforos, mas também realiza o cálculo de tempos ótimos de semáforo. O módulo de cálculo de defasagens utiliza uma busca *hill-climbing* para ajustar a defasagem entre os semáforos da região estudada e o segundo (CYOP) calcula isoladamente os tempos de ciclo para cada semáforo tentando manter um grau de saturação próximo aos 90%. A otimização é realizada em função do índice de desempenho (*Performance Index*), um índice que pondera o atraso sofrido por cada veículo e o número de paradas realizadas. Esse índice pode ser descrito através da equação:

$$PI = \sum_g (Ww_gd_g + Kk_gp_g)q_g, \quad (2.8)$$

em que: W e K são os custos médios por unidade de atraso e parada; w_g e k_g são o peso que se quer atribuir ao atraso e ao número de paradas do grupo de movimento g ; d_g e p_g são o atraso médio o número médio de paradas do grupo g e q_g é o fluxo médio do grupo.

Tanto o TRANSYT quanto o SCOOT (modelo que será discutido adiante) tem como base um modelo de simulação para avaliar as *políticas* propostas. Segundo o desenvolvedor dos dois modelos é importante que os modelos sejam fiéis à realidade, para que os otimizadores não sejam enganados (Robertson 1986). O modelo utilizado nos dois sistemas é baseado no conceito de Perfil de Fluxo Cíclico (*Cyclic-flow Profile* - CFP), um perfil que associa fluxos médios de veículos a intervalos do ciclo do semáforo a montante. Munido desses perfis o algoritmo pode calcular quantos veículos serão interrompidos em cada semáforo de acordo com a sua defasagem em relação a outros semáforos.

SIRI

O SIRI (Vilanova 2006) foi o sistema desenvolvido pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET-SP) para o cálculo do tempo de ciclo, tempos de verde e defasagens. O sistema começou a ser utilizado em 2004 e em 2007 havia sido utilizado para calcular os tempos de verde e defasagens de cerca de 250 semáforos da cidade. A base do sistema é um *simulador de multidões* que agrupa os veículos em pelotões para determinar seu deslocamento. O tempo do ciclo é calculado através do método do “Grau de saturação”, o mesmo método utilizado pelo sistema SCOOT, que será apresentado adiante. Para determinar a divisão dos tempos de verde o sistema identifica os grupos de movimento críticos de cada semáforo e tenta equalizar a saturação dos movimentos críticos de cada grupo. Quando valores menores do que os valores de segurança são obtidos, o sistema busca outras maneiras de calcular os tempos de verde.

O cálculo das defasagens é realizado de maneira similar ao cálculo realizado manualmente pelos técnicos da CET-SP, linearizando-se a rede. Os técnicos utilizam o conceito de rota principal da rede, a rota obtida quando se percorre a rede a partir da entrada de maior fluxo seguindo sempre as ligações de maior fluxo. Esse processo se repete até que todas as ligações tenham sido percorridas, linearizando a rede. As defasagens são então calculadas visitando-se os nós de acordo com as rotas montadas.

2.2 Semáforos atuados

Semáforos atuados são aqueles que ajustam o tempo de verde de acordo com informações colhidas em tempo real, através do uso de sensores, sobre o fluxo de veículos onde operam (Bonetti

Jr. e Pietrantonio 2006). Bonetti Jr. e Pietrantonio descreve algumas das estratégias para controle desses semáforos como:

- Fazer com que um grupo de movimento obtenha verde quando o comprimento da fila ultrapassa um limite; esta estratégia é usada principalmente em *semáforos semi-atuados*, onde apenas algumas das vias envolvidas possuem sensores
- Realizar pequenos incrementos a um tempo básico de verde quando o sistema percebe que há veículos que podem se beneficiar

Estes semáforos apresentam vantagens em relação aos outros sistemas, principalmente em intersecções isoladas ou em situações de alto grau de saturação das vias (Bonetti Jr. e Pietrantonio 2006). Entretanto, como seu custo é elevado, só devem ser instalados se uma análise de seus benefícios indicar ganhos suficientes (Vilanova, Neto e Fernandes 2005). Nesta seção discutiremos alguns dos algoritmos que podem ser utilizados para determinar as ações tomadas pelos semáforos.

2.2.1 SCOOT

Segundo Robertson o SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*) é como o TRANSYT, porém em tempo real (Robertson 1986). As três diretrizes que guiaram essa mudança são (Robertson e Bretherton 1991):

- Medir os Perfis de Fluxo Cíclico (*Cyclic-flow Profiles - CFPs*) em tempo real
- Manter uma representação sempre atualizada das filas
- Otimizar os semáforos de maneira incremental.

Os dois primeiros princípios são, efetivamente, a tradução do TRANSYT para um sistema em tempo real, uma vez que o TRANSYT já utilizava os CFPs e calculava o comprimento das filas, mas com dados fixos. O terceiro princípio permite que a adaptação dos planos seja feita de maneira gradual, garantindo que os planos estejam sempre de acordo com o fluxo de veículos e que não se perca eficiência na troca de planos. O SCOOT realiza três tipos de ajuste: divisão do tempo de verde, defasagem entre semáforos e comprimento do ciclo. Poucos segundos antes de cada troca de fase, o sistema verifica se deve aumentar ou diminuir a fase em até quatro segundos; ao final de cada ciclo, o sistema considera se deve aumentar ou reduzir a defasagem entre os semáforos em até quatro segundos e em intervalos de alguns minutos o sistema verifica se deve aumentar ou diminuir a duração dos ciclos.

2.2.2 SCATS

O sistema SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) (Sims e Dobinson 1980, Transport Roads & Traffic Authority) utiliza dois algoritmos para realizar seus cálculos. O primeiro algoritmo, chamado de controle estratégico, calcula a divisão dos tempos de verde, a defasagem entre semáforos e o comprimento do ciclo a partir de uma medida similar ao grau de saturação. O segundo algoritmo, chamado de controle tático é um controle local de cada semáforo que usa como base os tempos calculados pelo controle estratégico, mas os adapta de acordo com os dados de seus sensores. Essas adaptações podem incluir redistribuição do tempo de verde e omissão de fases. Com essa combinação de controles o SCATS tenta manter um controle ótimo para a região ao mesmo tempo que permite acomodar variações locais no trânsito, que são menores mas mais rápidas do que as consideradas pelo controle estratégico.

A base para os cálculos do controle estratégico é uma medida similar ao grau de saturação. Essa medida é a razão entre o tempo de verde efetivo dos semáforos e o tempo de verde programado. O tempo de verde efetivo é o tempo que seria suficiente para escoar todo o fluxo se os veículos estivessem distribuídos de acordo com as condições ótimas de fluxo. Este tempo efetivo é calculado medindo se o tempo em que os sensores de presença estão desocupados e subtraindo o tempo em que eles ficariam desocupados em uma condição de saturação. O tempo da condição de saturação é calculado automaticamente de acordo com as medidas anteriores do maior fluxo que já aconteceu na via. Dessa maneira a detecção de situações de supersaturação é simples e permite que o sistema rapidamente se adapte. Os cálculos de tempos são realizados de maneira que o grau de saturação se aproxime de 90%.

2.3 Seleção dinâmica

Outro modelo comum no Brasil é o de seleção dinâmica (Bonetti Jr. e Pietrantonio 2006). Neste caso o sistema escolhe, entre uma série de planos existentes, aqueles que mais se adequam à percepção que o sistema tem do ambiente. Em intervalos de 15 a 20 minutos o sistema analisa o tráfego de veículos e seleciona o plano que melhor se adapta à situação. Este modelo é utilizado tanto de maneira primária em alguns sistemas como de maneira secundária em sistemas atuados quando há falhas em um grande número de detectores (Vilanova, Neto e Fernandes 2005).

2.4 Análise dos métodos

Nesta seção fizemos uma revisão dos métodos mais empregados na otimização de tempos de verde e sincronização de semáforos. Os métodos analíticos apresentam uma limitação natural na quantidade de variáveis que podem ser consideradas e, por isso, tem dado espaço aos métodos computacionais. Entre os métodos computacionais podemos separar os métodos de tempo

fixo, que podem ser utilizados em semáforos isolados e em sistemas de controle com seleção dinâmica, e os métodos para semáforos atuados que, apesar de geralmente apresentarem resultados melhores, principalmente em situações de trânsito intenso, não são sempre a melhor opção pelo seu alto custo.

2.5 Situação em São Paulo

Para entender a relevância de cada uma das técnicas para controle de semáforos realizamos um levantamento do número de semáforos que atua de acordo com cada um dos modelos. A cidade de São Paulo conta com 5638 cruzamentos controlados por semáforos (Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo 2011). O Programa de modernização semafórica (SEMIN), responsável pela instalação e manutenção de semáforos atuados pelo tráfego possui 973 semáforos atuados instalados (Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo 2011), o equivalente a 17,26% dos semáforos da cidade. Esse número é próximo ao número de semáforos atuados já instalados no final da década de 90 (Vilanova, Neto e Fernandes 2005), mas o programa prevê a instalação de outros 534 semáforos atuados pelo tráfego, totalizando 26,73% dos semáforos da cidade ou 33% dos semáforos sobre o controle das Centrais de Tráfego em Área (CTAs). Estes números mostram que os semáforos de tempo fixo representam e continuarão representando a grande maioria dos semáforos da cidade.

Capítulo 3

Simulação de multidões

Ao longo deste trabalho estudamos modelos utilizados para *simulação de multidões* tendo em vista algumas características que melhor se adequam ao nosso trabalho, como:

- Flexibilidade para que diferentes configurações do ambiente possam ser testadas
- Capacidade de definir objetivos diferentes para cada *agente*, para garantir que eles possam seguir caminhos diferentes
- Capacidade dos agentes de perseguir seus objetivos obedecendo as leis de trânsito
- Capacidade de modelar obstáculos com efeito limitado, como semáforos que podem ser desrespeitados ou veículos batidos que são removidos

Nesta seção descreveremos alguns dos modelos encontrados na literatura.

3.1 Modelos estudados

A pesquisa bibliográfica permitiu identificar cinco modelos que são mais comumente utilizados para realizar simulações de multidões. Esses modelos serão descritos a seguir.

3.1.1 *Microscopic follow-the-leader*

Neste modelo, também conhecido como *car-following*, a velocidade e a direção de cada veículo são definidos a partir da velocidade dos veículos ao seu redor, principalmente do veículo à sua frente, o líder (Helbing 2001). Este modelo não nos interessa pela dificuldade em se definir objetivos diferentes para diferentes veículos.

3.1.2 Autômatos celulares

Neste modelo o espaço e o tempo são discretizados. O ambiente evolui de acordo com regras de atualização das células. Estas regras são pré-definidas e levam em conta apenas um pequeno número de células vizinhas. As regras utilizadas neste modelo costumam ser mais simples do que as regras dos modelos *follow-the-leader*, fazendo com que a qualidade das simulações seja um pouco menor, mas possibilitando simulações mais rápidas e com maior número de veículos, o que faz com que o modelo seja muito utilizado (Helbing 2001).

Existem várias extensões deste modelo para simular cruzamentos e redes de vias. Estas extensões envolvem intercalação da atualização dos veículos em direções diferentes e simulação de: semáforos quebrados (veículos de qualquer direção podem entrar no cruzamento), obstáculos na pista (veículos quebrados ou estacionados), veículos que decidem realizar conversões sozinhos (a partir de uma probabilidade pré-determinada de que o veículo faça a curva), veículos que mudam de rua com maior probabilidade se há tráfego à frente e ondas verdes (Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000).

3.1.3 Modelos de cinética de gases

Estes modelos trabalham com uma representação de tráfego baseada na interação das partículas de gases, onde cada partícula representa um veículo. Todos os modelos são descritos por equações similares à equação de Boltzmann (Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000)

$$\left[\frac{\delta f}{\delta t} + \frac{\vec{p}}{m} \cdot \nabla_r + \vec{F} \cdot \nabla_p \right] f(\vec{r}, \vec{p}; t) = \left(\frac{\delta f}{\delta t} \right)_{col} \quad (3.1)$$

em que $f(\vec{r}, \vec{p}; t)$ é o número de partículas que estão em um volume d^3x ao redor de \vec{r} , com momento próximo a \vec{p} no tempo t ; ∇_r e ∇_p são, respectivamente, os diferenciais em relação ao espaço e ao momento; \vec{F} é o campo de forças externas; m é a massa das partículas e $\left(\frac{\delta f}{\delta t} \right)_{col}$ é a variação de f devido à colisão das partículas.

A dificuldade em se considerar diferentes faixas e ruas com sentidos diferentes fez com que deixássemos de lado este modelo.

3.1.4 Master equation

A base deste modelo é uma cadeia de Markov que nos dá a probabilidade de que o sistema se encontre no estado \mathbf{n} em um certo tempo. Esta probabilidade é calculada discretamente (Helbing 2001):

$$P(\mathbf{n}, t + \Delta t) = \sum_{\mathbf{n}'} P(\mathbf{n}, t + \Delta t | \mathbf{n}', t) P(\mathbf{n}', t), \quad (3.2)$$

ou no limite $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{\delta P(\mathbf{n}, t)}{\delta t} = \sum_{\mathbf{n}' \neq \mathbf{n}} W(\mathbf{n}|\mathbf{n}'; t)P(\mathbf{n}', t) - \sum_{\mathbf{n}' \neq \mathbf{n}} W(\mathbf{n}'|\mathbf{n}; t)P(\mathbf{n}, t) \quad (3.3)$$

em que as taxas de transição são definidas como a seguir:

$$W(\mathbf{n}|\mathbf{n}'; t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\mathbf{n}, t + \Delta t | \mathbf{n}', t)}{\Delta T} \quad (\mathbf{n} \neq \mathbf{n}'). \quad (3.4)$$

Este modelo assume que vale a hipótese de Markov, ou seja, que a probabilidade de transição só depende do estado em que o mundo se encontra e não dos estados anteriores.

O uso deste modelo poderia trazer vantagens se usássemos a equação de atualização de estados diretamente no planejador probabilístico, mas com isso perderíamos a modularidade do sistema e, conseqüentemente, não seria possível aproveitar novos avanços das áreas estudadas.

3.1.5 Modelos fluidodinâmicos

Nestes modelos o fluxo de trânsito é tratado como um fluido e as variáveis que devem ser definidas são a densidade e o fluxo de veículos para cada local. Pelas leis da dinâmica de fluidos sabemos que a soma das derivadas do fluxo e da densidade é igual à soma dos fluxos das fontes e sorvedouros (Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000). Entretanto não há uma relação definida entre a densidade e o fluxo de veículos. As diferentes formulações desta relação dão origem aos diferentes modelos de simulação de multidões baseados em dinâmica de fluidos.

3.2 Modelo escolhido e implementação

Tendo em vista as qualidades de cada um dos modelos estudados e as características que desejávamos, escolhemos o modelo de *autômatos celulares* para a simulação de multidões. Suas principais qualidades são: baixo custo computacional e capacidade de modelar corretamente diferentes comportamentos que gostaríamos de estudar. Além disso, por se tratar de um modelo que representa os veículos independentemente foi possível criar regras mais detalhadas para o comportamento dos veículos nos semáforos.

Os dois conjuntos de regras mais utilizados para simulação por autômatos celulares são os chamados Nagel-Schreckenberg (NaSch) (Nagel e Schreckenberg 1992) e Biham-Middleton-Levine (BML) (Biham, Middleton e Levine 1992). O modelo NaSch lida com tráfego em estradas, onde cada veículo tem uma velocidade que muda de acordo com o espaço livre à sua frente e uma probabilidade de frear exageradamente. O modelo BML trata do tráfego urbano, neste modelo há duas direções de tráfego que são atualizadas alternadamente para simular a atuação de um semáforo. Baseamos as regras da nossa implementação nas regras destes modelos, bem

como nas regras descritas na literatura para adaptá-los, como as que podem ser encontradas em (Benjaafar, Setyawan e Dooley 1997, Nagel et al. 1995, Schadschneider et al. 2000, Simon e Gutowitz 1998).

Como o foco deste trabalho era a influência dos semáforos nos veículos houve uma preocupação constante em descrever de maneira precisa o comportamento dos veículos nos cruzamentos. Esta preocupação fica clara em certas decisões do desenho do código, como o uso da frequência de atualização, ao invés da velocidade de veículos, e de regras de atualização específicas para veículos que estão em cruzamentos, que consideram, além da probabilidade de realizar conversões, a distância dos veículos que vêm no outro sentido. A implementação do simulador de multidões tomou mais tempo do que o previsto na proposta inicial, em grande parte pelas dificuldades que tivemos para criar estas novas regras. O pseudocódigo das regras de atualização fora de semáforos pode ser encontrado no **Algoritmo 1**.

Algoritmo 1: Automata::atualizarAgente

Entrada: *agt* : *Agente*

```

se agt.iteracoesSemAtualizacao > agt.periodoDeAtualizacao então
  | agt.iteracoesSemAtualizacao = 0
  | dir = escolhaDirecao(agt.posicao, agt.direcao)
  | livre = calcularEspacoAFrente(agt.posicao, dir)
  | seguranca =
  | ((periodoParada – agt.periodoDeAtualizacao)/desaceleracaoMaxima)
  | se (livre < seguranca) OU (livre < 1) então
  | | novaDir = desviar(agt, dir, livre)
  | | novoLivre = calcularEspacoAFrente(agt.posicao, dir)
  | | se novoLivre > livre então
  | | | dir = novaDir
  | | fim se
  | fim se
  | agt.direcao = dir
  | agt.posicao = agt.posicao + dir
  | agt.periodoDeAtualizacao =
  | | novoPeriodo(agt.posicao, agt.periodoDeAtualizacao)
senão
  | agt.iteracoesSemAtualizacao = agt.iteracoesSemAtualizacao + 1
fim se

```

A variável *periodoParada* indica o menor período entre atualizações em que um veículo consegue parar instantaneamente. Nosso algoritmo utiliza o conceito de período de atualização ao invés do conceito de velocidade, que costuma ser utilizados nestes algoritmos. Dessa maneira, todo o caminho dos agentes está definido, permitindo que a relação entre os veículos seja analisada de maneira mais detalhada.

No **Apêndice A** encontra-se o diagrama UML de classes do programa, desenvolvido em C++. No endereço <http://www.students.ic.unicamp.br/~ra098346/doc/> podem ser encontrados a descrição e comentários sobre todas as classes e funções, bem como os arquivos do código fonte.

Além disso desenvolvemos uma interface gráfica em PyGTK para a edição das ruas. A interface conta com um editor de regras de atualização de semáforo e permite a criação rápida de casos de teste. Todas as informações necessárias para o simulador, como taxa de fluxo, taxas de conversão e possibilidades de conversão de faixas podem ser editadas nesta interface gráfica.

Entre os módulos da interface gráfica e do simulador de multidões optamos por uma linguagem XML, definida no **Apêndice C**. A escolha de uma linguagem XML se baseou na facilidade de criação e edição dos arquivos, uma vez que podem ser usados analisadores léxicos de código aberto e os arquivos de exemplo podem ser editados manualmente.

A escolha do modelo de autômatos celulares para a realização das simulações permitiu o desenvolvimento de um simulador de multidões rápido e com boa precisão e nossa implementação garantiu que o comportamento dos carros dentro dos semáforos fosse fidedigna.

No próximo capítulo descreveremos a pesquisa realizada para a escolha do planejador probabilístico.

Capítulo 4

Planejamento probabilístico

Neste capítulo apresentamos os dois modelos de planejamento que foram estudados ao longo deste trabalho. Além disso descrevemos o algoritmo utilizado para realizar o planejamento no sistema e a modelagem realizada para a descrição dos problemas.

4.1 Modelos de planejamento

Os dois modelos mais utilizados para *planejamento probabilístico* são os modelos de Processos Markovianos de Decisão (*Markovian Decision Processes* - MDPs) (Boutilier, Dean e Hanks 1999) e de Caminhos Estocásticos Mínimos (*Shortest Stochastic Paths* - SSPs) (Bonet e Geffner 2003). Estudamos os dois modelos para avaliar qual se adapta melhor ao problema em análise.

O modelo dos MDPs se mostra apropriado para nosso problema graças às características da imprecisão nos efeitos das ações e da independência do histórico no efeito das ações (o efeito de uma ação depende apenas da configuração atual do mundo e não dos estados anteriores ou das ações realizadas anteriormente).

O modelo dos SSPs também apresenta estas características e muitas vezes é escolhido ao invés dos MDPs porque ao definir estados iniciais e estados meta, permite que apenas uma parte dos estados do mundo seja avaliada. Entretanto, o problema estudado tem uma descrição muito mais natural na forma de um MDP, uma vez que não queremos chegar a um estado meta, mas sim diminuir os custos acumulados a longo prazo, quaisquer que sejam as condições de tráfego.

Por apresentar uma descrição mais natural do problema estudado acreditamos que o modelo dos MDPs seja a melhor opção para a formulação dos problemas e por isso adotamos esta representação em nosso sistema.

Um MDP pode ser descrito através de suas componentes (Puterman 2005):

- Um espaço de estados S finito e não vazio. Os estados satisfazem a hipótese de Markov, isto é, cada estado contém toda a informação necessária para prever os efeitos de todas

as ações e eventos, independentemente de outras informações sobre o histórico do sistema (estados visitados e ações executadas no passado).

- Um conjunto de ações A e conjuntos de ações $A(s) \subseteq A$, que representam as ações aplicáveis a cada estado $s \in S$.
- Uma função de transição de estados $F(s, a)$ que mapeia um estado s e uma ação $a \in A(s)$ a um conjunto não vazio de estados.
- Uma distribuição de probabilidades $P(\cdot | s, a)$ sobre $F(s, a)$, para todo $s \in S$ e todo $a \in A(s)$.
- Uma função valor $V(h)$ que associa um valor a um histórico de estados e ações. Em geral utilizam-se funções aditivas, ou seja, que podem ser calculadas simplesmente como a soma do valor de cada par estado, ação.

O primeiro passo para a integração do planejador com o simulador é a definição das variáveis do mundo que definem os estados. Neste trabalho definimos como variáveis a fase de cada semáforo, o tempo em que ele se encontra nesta fase e a velocidade média dos veículos. O número de paradas dos veículos foi utilizado como parâmetro para medir a qualidade dos planos, mas não fez parte das descrições dos estados. A descrição do problema foi construída a partir de um banco de dados que armazena as informações colhidas durante as simulações.

A meta do planejador é maximizar o índice de desempenho da rede (Robertson 1986), descrito na **Equação 2.8**.

4.2 Spudd

Decidimos adotar como planejador do nosso sistema a implementação em código aberto do planejador SPUDD (*Stochastic Planning using Decision Diagrams*) (Hoey et al. 1999), desenvolvida no Departamento de Ciência da Computação da University of British Columbia. Essa implementação apresentava todas as características que desejávamos no planejador, como custos, recompensas e variáveis com múltiplos valores, a única desvantagem dessa implementação é que o formato de arquivo de entrada não é o padrão das competições de planejamento.

A base do sistema SPUDD é uso de Diagramas Algébricos de Decisão (*Algebraic Decision Diagrams - ADDs*) para a representação de funções de valor e políticas. Dessa maneira, a política pode ser descrita de maneira eficiente em função dos valores das variáveis e, implicitamente, diferentes estados com os mesmos valores são agrupados, diminuindo o processamento necessário.

Para realizar o planejamento o SPUDD usa o algoritmo de Iteração de valor (Russell e Norvig 2002) adaptado para aproveitar as características dos ADDs.

4.2.1 Diagramas algébricos de decisão

Os Diagramas Algébricos de Decisão (*Algebraic Decision Diagrams* - ADDs) são uma extensão dos Diagramas Binários de Decisão (*Boolean Decision Diagrams* - BDDs), que ao invés de representar funções do tipo $\mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{B}$ representam funções $\mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Estes diagramas representam uma árvore de decisão da função onde, no caminho da raiz até as folhas, cada variável aparece no máximo uma vez e as variáveis aparecem sempre na mesma ordem. A eficiência dessa representação deriva do fato que subárvores iguais não são repetidas e variáveis que têm os dois filhos apontando para o mesmo nó podem ser omitidas. As funções representadas por um ADD podem ser descritas como:

- O valor de um nó terminal é uma função constante e é igual ao rótulo do nó
- O valor de um nó não terminal que representa a variável booleana X_1 é dado por

$$f(x_1 \dots x_n) = x_1 f_{se}(x_2 \dots x_n) + \bar{x}_1 f_{senao}(x_2 \dots x_n),$$

em que f_{se} e f_{senao} são os diagramas que tem como raiz os nós *se* e *senao* da variável x_1 .

No algoritmo SPUDD os ADDs são utilizados para representar as funções de transição das variáveis, as funções de recompensa e funções valor. A **Figura 4.1** mostra um exemplo de um ADD representando o efeito da ação *pegarB1* sobre a variável *naGarraB1* no mundo dos blocos. Note que essa representação permite que as variáveis *sobreB1B2* e *naMesaB1* sejam ignoradas, uma vez que não influenciam o resultado. Neste exemplo o problema tem dois blocos, o ato de tentar pegar o bloco quando ele já está na garra não afeta a variável e a ação só pode ser completada se o bloco *B1* não está sob o bloco *B2*, neste caso há uma chance de sucesso de 90%.

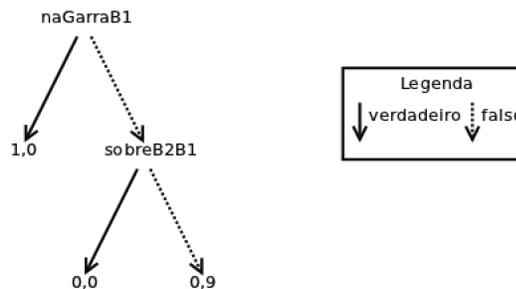


Figura 4.1: Diagrama algébrico de decisão que representa o efeito da ação *pegarB1* sobre a variável *naGarraB1* no mundo dos blocos

4.2.2 Iteração de valor em ADDs

O algoritmo SPUDD adapta o algoritmo de Iteração de valor para se aproveitar das características dos ADDs. O algoritmo original calcula o valor de cada estado escolhendo as ações de maneira gulosa e atualiza esse valor para todos os estados a cada iteração. Ele para quando em uma dada iteração nenhum estado apresentou uma variação significativa em seu valor (Russell e Norvig 2002).

O algoritmo utilizado pelo SPUDD utiliza os ADDs para representar tanto o valor das políticas como as tabelas de probabilidade de transição. O passo inicial é a construção de um ADD que representa a função valor descrita no problema. Em cada iteração esse ADD é modificado para se considerar o valor de uma função que representa o valor em um passo anterior. Assim, a função inicial será V^0 e a função V^i representa o valor com i ações a serem tomadas.

A função V^i é considerada como um resultado da aplicação de uma ação sobre V^{i+1} e, por isso, o primeiro passo para a criação de V^{i+1} é criar o ADD V'^i em que cada variável é o resultado de uma ação. Para cada ação e cada variável X'_j o algoritmo multiplica o ADD V'^i por $Q_{X'_j}^a$, um ADD que representa a probabilidade de uma variável se tornar verdadeira ou falsa de acordo com a ação tomada e o valor das outras variáveis. O resultado desta multiplicação é então ponderado sobre as probabilidades de X^i ser verdadeiro ou falso. O valor de V_a^i é ajustado de acordo com o fator de desconto e V^{i+1} recebe o maior V_a^i .

Quando o valor de V^i não muda significativamente entre duas iterações o algoritmo para e calcula qual a política que gerou este resultado (Hoey et al. 1999).

4.3 Modelagem do problema

Uma parte importante do desenvolvimento da solução foi a criação de um modelo de descrição do problema que permitisse a criação automática dos problemas de planejamento e a otimização do índice de desempenho através do cálculo dos tempos dos semáforos. Nesta seção descreveremos o modelo desenvolvido.

As variáveis utilizadas para descrever os estados do sistema foram:

- Frequência média de atualização dos veículos, uma medida que reflete a velocidade média dos veículos
- Fase em que cada semáforo se encontra
- Tempo desde a última mudança de fase de cada semáforo

e um exemplo de sua descrição em um arquivo de entrada do sistema SPUDD pode ser encontrado na **Figura 4.3**.

```

(variables
  Fm  (_1, _2, _3, ... , _60) #Frequencia media de
                                     atualizacao dos veiculos
  t1  (_1, _2, _3, ... , _50) #Segundos desde a ultima
                                     mudanca de fase do semaforo 1
  s1  (_1, _2, _3, _4)           #grupo 1 verde e 2 vermelho,
                                     grupo 1 amarelo e 2 vermelho,
                                     grupo 1 vermelho e 2 verde,
                                     grupo 1 vermelho e 2 amarelo
  t2  ...
)

```

Figura 4.2: Exemplo das variáveis utilizadas no arquivo de entrada do sistema SPUDD

As ações que o planejador pode eleger representam combinações das trocas de fase dos diferentes semáforos que compõe a rede. Assim, para uma rede com dois semáforos as ações possíveis são: *naoMudar*, *mudarS1*, *mudarS2* e *mudarS1S2*. Cada ação tenta mudar a fase dos semáforos sobre os quais age, desde que sejam respeitados os conflitos e o tempo de amarelo. Além disso, sempre que há uma mudança de fase o tempo do semáforo é zerado. A **Figura 4.3** representa um exemplo da descrição de uma ação na linguagem de entrada do SPUDD.

Para otimizar o índice de desempenho utilizamos como função objetivo o valor negativo da frequência média e, além disso, fizemos com que as ações incorressem em um custo equivalente à esperança do número de paradas decorrente de cada ação. Desta maneira o planejador calcula para cada situação dos semáforos (fase e tempo em que se encontra na fase) a ação ótima e podemos então descrever os tempos de verde, tempos de ciclo e defasagens.

4.4 Múltiplas resoluções do tempo

Quando tentamos aplicar nossa solução a regiões com mais de um semáforo o rápido crescimento do espaço de estados fez com que o planejador deixasse de ser capaz de resolver o problema. Por entender que em algumas situações a sincronia entre os semáforos é importante para o fluxo de veículos buscamos maneiras de resolver o problema para todos os semáforos da região em estudo.

Foram consideradas duas alternativas para este problema. A primeira consistia em linearizar a malha, como se faz no SIRI, e definir as políticas sequencialmente, realizando novas simu-

```

action actMudarS1
  s1    (trocarS1)                #Verifica condicoes
                                   para trocar S1
  t1    (s1 (_1 (s1' (_1 (padraoT1)) #Troca tempo
                                   (_2 (zerarT1))) #do semaforo 1
                                   ...))
                                   (_2 ...))
  s2    (padraoS2)                #Semaforo 2 segue
  t2    (padraoT2)                #o padrao
  Fm    (s1 (_1 (s1' (_1 (t1 (_1 (Fm (_1 (P1,P2,...,P60))
                                   (_2 ...))))))))))
                                   #Frequencia media muda
                                   de acordo com fases e
                                   tempos, respeitando as
                                   probabilidades obtidas
                                   nas simulacoes
endaction

```

Figura 4.3: Exemplo da ação *mudarS1* no arquivo de entrada do sistema SPUDD

lações para cada semáforo a partir de informações colhidas em simulações com a política já definida para os semáforos anteriores. A segunda alternativa, que foi escolhida por ser mais facilmente automatizada, consiste em realizar planejamentos utilizando intervalos de tempo cada vez menores, mas com uma precisão cada vez maior. Assim, o problema é primeiramente resolvido com um intervalo grande de tempo, esta resolução nos dá um intervalo onde a solução ótima deve estar. A seguir estudamos este intervalo com uma precisão maior, esse procedimento é repetido até que possamos definir a política com o intervalo que desejamos.

Esta solução nos permitiu calcular com precisão a política para problemas com mais de um cruzamento, mas trás um problema. Ao definir os intervalos que devem ser estudados não é possível garantir que a escolha é ótima. Isso acontece porque cada intervalo de tempo representa diferentes momentos para a troca de fase e o planejador escolherá o grupo que tem a melhor performance esperada, que pode não conter o momento ótimo. Como pequenas mudanças tendem a não provocar grandes diferenças no tempo médio de percurso e numero médio de paradas resolvemos desconsiderar este problema. Além disso, esta solução também não garante que as defasagens calculadas são ótimas, uma vez que o sistema não tem informações sobre o ambiente logo após as trocas de fase. O teste realizado com esta abordagem esta descrito na **Seção 5.2** e mostra bons resultados, mas acreditamos que novas opções, como a linearização da

rede, devem ser exploradas.

4.5 Banco de dados

Para realizar o armazenamento das informações das simulações foi criado um banco de dados. Este banco foi desenvolvido sob a plataforma MySQL e armazena, para as diferentes simulações e para os diferentes tempos, a situação dos semáforos, a velocidade média dos veículos e o número de veículos que pararam na última iteração. Além disso, o banco de dados armazena informações estáticas sobre a região, como o número de semáforos e os grupos de controle de cada semáforo. Os problemas de planejamento probabilístico são criados por scripts em python a partir destes dados.

No **Apêndice B** podemos encontrar o modelo de entidades e relacionamentos do banco de dados.

Neste capítulo discutimos o modelo escolhido para descrever o problema de planejamento e o algoritmo SPUDD que foi utilizado como parte do sistema. Também discutimos a modelagem utilizada para a descrição dos problemas e a abordagem de múltiplas resoluções do tempo utilizada para permitir que problemas maiores fossem resolvidos.

A seguir discutiremos os testes realizados para garantir a qualidade do simulador e a qualidade das políticas propostas pelo sistema.

Capítulo 5

Testes

Nesta seção descreveremos os testes realizados durante o trabalho. Foram realizados testes tanto para a validação do modelo de simulação quanto para verificar a qualidade do sistema proposto.

5.1 Validação do simulador

Para a validação do simulador foram usados tanto testes qualitativos (avaliação de comportamentos esperados) quanto testes quantitativos (comparação dos dados do simulador com dados coletados em vias públicas).

5.1.1 Testes qualitativos

Nestes testes buscamos verificar alguns dos comportamentos comumente observados no tráfego de veículos e descritos na literatura.

As **Figuras 5.1-5.7** mostram capturas de tela da interface gráfica do simulador que representam algumas das características observadas durante os testes. Estas figuras obedecem à convenção descrita a seguir. Os círculos grandes representam os veículos e os círculos pequenos representam a sua direção e sentido. As cores dos círculos são aleatórias, exceto pela cor branca que indica que o veículo está parado. A frequência de atualização de cada veículo (que varia de 1 a 6) está representada como um número abaixo e à esquerda de cada veículo. Cada quadrado representa uma célula do autômato celular. Os quadrados cinzas representam as ruas, os marrons as áreas onde veículos não devem trafegar e os demais (verdes, amarelos e vermelhos) regiões controladas por semáforos e a sua situação atual.

Slow to start

Quando um semáforo abre é comum que exista uma demora até que os veículos voltem a andar. No nosso modelo esse comportamento foi observado com uma demora que varia de 0 a 1 segundo entre um veículo e o veículo que está logo atrás, esse valor está de acordo com observações de campo (Ming 2001). A **Figura 5.1** ilustra esse comportamento.

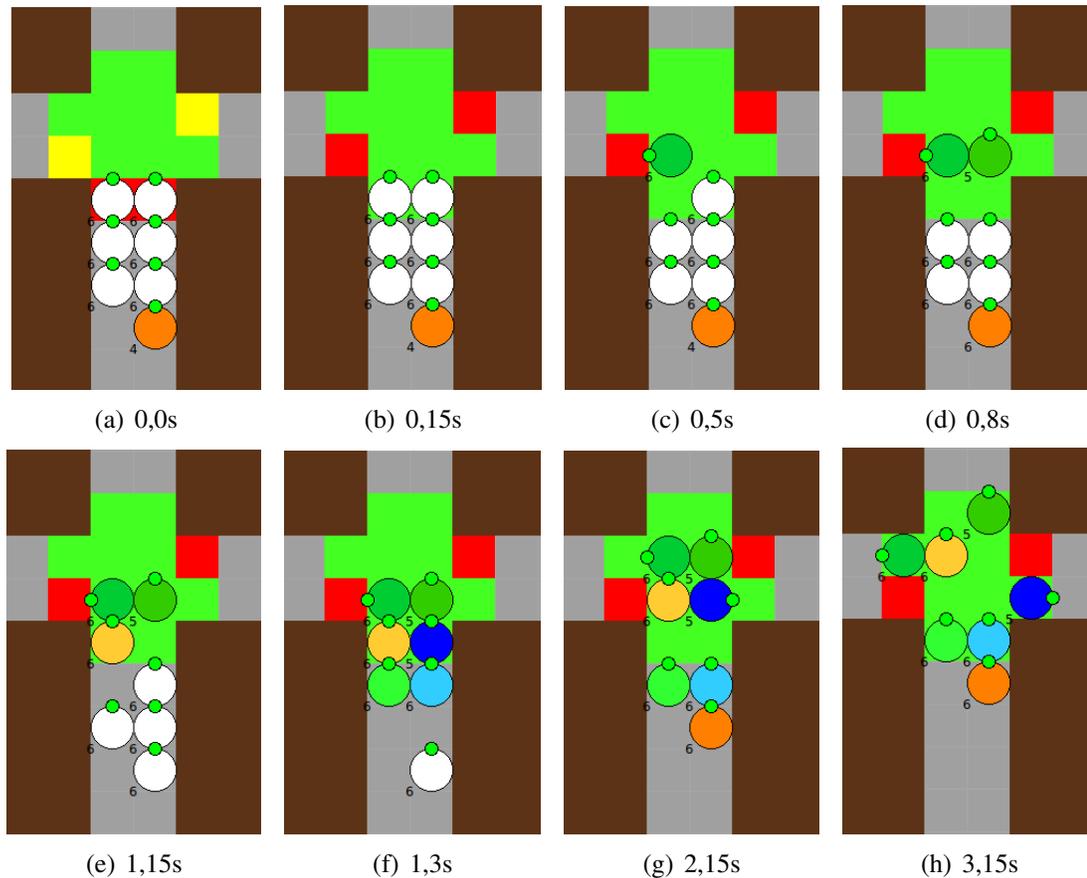


Figura 5.1: Série que mostra os veículos começando a andar após a abertura do semáforo

Troca de faixa

Outro comportamento comumente observado é a troca de faixas quando um veículo que segue outro gostaria de ir mais rápido, ou percebe a oportunidade de sair de trás de uma fila. No nosso modelo este comportamento pode ser observado e os veículos dão preferência à ultrapassagem pela esquerda. Entretanto, uma falha da implementação atual de nosso modelo é que quando dois veículos estão andando com velocidades similares o de trás ignora a possibilidade de mudar de faixa. A **Figura 5.2** mostra veículos que chegam a um alargamento da pista e se realocam

para aproveitar melhor as faixas.

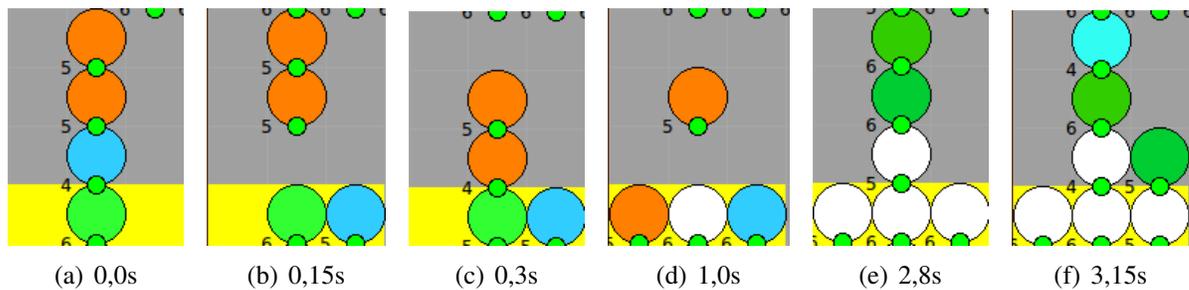


Figura 5.2: Série que mostra o comportamento de troca de faixas quando os veículos encontram um veículo parado à sua frente

Ondas Stop and Go

Um fenômeno menos intuitivo, mas muitas vezes observado é o das ondas *stop-and-go* (Helbing 2001, Laval e Leclercq 2010). Essas ondas são normalmente geradas por pequenos distúrbios no fluxo de veículos e se propagam no sentido contrário ao fluxo de veículos. A **Figura 5.3** mostra uma dessas ondas desencadeada por uma freada exagerada do primeiro veículo verde. Na versão corrente do simulador podemos observar este comportamento, mas o critério para detecção de paradas está mais estrito e, portanto, o simulador não considera que os veículos chegaram a parar. Este critério mais estrito foi escolhido para que os dados do simulador pudessem ser comparados com os dados coletados.

Comportamento nos semáforos

Durante o desenvolvimento deste trabalho tivemos uma atenção especial ao descrever o comportamento dos veículos nos cruzamentos controlados por semáforos. Como resultado, podemos observar que as simulações refletem bem esse comportamento. Na **Figura 5.4** podemos observar diferentes situações e as respostas dos veículos. As **Figuras 5.4(a)** e **5.4(b)** mostram um veículo aguardando que o veículo que vem no outro sentido passe para que ele possa passar, as **Figuras 5.4(c)** e **5.4(d)** mostram um veículo aguardando que o veículo à sua esquerda passe para que ele possa completar a conversão e as **Figuras 5.4(e)** e **5.4(f)** mostram um veículo que percebe que a distância do veículo que vem no outro sentido é suficiente para que ele possa continuar seu movimento.

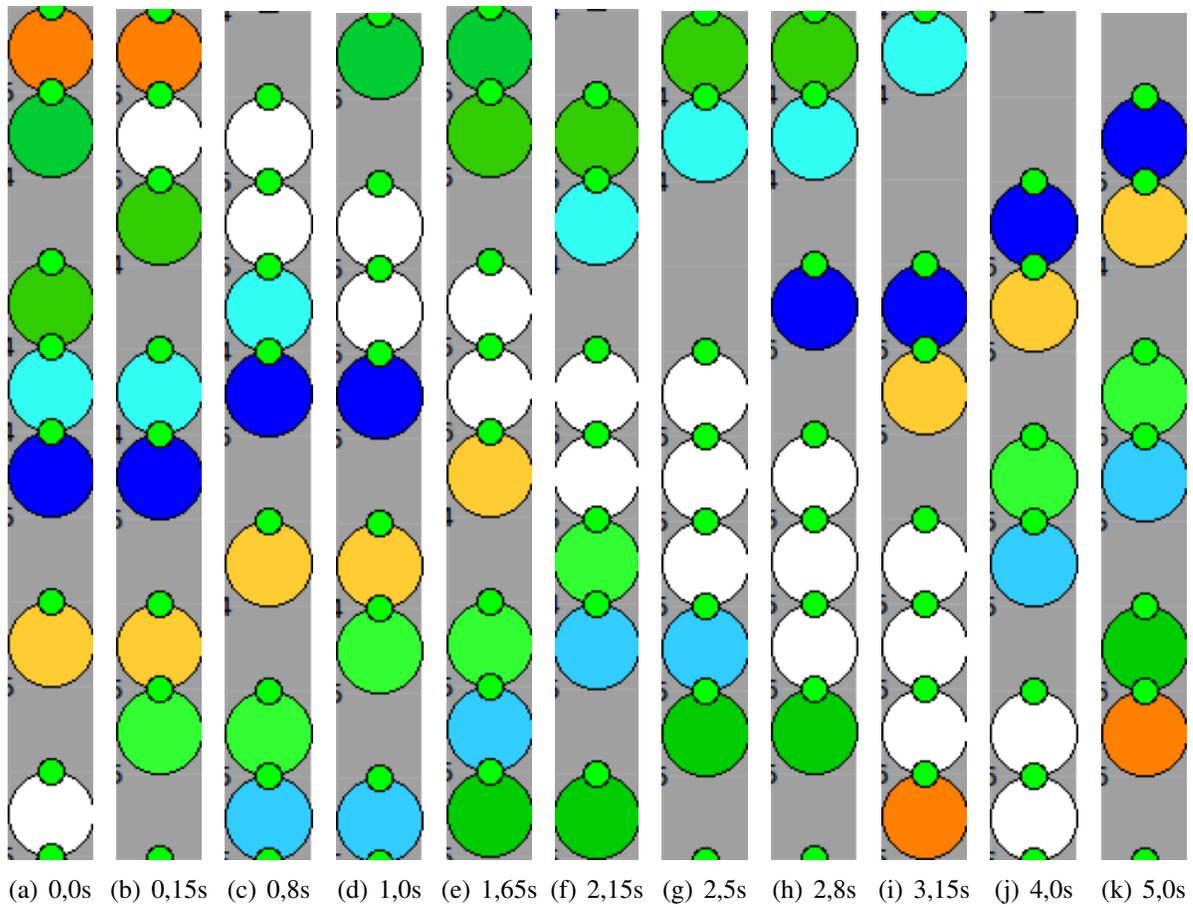


Figura 5.3: Série que mostra o fenômeno das ondas Stop and Go. Nesse caso a onda foi iniciada por uma freagem excessiva do primeiro veículo verde na primeira imagem

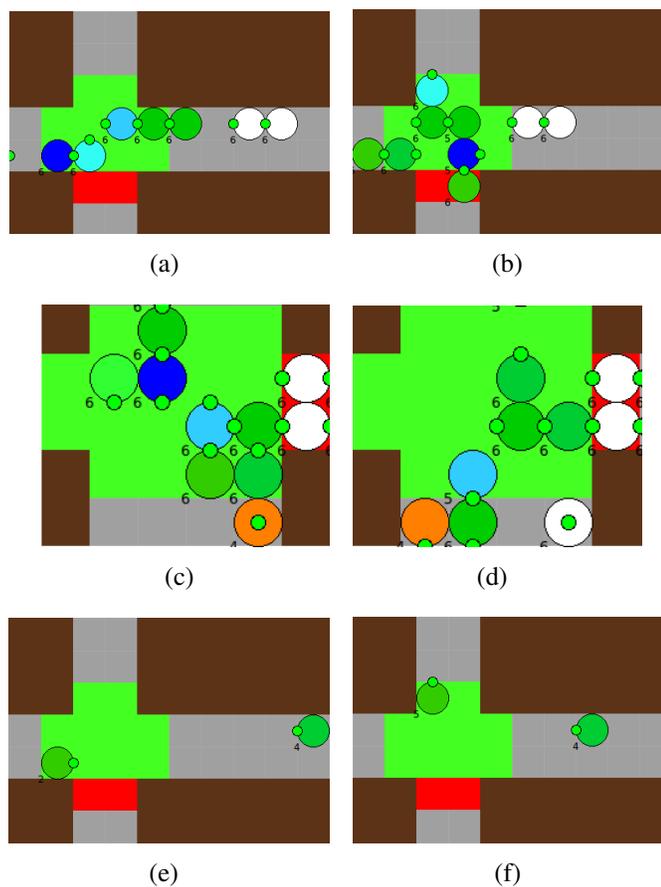


Figura 5.4: Diferentes comportamentos dos veículos em um semáforo. As figuras (a) e (b) mostram um veículo que espera os veículos que vêm no outro sentido para poder realizar uma conversão; as figuras (c) e (d) mostram um veículo que espera os veículos à sua esquerda passarem para poder realizar uma conversão; as figuras (e) e (f) mostram um veículo que realiza uma conversão antes que o veículo que vem no outro sentido chegue

5.1.2 Testes quantitativos

Os dados inicialmente coletados junto à Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo não puderam ser utilizados porque retratavam regiões controladas por semáforos atuados. Usamos então três conjuntos de dados, um deles disponível para consulta (Smilowitz et al. 1999) e dois levantados durante a pesquisa de campo. Os dados disponibilizados por Smilowitz et al. referem-se a um segmento de estrada de comprimento de quatro milhas com uma faixa em cada sentido, localizado na Califórnia. Eles levantaram dados do tempo de chegada de cada um dos veículos (em apenas um sentido) a cada um dos oito diferentes pontos de controle. Nosso dados foram coletados em duas regiões diferentes:

- Cruzamento da Rua Doutor Gabriel dos Santos com a Alameda Barros, no bairro de Higienópolis, em São Paulo
- Avenida Lavandisca entre as ruas Tuim, Inhambú e Canário, no bairro de Moema, em São Paulo

As **Figuras 5.5** e **5.6** representam a topografia das regiões estudadas, bem como as conversões possíveis e os grupos semaforicos de cada intersecção. Nas duas regiões coletamos dados sobre a taxa de chegada de veículos, as *taxas de conversão*, o tempo de percurso entre a entrada e saída do sistema e número de paradas. Estes dados podem ser encontrados no **Apêndice D**.

Taxa de chegada

Para calcular a tempo até a chegada de novos veículos utilizamos uma distribuição gama (Papoulis 1991), com os parâmetros calculados a partir dos dados de entrada. A **Figura 5.7** mostra o afluxo e efluxo de veículos na estrada de uma faixa descrita nos dados de *Smilowitz*, foram escolhidos os gráficos que representam o melhor e o pior resultado obtidos em uma sequência de cinco simulações. Além de podermos verificar que a taxa de chegada de veículos é condizente com a observada por *Smilowitz* a distância entre as linhas de afluxo e efluxo nos mostram que o tempo das viagens simuladas é coerente com o tempo observado, uma vez que não há a possibilidade de ultrapassagens.

No teste realizado com os dados da Alameda Barros também comparamos a taxa de afluxo do simulador com a dos dados recolhidos. A **Tabela 5.1** mostra que os resultados obtidos em vinte simulações de dez minutos foram condizentes com os observados.

Taxa de conversão

Também utilizamos os dados colhidos na Alameda Barros para testar se a simulação respeitava as taxas de conversão descritas no arquivo de entrada. Nas **Tabelas 5.2** e **5.3** podemos ver que as taxas calculadas são condizentes com os dados colhidos.

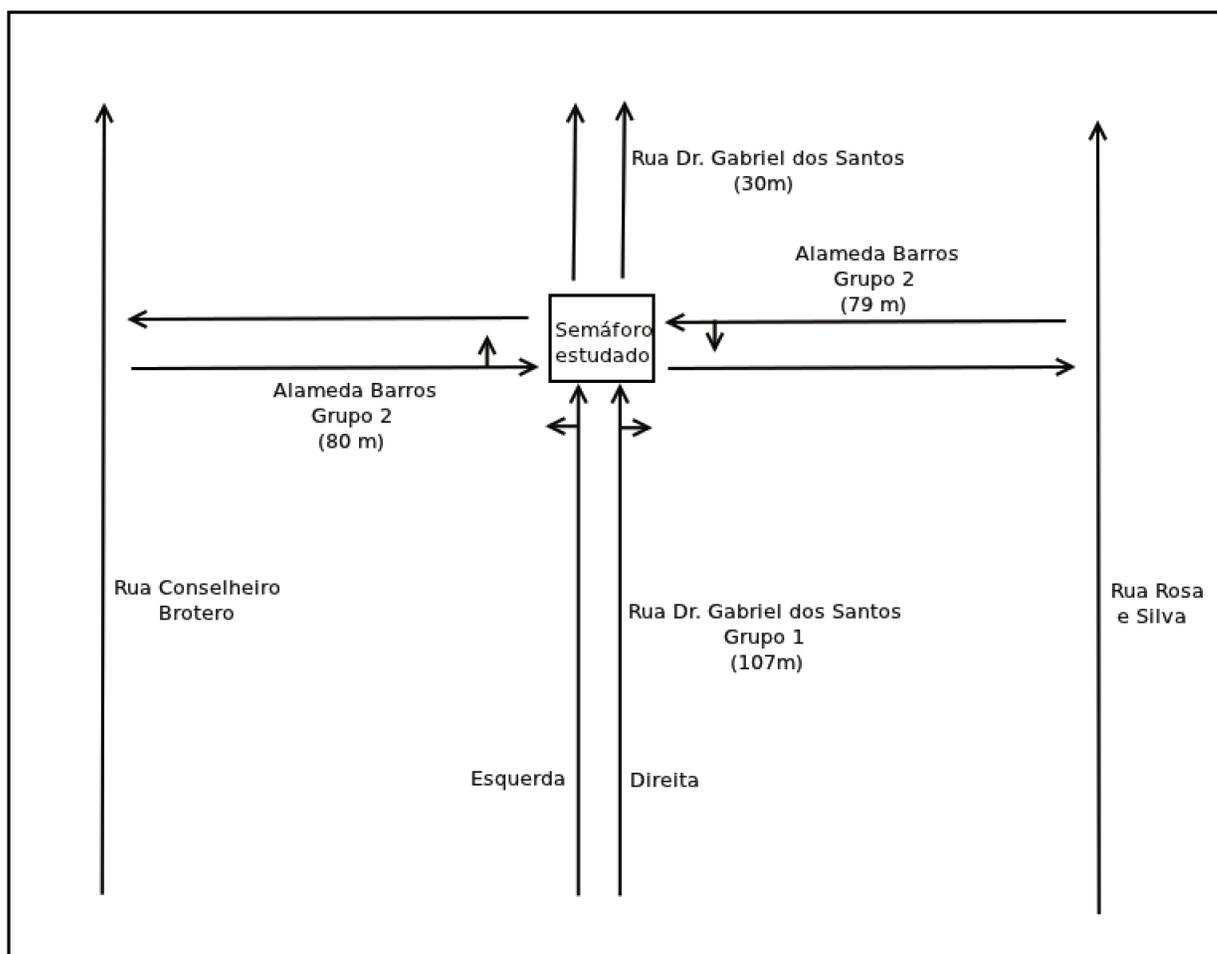


Figura 5.5: Ilustração da topografia do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos

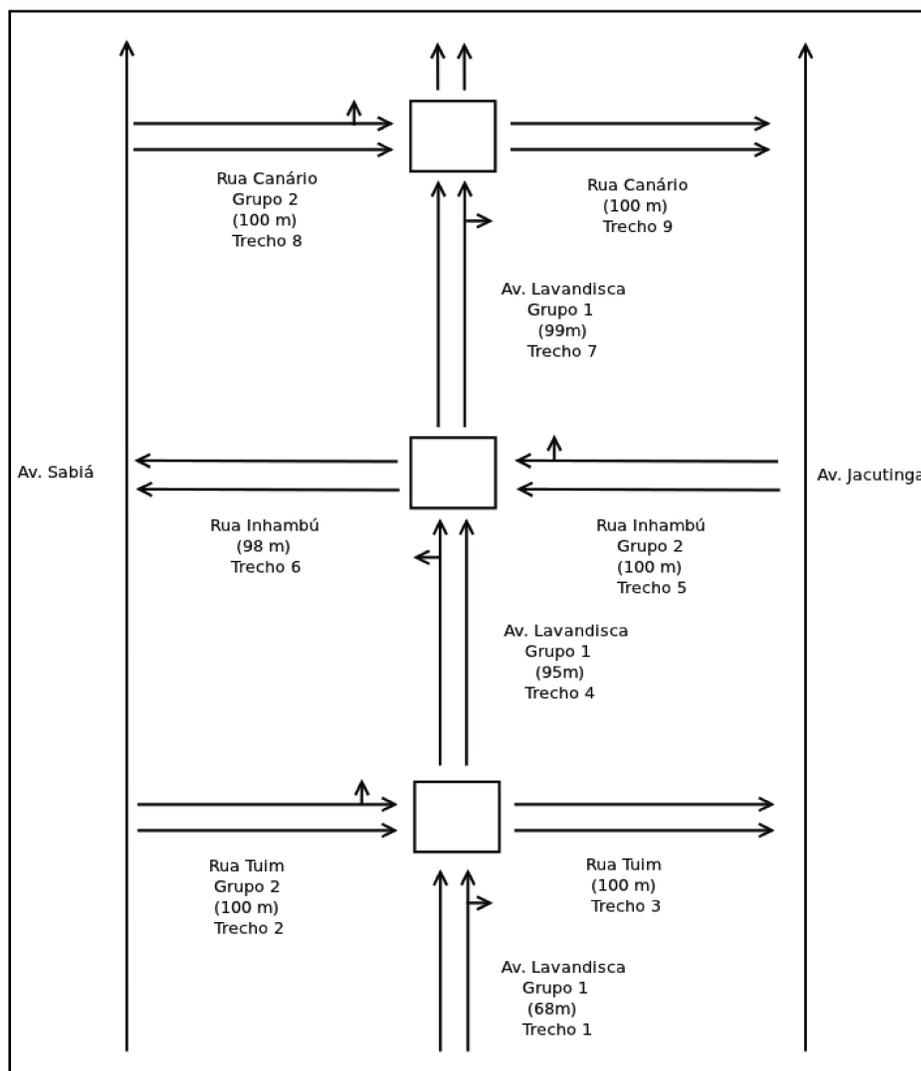


Figura 5.6: Ilustração da topografia dos cruzamentos estudados na região da Av. Lavandisca

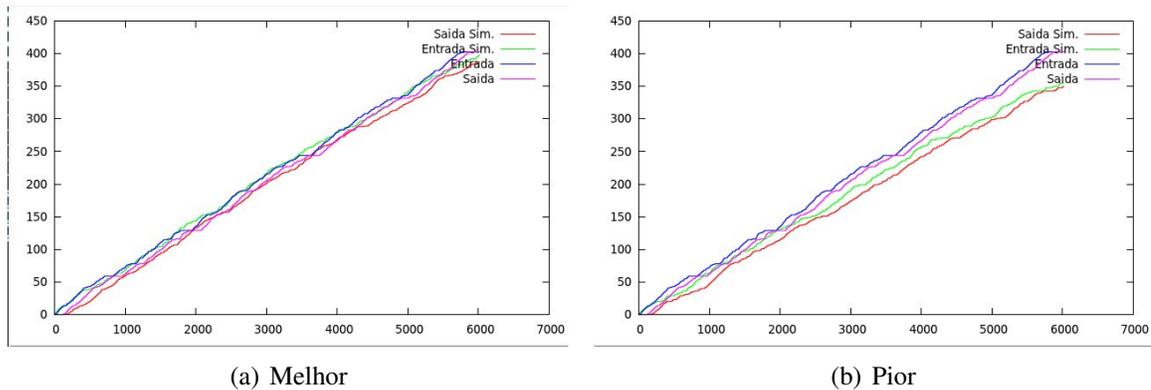


Figura 5.7: Número de veículos X iterações do simulador para afluxo e efluxo de veículos em um período de 15 minutos. Os gráficos mostram o melhor e o pior resultado do simulador em cinco diferentes simulações

Velocidade média e número de paradas

Outro teste importante foi o da comparação das velocidades médias e do número médio de paradas dos veículos. Este teste é importante, porque esses dois parâmetros são usados como métrica da eficiência do fluxo de veículos. As Tabelas 5.4 e 5.5 comparam o tempo médio de percurso e o número médio de paradas observados com os resultados obtidos nas simulações das duas regiões.

Podemos ver que o tempo médio dos veículos e o número de paradas estão de acordo com o observado. A diferença observada para o tempo médio de percurso foi de 1,01s (2,09%) e para o número de paradas foi de 0,024 paradas/veículo (0,024%).

Como era de se esperar, ao simularmos uma região com mais semáforos o erro foi maior. Ainda assim, os dados mostram uma boa precisão do simulador, com uma diferença de 1,89s (4,41%) no tempo médio e de 0,066 paradas/veículo (8,40%).

Tabela 5.1: Comparação do afluxo de veículos a cada dez minutos na região da Al. Barros (observado e simulado)

Dados	Total de veículos			
	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	203,67	20,08	173	243

Tabela 5.2: Comparação das taxas de conversão dos veículos da Al. Barros no cruzamento com a R. Dr. Gabriel dos Santos (observadas e simuladas)

Al. Barros (a partir da R. Rosa e Silva)								
Sentido	Direita				Em Frente			
Dados	26%				74%			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	25,85%	0,018	23,20%	27,85%	74,15%	0,018	72,15%	76,80%
Al. Barros (a partir da R. Cons. Brotero)								
Sentido	Esquerda				Em Frente			
Dados	24%				76%			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	20,15%	0,015	17,89%	21,50%	79,85%	0,015	78,50%	82,11%

Tabela 5.3: Comparação das taxas de conversão dos veículos da R. Dr. Gabriel dos Santos no cruzamento com a Al. Barros (observadas e simuladas)

R. Dr. Gabriel dos Santos, faixa da esquerda												
Sentido	Esquerda				Em Frente				Direita			
Dados	66%				33%				1%			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	64,61%	0,046	57,96%	69,72%	34,33%	0,044	29,58%	40,76%	1,06%	0,003	0,65%	1,42%
R. Dr. Gabriel dos Santos, faixa da direita												
Sentido	Esquerda				Em Frente				Direita			
Dados	0%				32%				68%			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	0,00%	0	0,00%	0,00%	30,98%	0,019	28,77%	32,91%	69,02%	0,019	67,09%	71,23%

Tabela 5.4: Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas na região do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos (observados e simulados)

	Tempo médio				Média de paradas (<i>paradas/veículo</i>)			
Dados	48,38				0,987			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	49,39	1,11	47,06	51,53	0,963	0,048	0,867	1,08

Tabela 5.5: Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas na região da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário (observados e simulados)

	Tempo médio				Média de paradas (<i>paradas/veículo</i>)			
Dados	42,80				0,788			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Simulação	40,91	0,99	39,19	43,18	0,855	0,029	0,806	0,925

5.1.3 Discussão dos resultados

O simulador apresentou bons resultados tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Ainda há alguns comportamentos que não estão de acordo com o que se espera, como as ultrapassagens, mas os testes quantitativos mostram que a qualidade das simulações é boa.

5.2 Eficiência do sistema

Além de testar a qualidade das simulações testamos a qualidade das políticas devolvidas pelo sistema. Esse teste foi feito com base nos dados recolhidos durante este trabalho sobre o cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos e sobre a Av. Lavandisca nos cruzamentos com as Ruas Tuim, Inhabú e Canário.

5.2.1 Alameda Barros x Rua Dr. Gabriel dos Santos

Para a realização do teste executamos a simulação 500 vezes e armazenamos os resultados na base de dados. O módulo de extração dos dados gerou um arquivo de entrada para o planejador que devolveu uma política de acordo com a velocidade média dos veículos, o tempo desde a última troca de estados do semáforo, e o estado dos semáforos.

A **Figura 5.8** mostra a parte relevante do grafo que representa a política devolvida pelo planejador, selecionada de acordo com a velocidade média dos veículos na condição atual do semáforo. O nó *Frequência média* indica a frequência média de atualização dos veículos, o nó *Tempo* indica o tempo desde a última mudança do semáforo e os nós *Estado* indicam o estado dos semáforos. As arestas marcadas *G. dos Santos* indicam que o semáforo está aberto para o fluxo na Rua Gabriel dos Santos e as marcadas com *Al. Barros* indicam que o semáforo está aberto para o fluxo da Al. Barros.

A partir desse grafo podemos descrever a política de tempos proposta para o semáforo (**Tabela 5.6**). Os tempos devolvidos pelo planejador estão de acordo com o padrão de tempos mínimos de semáforos, entre 10 e 15 segundos (Denatran 1984). Além disso, sempre é possível comparar a política com o tempo de verde de segurança e considerar apenas as sugestões para tempos maiores do que eles.

Tabela 5.6: Política de tempos do semáforo devolvida pelo planejador para o cruzamento da Al. Barros com a R. Gabriel dos Santos

	Al. Barros	Gabriel dos Santos
Verde	11	12
Amarelo	3	3
Vermelho	15	14

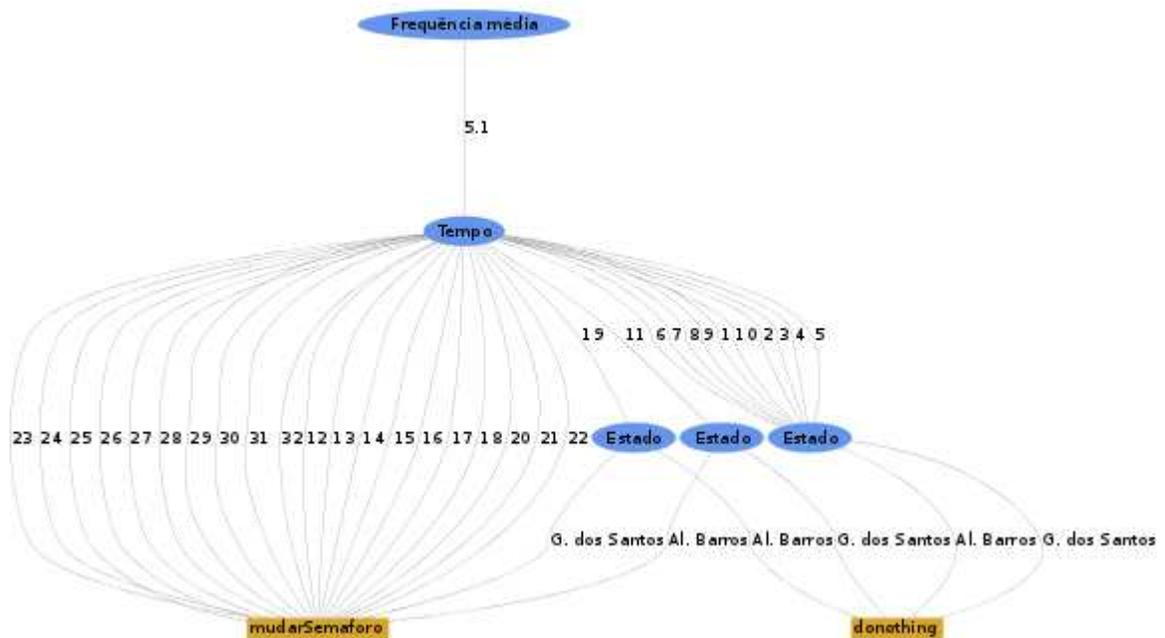


Figura 5.8: Parte do grafo que representa a política devolvida pelo planejador

Os tempos de semáforos curtos estão de acordo com as observações feitas durante o levantamento de dados, já que uma boa parcela do tempo de verde era ocioso. Realizamos vinte simulações com a política proposta pelo planejador; os resultados do tempo médio de percurso e do número médio de paradas estão na **Tabela 5.7**, bem como a média dos resultados das simulações com a política atual e os resultados observados em campo.

A **Tabela 5.7** mostra um ganho médio de $9,14$ segundos em relação às simulações realizadas com a política atual do semáforo, uma diferença equivalente a $18,51\%$ do tempo médio. O número médio de paradas permaneceu praticamente inalterado, com uma diferença de $0,003$ paradas/veículo ($0,28\%$). Para garantir que estes resultados eram significativos realizamos um teste t não pareado com 20 amostras para cada política, os resultados estão na **Tabela 5.8** e mostram que a diferença entre os tempos médios de percurso com as duas políticas é significativa, mas que o ganho em relação ao número de paradas não é.

Tabela 5.7: Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas observados no cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos e simulados com a política proposta pelo planejador

	Tempo médio				Média de paradas			
Dados	48,38				0,987			
Simulação	49,39				0,963			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Nova política	40,25	1,03	38,55	41,59	0,961	0,036	0,894	1,02

Tabela 5.8: Resultados do teste t não pareado aplicado aos resultados de 20 simulações com a política atual e a política proposta. A hipótese alternativa é de que a diferença entre as médias é diferente de 0

Tempo médio de percurso			Número médio de paradas		
p-valor	Diferença entre médias (95%)		p-valor	Diferença entre médias (95%)	
	<i>segundos</i>	<i>%</i>		<i>paradas/veículo</i>	<i>%</i>
$2,2e - 16$	8,45 - 9,83	17,10 - 19,90	0,8385	-0,024 - 0,029	-2,5 - 3,0

5.2.2 Avenida Lavandisca

Para este teste foram realizadas 2000 simulações e foram gerados dois problemas de planejamento. O primeiro agrupava o tempo em intervalos de 5 segundos e a resposta deste problema foi utilizada para definir os limites de tempo do segundo problema, que usou intervalos de tempo de um segundo, de acordo com a proposta descrita na **Seção 4.4**. Nos dois problemas e nas simulações os três semáforos foram considerados simultaneamente. A **Tabela 5.9** mostra a política devolvida pelo planejador para o segundo problema.

A **Tabela 5.10** mostra o resultado de vinte simulações realizadas com a política proposta pelo planejador, bem como a média dos resultados das simulações com a política atual e os resultados observados em campo.

A nova política apresentou bons ganhos em relação ao plano atualmente em uso, 5,53s (13,51%), e os resultados do teste t apresentados na **Tabela 5.11** indicam que esta diferença é significativa. Houve também redução no número médio de paradas equivalente a 0,124 *paradas/veículo* (14,51%).

Tabela 5.9: Política de tempos do semáforo devolvida pelo planejador para os cruzamentos da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário

	Av. Lavandisca	R. Tuim	Av. Lavandisca	R. Inhambú	Av. Lavandisca	R. Canário
Verde	26	26	27	25	27	25
Amarelo	3	3	3	3	3	3
Vermelho	29	29	28	30	28	30

Tabela 5.10: Comparação do tempo médio de percurso e número médio de paradas observados nos cruzamentos da Av. Lavandisca com as Ruas Tuim, Inhambú e Canário e simulados com a política proposta pelo planejador

	Tempo médio				Média de paradas			
Dados	42,80				0,788			
Simulação	40,91				0,855			
	Média	σ	Mínimo	Máximo	Média	σ	Mínimo	Máximo
Nova política	35,38	0,55	34,46	36,26	0,731	0,019	0,703	0,762

Tabela 5.11: Resultados do teste t não pareado aplicado aos resultados de 20 simulações com a política atual e a política proposta. A hipótese alternativa é de que a diferença entre as médias é diferente de 0

Tempo médio de percurso			Número médio de paradas		
p-valor	Diferença entre médias (95%)		p-valor	Diferença entre médias (95%)	
	<i>segundos</i>	<i>%</i>		<i>paradas/veículo</i>	<i>%</i>
$2,2e - 16$	5,01 - 6,04	12,25 - 14,76	$2,2e - 16$	0,108 - 0,140	12,63 - 16,37

5.2.3 Discussão dos resultados

A solução proposta apresentou bons resultados, com redução do tempo de percurso em 18,51% na região do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos e 13,51% na região estudada da Av. Lavandisca. Não foram realizadas comparações diretas com outros métodos de otimização de tempos de verde, porque estes necessitam de dados diferentes que não foram coletados nos mesmos momentos em que coletamos os dados necessários para o uso do sistema. Apesar do impacto de cada método apresentar uma grande variação de acordo com a região e o horário estudados vemos que os resultados obtidos com o nosso sistema são comparáveis aos obtidos com outros sistemas. O SCOOT, por exemplo, que só é instalado em situações em que o seu impacto é suficientemente grande reduz o tempo de percurso em 12% na média (TRL Limited 2008).

Outro benefício do nosso sistema é o uso de um número pequeno de dados, que são facilmente coletados. Para colher dados suficientes para que o sistema calculasse os tempos de um semáforo para todos os períodos do dia seriam necessárias cerca de 16 *horas * homem*. Para efeito de comparação, o sistema TRANSYT requer de uma a duas *semanas * homem* para a coleta de dados de um semáforo ao longo do dia (Robertson 1986).

Para calcular o benefício econômico gerado pelo uso da nova política no horário estudado usamos o valor de $US\$4,00/hora * veiculo$, como descrito por Mazzamatti et al.. O benefício econômico anual foi calculado de acordo com a equação:

$$\text{Benefício} = \text{dias úteis} * \text{fluxo} * \text{custo} * \text{tempo economizado}, \quad (5.1)$$

em que custo é o custo por hora de cada veículo parado, utilizamos 250 como o número de dias úteis em um ano e o menor valor do intervalo de confiança de 95% como tempo economizado. É importante notar que essa extrapolação não considera o fato de que os resultados podem variar muito ao longo da semana.

No cruzamento da Al. Barros o fluxo médio de veículos é de 1212 *veiculos/hora* e o tempo médio economizado por veículo foi de 8,45 *segundos*. Com isso chegamos a um valor de *US\$2844/ano* utilizando-se a nova política uma hora por dia.

Na região estudada da Avenida Lavandisca temos um fluxo médio de 1746 *veiculos/hora* e o tempo médio economizado por veículo foi de 5,01 *segundos*. Com isso chegamos a um valor de *US\$2430/ano* utilizando-se a nova política uma hora por dia.

O custo do cálculo das políticas para o funcionamento de um semáforo ao longo da semana pode ser aproximado levando-se em conta o salário médio de um agente de pesquisa da CET-SP (*R\$2.796,95*), calculado a partir do demonstrativo de pagamentos¹, e multiplicando-o pelo número de horas necessárias para a coleta de dados (*16 horas/dia * 5 dias*). Assim, chegamos a um custo de *R\$1398* para a coleta dos dados necessários para o cálculo das políticas.

Deve-se considerar que essas políticas podem ser utilizadas em outros horários e que novas políticas podem ser calculadas, com pouco custo, tanto para esse quanto para outros semáforos. Essa possibilidade aponta para o potencial do sistema desenvolvido neste trabalho de mestrado.

¹Disponível em: <http://cetssp1.cetssp.com.br/demopag/cargosalario.asp>

Capítulo 6

Trabalhos futuros

Desenvolvemos um sistema capaz de calcular boas políticas para o controle de semáforos, mas ainda há importantes possibilidades de melhorias, como a inclusão do tráfego de pedestres nas simulações e a utilização do novo padrão de linguagem de planejamento probabilístico, a linguagem rddl (Sanner 2010). A seguir descrevemos alguns pontos importantes que podem ser desenvolvidos em cada módulo.

6.1 Simulador de multidões

Abaixo listamos algumas das novas capacidades que podem ser implementadas no simulador para melhorar a qualidade das simulações e permitir que ele seja aplicado a uma gama maior de cenários:

- Simulação de semáforos atuados (parcialmente implementado)
- Simulação de pedestres e semáforos de pedestres, com controle de botoeira ou não
- Simulação de diferentes tipos de veículos (como caminhões e ônibus)
- Tratamento de colisões (atualmente as colisões são detectadas, mas não tratadas)
- Simulação de cruzamentos não controlados por semáforos e rotatórias
- Mudança de faixa quando o veículo a frente está em movimento

6.2 Planejador probabilístico

O principal problema do módulo do planejador probabilístico foi a incapacidade de lidar com a explosão no número de estados do problema. Na versão mais precisa do sistema cada semáforo

adicionado multiplica por 200 o número de estados que devem ser considerados. O planejador utilizado só é capaz de tratar de problemas com até 50 milhões de estados o que tornou necessário o uso das múltiplas resoluções de tempo.

Um ponto interessante a ser pesquisado é a escolha de um planejador que considere a velocidade média dos veículos ao calcular as políticas, mas que devolva uma política independente da velocidade média dos veículos, uma vez que o semáforo não tem acesso a essas informações. Para isso podem ser estudados outros modelos de planejamento, como os Processos markovianos de decisão parcialmente observáveis (*Partially Observable Markovian Decision Processes* - POMDPs).

Outro passo que pode diminuir o tamanho do espaço de estados e aumentar a qualidade das políticas é a capacidade de ignorar os resultados do simulador enquanto a rede de ruas ainda não está com a sua ocupação normal. Uma maneira simples de realizar esta implementação é a definição de um intervalo inicial de tempo que deve ser ignorado, como é feito no SIRI.

Também acreditamos que devam ser estudadas novas maneiras para o cálculo de políticas em regiões com mais de um semáforo, como a linearização da malha e a separação do cálculo dos tempos de verde e intervalos entre semáforos.

Capítulo 7

Conclusão

Ao longo deste trabalho de mestrado desenvolvemos um sistema capaz de calcular boas políticas para o controle de semáforos a partir de informações facilmente coletadas sobre a região que deve ser estudada. Nossa solução reúne ferramentas da área de simulação de multidões e da área de planejamento probabilístico o que reduz a necessidade de especialistas na coleta e análise de dados.

Acreditamos que a combinação dos recursos oferecidos por essas duas áreas é particularmente interessante para problemas onde a coleta de dados é cara ou difícil e que a abordagem modular do sistema permite que os rápidos avanços das duas áreas sejam facilmente aproveitados.

Nos casos estudados conseguimos uma redução de 18,51% e 13,51% no tempo médio de percurso dentro da região estudada, um bom resultado quando comparado aos outros sistemas desenvolvidos para esse fim. Uma análise simples mostrou que as novas políticas podem trazer benefícios econômicos de $US\$5274 / ano$ mesmo quando utilizadas apenas uma hora por dia nestes quatro semáforos.

O desenvolvimento do simulador de multidões apresentou diversos desafios, principalmente pela constante preocupação em descrever detalhadamente a interação entre os veículos e os cruzamentos, mas os testes mostraram que as simulações foram capazes de representar bem as situações observadas.

Outra dificuldade encontrada no sistema foi o rápido crescimento do tamanho do espaço de estados de planejamento, à medida que novos semáforos são adicionados (cada semáforo multiplica por aproximadamente 200 o número de estados). Uma das vantagens da modularização do sistema, buscada ao longo de seu desenvolvimento, é que quando novos planejadores forem desenvolvidos com capacidade para tratar problemas maiores, eles podem ser facilmente incorporados ao sistema.

O sistema desenvolvido proporciona uma maneira prática e barata de se desenvolver novas políticas para semáforo de tempo fixo, permitindo uma redução nos tempos médios de percurso

e nos custos com tráfego sem que seja necessária a instalação de sensores ou de computadores capazes de calcular políticas em tempo real.

Apêndices

Apêndice A

Diagrama UML do simulador

A **Figura A.1** mostra o diagrama UML de classes do simulador de multidões desenvolvido durante este trabalho, uma versão digital dessa figura pode ser encontrada em <http://www.students.ic.unicamp.br/~ra098346/uml.png>. Mais informações sobre as classes e funções podem ser encontradas em <http://www.students.ic.unicamp.br/~ra098346/doc/>.

Apêndice B

Banco de dados

A **Figura B.1** mostra o diagrama de entidade-relacionamento do banco de dados utilizado para o armazenamento das informações colhidas pelo simulador e descrição dos problemas de planejamento.

Apêndice C

Linguagem de descrição de mapas

Neste apêndice temos a descrição XSD que mostra como devem ser os arquivos XML, usados como entrada para o simulador de multidões.

```
<?xml version="1.0">
<xs:schema elementFormDefault="qualified"
            xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">

  <xs:complexType name="Direction">
    <xs:simpleContent>
      <xs:restriction base="xs:string">
        <xs:enumeration value="d"/>
        <xs:enumeration value="l"/>
        <xs:enumeration value="r"/>
        <xs:enumeration value="u"/>
        <xs:enumeration value="dl"/>
        <xs:enumeration value="dr"/>
        <xs:enumeration value="du"/>
        <xs:enumeration value="lr"/>
        <xs:enumeration value="lu"/>
        <xs:enumeration value="ru"/>
        <xs:enumeration value="dlr"/>
        <xs:enumeration value="dlu"/>
        <xs:enumeration value="dru"/>
        <xs:enumeration value="lru"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="Position">
    <xs:simpleContent>
      <xs:restriction base="xs:string">
        <xs:pattern value="([0-9])+ ([0-9])+"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleContent>
  </xs:complexType>

```

```

<xs:complexType name="TIPosition">
  <xs:simpleContent>
    <xs:restriction base="xs:string">
      <xs:pattern value=" ([0-9])+ ([0-9])+ (, ([0-9])+
        ([0-9]))*" />
    </xs:restriction>
  </xs:simpleContent>
</xs:complexType>

<xs:simpleType name="ControlPosition">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:pattern base=" (\ [ \|[0-9]+ , ([0-9])+\]
      (, [ \|[0-9]+ , ([0-9])+\])* \])+" />
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="ControlType">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="timed" />
    <xs:enumeration value="reactive" />
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:complexType name="ControlGroups">
  <xs:simpleContent>
    <xs:extension base="ControlPosition">
      <xs:attribute name="groupCount"
        type="xs:integer" />
    </xs:extension>
  </xs:simpleContent>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ControlRule">
  <xs:simpleContent>
    <xs:extension base="xs:string">
      <xs:attribute name="group" type="xs:integer" />
    </xs:extension>
  </xs:simpleContent>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="TIControl">
  <xs:sequence>
    <xs:attribute name="type" type="ControlType" />
    <xs:element name="groups" type="ControlGroups" />
    <xs:element name="rule" type="ControlRule"
      maxOccurs="unbounded" />
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:element name="map">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:attribute name="width" type="xs:integer" />
      <xs:attribute name="height" type="xs:integer" />
      <xs:choice minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
        <xs:element name="street">

```

```
<xs:complexType>
  <xs:all>
    <xs:element name="direction" type="Direction"/>
    <xs:element name="position" type="Position"/>
    <xs:element name="maxSpeed" type="xs:integer"/>
    <xs:element name="meanSpeed" type="xs:integer"/>
    <xs:element name="controled" type="xs:boolean"/>
    <xs:element name="source" type="xs:boolean"/>
    <xs:element name="sink" type="xs:boolean"/>
  </xs:all>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="trafficLight">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element name="position" type="TIPosition"/>
      <xs:element name="control" type="TIControl"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:choice>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>
```

Apêndice D

Dados levantados

D.1 Alameda Barros x R. Doutor Gabriel dos Santos

Neste apêndice descreveremos os dados levantados durante a pesquisa no cruzamento entre a Alameda Barros e a Rua Doutor Gabriel dos Santos, no bairro de Higienópolis, em São Paulo. Os dados foram levantados em duas visitas ao local na mesma faixa de horário (17-18hs), em uma terça-feira e em uma quinta-feira do mês de julho. O movimento de veículos nas duas visitas foi similar.

D.1.1 Topografia

Para descrever o cruzamento levantamos dados sobre a topografia das regiões estudadas, bem como as conversões possíveis e os grupos semaforicos de cada intersecção. Estes dados estão representados na **Figura D.1**.

D.1.2 Tempos de chegada

Para calcular a taxa de chegada de novos veículos no ambiente medimos, em um intervalo de dez minutos, os tempos de chegada de cada um dos veículos. A partir desses dados pudemos calcular o intervalo entre a chegada dos veículos e a média e a variância desses intervalos. Esses valores foram fornecidos para o simulador, que cria distribuições gama para descrever a chegada de novos veículos no ambiente. Os tempos medidos se encontram na **Tabela D.1**.

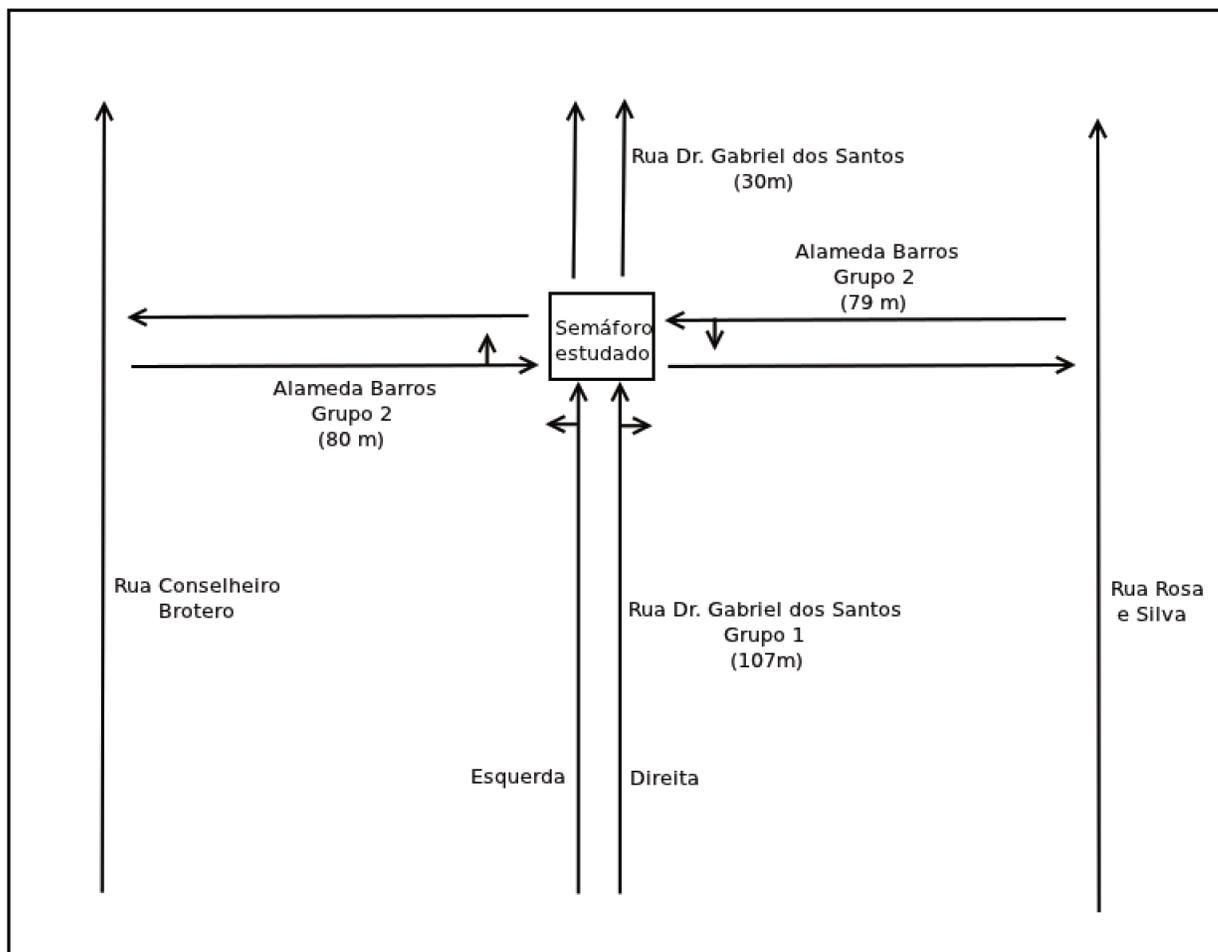


Figura D.1: Ilustração da topografia do cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos

Tabela D.1: Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos

Gabriel dos Santos				Al.Barros (CB)	Al. Barros (RS)	
4	1	2	1	7	6	2
1	22	3	26	2	5	3
9	3	2	4	3	3	57
11	1	2	0	6	23	4
7	2	3	3	3	68	11
13	4	7	2	2	2	14
9	13	2	3	87	2	5
3	5	3	8	2	4	10
11	0	3	2	7	18	62
12	2	1	1	3	5	4
12	4	3	3	5	2	1
5	5	22	2	21	3	3
5	1	5	3	19	2	13
2	3	9	2	40	57	65
2	2	5	2	5	3	2
7	3	1	5	2	5	10
4	8	3		2	2	
5	2	2		4	3	
6	5	8		11	2	
4	2	2		1	3	
2	3	8		5	2	
3	5	9		15	3	
1	16	3		57	73	
15	2	2		2	3	
9	2	13		14	2	
1	5	5		16	3	
8	2	8		69	2	
2	2	5		2	2	
3	2	2		41	1	
14	6	7		8	2	
4	4	3		46	3	
20	2	3		3	6	
2	1	7		2	7	
6	2	5		6	6	

D.1.3 Taxas de conversão

Para calcular as taxas de conversão dos veículos no cruzamento fizemos três medidas na mesma faixa de horário das direções tomadas por todos os veículos que chegavam em cada uma das ruas. Os dados da **Tabela D.2** estão divididos de acordo com a origem dos veículos: Alameda Barros (a partir da Rua Conselheiro Brotero), Alameda Barros (a partir da Rua Rosa e Silva), Rua Dr. Gabriel dos Santos (faixa da esquerda) e Rua Dr. Gabriel dos Santos (faixa da direita).

D.1.4 Tempos de percurso

Para cada uma das fontes de veículos observamos os tempos de percurso, escolhendo os veículos de maneira aleatória. A **Tabela D.3** mostra os tempos de percurso medidos para cada uma das fontes.

Os dados foram combinados de acordo com a taxa de afluxo de veículos em cada uma das vias para calcular o tempo médio de percurso nesse horário, 48,38 segundos.

D.1.5 Número de paradas

Observamos também o número de paradas dos veículos que vinham de cada uma das direções. A **Tabela D.4** mostra o número de paradas de cada um dos veículos escolhidos aleatoriamente.

Para calcular o número médio de paradas levamos em conta as diferentes taxas de afluxo e chegamos ao valor médio de 0,987 paradas por veículo.

Tabela D.2: Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento da Al. Barros com a R. Dr. Gabriel dos Santos em três intervalos de 15 minutos

Al. Barros (CB)		Al. Barros (RS)		Gabriel dos Santos (E)			Gabriel dos Santos (D)		
Esquerda	Em Frente	Em Frente	Direita	Direita	Esquerda	Em Frente	Esquerda	Em Frente	Direita
2	4	7	3	0	6	4	0	3	7
1	7	6	1	0	5	3	1	2	12
0	5	8	1	0	1	1	0	3	4
2	6	1	1	0	9	1	0	5	3
0	4	6	6	0	6	3	0	2	12
3	2	4	0	0	5	2	0	3	8
1	6	0	2	0	8	1	0	8	2
2	7	3	1	1	7	3	0	2	8
5	6	6	0	1	4	2	0	3	11
2	4	5	1	0	4	1	0	4	10
2	6	5	2	0	5	4	0	5	9
2	8	4	1	0	0	0	0	3	7
5	5	2	0	0	4	3	0	3	8
2	8	6	2	0	6	2	0	2	9
1	3	9	1	0	6	3	0	6	5
2	7	8	1	0	2	2	0	2	9
0	7	8	8	0	5	2	0	3	8
0	6	6	1	0	4	3	0	4	5
1	7	7	2	0	3	4	0	0	0
0	3	8	3	0	6	2	0	2	7
2	3	4	2	0	2	7	0	1	7
1	3	1	3	0	3	1	0	2	7
3	4	3	2	0	4	2	0	4	8
2	3	10	2	0	5	2	0	1	4
2	6	4	1	0	0	0	0	5	5
1	4	8	2	0	8	0	0	3	8
0	3	3	1	0	2	2	0	3	10
2	6	4	2	0	3	3	0	5	6
1	6	5	2	0	5	1	0	7	1
				0	5	2	0	3	8

Tabela D.3: Tempo de percurso de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada origem na região da Al. Barros

Al. Barros (CB)	Al. Barros (RS)	G. dos Santos
46,9	57,4	47,58
49,9	51,03	27,89
49	75	96,6
51,1	27,2	96,54
44,8	43,2	61,1
47,12	15,7	93,6
49,8	24,9	20,07
49,8	31,5	30,3
52	62,5	32,4
48,13	42,8	21,1
56,67	44,43	54,7
24	36,3	72,32
27,4	38,52	43,4
53	40,52	34,72
17,39	29,2	61

Tabela D.4: Número de paradas de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada origem na região da Al. Barros

Al. Barros (CB)	Al. Barros (RS)	G. dos Santos
1	1	1
0	2	1
0	0	0
2	2	1
1	0	0
1	0	2
0	1	1
1	2	1
0	1	2
0	3	1
2	1	0
1	0	2
1	2	1
0	2	0
1	1	2

D.2 Av. Lavandisca com Ruas Tuim, Inhambú e Canário

Neste apêndice descreveremos os dados levantados durante a pesquisa nos cruzamentos entre a Av. Lavandisca e as ruas Tuim e Inhambú, no bairro de Moema, em São Paulo. Os dados foram levantados em uma visita ao local na faixa de horário das 20-22hs, em uma sexta-feira. Os dados foram colhidos como no cruzamento da Al. Barros com a R. Gabriel da Silva.

D.2.1 Topografia

Para descrever o cruzamento levantamos dados sobre a topografia das regiões estudadas, bem como as conversões possíveis e os grupos semaforicos de cada intersecção. Estes dados estão representados na **Figura D.2**.

D.2.2 Tempos de chegada

As **Tabelas D.5 - D.8** mostram o intervalo entre dois veículos consecutivos nas diferentes entradas da região estudada: Av. Lavandisca, Rua Tuim, Rua Inhambú e Rua Canário. O cronômetro utilizado para a medição da chegada na R. Inhambú não foi capaz de registrar mais de 50 veículos e por isso a contagem foi interrompida após 5 minutos.

Tabela D.5: Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da Av. Lavandisca.

3,41	2,21	3,2	2,27	5,67	2,5	2,44	2,35
18,38	8,21	2,7	4,19	3,76	2,03	1,74	15,57
3,83	8,41	2,58	19,31	2,58	8,52	2,14	
1,58	11,73	2,42	30,23	2,08	10,76	6,15	
15,2	5,42	0,53	11,95	30,23	15,94	2,08	
19,55	11,02	33,76	1,77	29,25	15,75	2	
3,29	3,77	5,22	2,89	9,52	3,64	2,94	
4,67	66,6	2,43	20,11	19,52	2,98	16,76	
2,01	1,05	1,42	19,88	2,12	32,11	4,51	

D.2.3 Taxas de conversão

Para calcular as taxas de conversão dos veículos no cruzamento medimos as direções tomadas por todos os veículos que chegavam em cada uma das ruas durante 15 ciclos dos semáforos. A **Tabela D.9** mostra as direções tomadas no cruzamento da Av. Lavandisca com a Rua Tuim, a **Tabela D.10** os dados sobre o cruzamento da Av. Lavandisca com a Rua Inhambú e a **Tabela D.11** os dados sobre o cruzamento da Av. Lavandisca com a Rua Canário.

Tabela D.6: Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da R. Tuim.

6,2	1,76	16,52	5,22	65,43	9,13	5,05	
15,5	7,85	3,05	12,48	7,81	31,16	28,4	
2,3	46,38	9,29	36,82	2,39	7,81	17,92	
58,91	5,57	34,59	29,84	10,64	29,92		
8,21	1,49	17,29	39,03	14,49	3,68		

Tabela D.7: Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 5 minutos na chegada da R. Inhambú.

10,63	4,72	3,65	3,36	10,64	12,32	34,58	0,8
19,19	4,66	15,07	21,54	2,18	2,78	14,81	
2,94	4,06	6,98	6,3	2,88	12,75	2,13	
3,03	24,33	4,64	17,5	3,93	1,34	0,76	
2,34	3,07	0,94	0,66	9,13	2,09	1,34	
7,98	2,55	4,18	3,11	5,04	0,14	2,68	

Tabela D.8: Tempo (segundos) entre dois veículos consecutivos, medidos durante 10 minutos na chegada da R. Canário.

14,91	0,44	2,61	3,07	4,91	4,91	5,73	1,51
5,76	0,72	1,4	3,83	1,8	12,82	4,65	2,22
6,69	2,3	3,88	2,17	36	38,88	2,34	1,43
3,41	6,28	4,04	2,09	1,28	13,39	3,83	2,51
1,44	1,71	1,32	4,53	6,45	1,13	3,08	2,43
1,81	3,49	1,4	4,57	6,88	1,85	0,76	1,88
2,36	1,19	1,29	5,7	1,95	1,21	2,37	2,96
1,17	5,98	2,91	33,5	2,87	2,33	1,43	
1,58	1,67	1,73	1,72	3,16	1,16	11,63	
3,82	1,84	19,28	1,93	1,79	1,21	5,47	
1,96	8,48	18,41	1,47	2,14	3,76	26,83	
2,66	2,26	1,89	2,45	2,51	8,43	6,27	
31,87	12,76	2,69	1,25	1,98	7,32	1,4	
1,11	9,02	2,58	4,52	16,49	12,08	1,48	

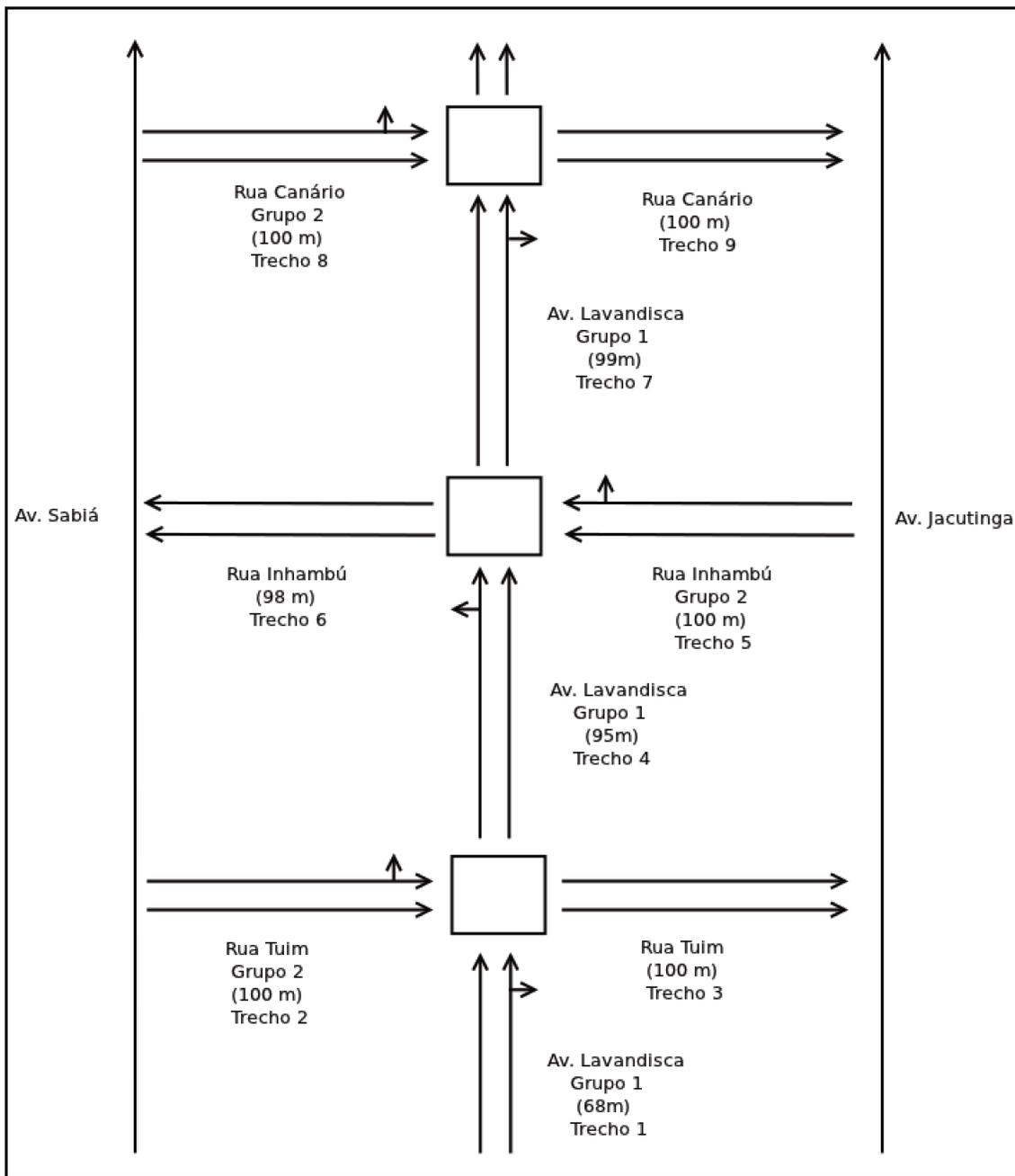


Figura D.2: Ilustração da topografia dos cruzamentos estudados na região da Av. Lavandisca

Tabela D.9: Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Tuim

Av. Lavandisca		R. Tuim	
Em Frente	Direita	Esquerda	Em Frente
4	1	0	1
9	1	1	2
11	1	1	5
5	0	1	1
8	0	2	0
7	1	0	2
3	1	0	2
6	2	0	3
8	0	1	2
5	1	0	2
2	1	1	0
15	2	0	1
5	1	2	2
5	1	0	2
12	4	0	0
105	17	9	25

Tabela D.10: Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Inhambú

Av. Lavandisca		R. Inhambú	
Em Frente	Esquerda	Direita	Em Frente
15	0	4	11
17	1	3	5
16	0	5	6
6	0	3	12
6	1	3	9
9	1	6	8
8	0	4	8
15	1	7	7
17	1	4	7
8	0	1	5
12	0	6	5
9	0	2	5
12	2	7	9
11	0	5	5
10	2	4	5
171	9	64	107

Tabela D.11: Direção tomada pelos veículos que chegam ao cruzamento durante 15 ciclos do semáforo da Av. Lavandisca com a R. Canário

Av. Lavandisca		R. Canário	
Em Frente	Direita	Esquerda	Em Frente
12	4	2	6
14	7	2	9
18	3	4	9
16	2	6	17
18	5	3	14
10	4	1	13
10	8	1	7
11	7	2	12
14	7	4	3
8	5	2	12
8	4	2	8
15	4	5	8
12	5	5	14
11	3	2	7
9	4	2	13
186	72	43	152

D.2.4 Tempos de percurso

Para cada uma das quadras observamos os tempos de percurso, escolhendo os veículos de maneira aleatória. Medimos também o tempo dos veículos nos cruzamentos. A **Tabela D.12** mostra os tempos de percurso medidos em cada uma das quadras e a **Tabela D.13** mostra o tempo gasto nos cruzamentos.

Tabela D.12: Tempo de percurso (segundos) de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada quadra. Os números das colunas representam a indicação no esquema topográfico da **Figura D.2**

Chegada Lavandisca (1)	Chegada Tuim (2)	Saída Tuim (3)	2ª Lavandisca (4)	Chegada Inhambú (5)
13,3	10,87	8,2	9,61	10,82
7,9	31,81	7,7	10,12	10,4
35,1	8,95	9,8	6,9	12,32
25	22,63	9,3	9,83	15
13,92	40,01	10,1	44,19	12,4
15,3	14,45	7,4	10,73	37,74
15,2	24,12	9,5	12,45	26,3
6	9,1	11,9	40,52	25,9
32,7	33,11	10,32	10,29	14,8
26,8	15	10	34,19	32,87
16,73	30,3	10,3	10,95	26,2
26,9	29,51	7,8	8,1	32,3
17,83	25,73	9,2	35,8	14,9
6,6	12,63	11,2	10,03	10,25
17	11,07	9	36,24	8

Continua na próxima página. . .

Tabela D.12 – Continuação

Saída Inhambú (6)	3ª Lavandisca (7)	Chegada Canário (8)	Saída Canário (9)	
10,34	32,5	9,98	11,54	
11,34	9,8	44,6	12,95	
10,46	34,52	11,9	8,07	
7,73	36,6	24,62	10,24	
12,85	9,94	11,17	12,17	
11,34	10	46,82	10,14	
15,15	10,4	17,13	12,74	
12,18	43,58	10,22	12,33	
12,79	42,7	12,54	11,13	
9,44	9,4	8,46	10,36	
13,34	27,9	8,7	8,77	
8,56	13,7	46,8	13,09	
16,73	11,3	9,96	11,84	
12,7	9,2	44,12	18	
11,75	24,5	35,47	8,76	

Tabela D.13: Tempo de percurso (segundos) de 5 veículos escolhidos aleatoriamente nos cruzamentos de acordo com a origem e destino

Av. Lavandisca		Transversal	
Em Frente	Converter	Em Frente	Converter
2,3	1,1	3,2	0,6
1,1	1,3	2,5	0,6
2,8	1,6	2,5	1,1
1,5	2,2	2,5	1,5
2,8	1,4	1,1	0,9

Os dados foram combinados de acordo com a taxa de afluxo de veículos em cada uma das vias e a taxa de conversão para calcular o tempo médio de percurso nesse horário, 34,22 segundos.

D.2.5 Número de paradas

Observamos também o número de paradas dos veículos em cada uma das quadras. A **Tabela D.14** mostra o número de paradas de cada um dos veículos escolhidos aleatoriamente.

Tabela D.14: Número de paradas de 15 veículos escolhidos aleatoriamente em cada quadra

Chegada Lavandisca (1)	Chegada Tuim (2)	Saída Tuim (3)	2ª Lavandisca (4)	Chegada Inhambú (5)	Saída Inhambú (6)
1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0

Para calcular o número médio de paradas levamos em conta as diferentes taxas de fluxo e chegamos ao valor médio de 0,729 paradas por veículo.

Referências Bibliográficas

Albuquerque 2008 ALBUQUERQUE, M. C. C. de. *Os riscos de São Paulo : uma agenda sobre mobilidade, sustentabilidade, convivência e gestão*. São Paulo, SP, Brasil: CPV Editora, 2008.

Bazzan, Oliveira e Silva 2010 BAZZAN, A. L.; OLIVEIRA, D. de; SILVA, B. C. da. Learning in groups of traffic signals. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 23, n. 4, p. 560 – 568, 2010. ISSN 0952-1976. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197609001699>>.

Benjaafar, Setyawan e Dooley 1997 BENJAAFAR, S.; SETYAWAN, W.; DOOLEY, K. *Cellular automata for traffic flow modeling*. University of Minnesota, 1997. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=u4AGQgAACAAJ>>.

Biham, Middleton e Levine 1992 BIHAM, O.; MIDDLETON, A. A.; LEVINE, D. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Physical Review A*, v. 46, p. 6124–6127, 1992.

Bonet e Geffner 2003 BONET, B.; GEFFNER, H. Labeled RTDP: Improving the convergence of real-time dynamic programming. In: GIUNCHIGLIA, E.; MUSCETTOLA, N.; NAU, D. (Ed.). Trento, Italy: AAAI Press, 2003. p. 12–21.

Bonetti Jr. e Pietrantonio 2006 Bonetti Jr., W.; PIETRANTONIO, H. *Semáforos atuados pelo tráfego - Utilização, Parametrização, Monitoração e Análise de Desempenho*. São Paulo, SP, Brasil, Julho 2006.

Boutilier, Dean e Hanks 1999 BOUTILIER, C.; DEAN, T.; HANKS, S. Decision-theoretic planning: Structural assumptions and computational leverage. *Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 11, p. 1–94, 1999.

Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000 CHOWDHURY, D.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, v. 329, p. 199, 2000. Disponível em: <<http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/0007053>>.

Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo 2011 Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo. *Segurança e fluidez*. 2011. <http://www.cetsp.com.br/consultas/seguranca-e-fluidez.aspx>. Acesso em: 3 de novembro de 2011.

Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo 2011 Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo. *Sobre a CET*. 2011. <http://www.cetsp.com.br/sobre-a-cet.aspx>. Acesso em: 3 de novembro de 2011.

Denatran 1984 DENATRAN. *Manual de semáforos*. 2a. ed. Brasília, DF, Brasil: Departamento de Imprensa Nacional, 1984.

Givan, Leach e Dean 1997 GIVAN, R.; LEACH, S.; DEAN, T. Bounded parameter markov decision processes. *Artificial Intelligence*, v. 122, p. 234–246, 1997.

Helbing 2001 HELBING, D. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics*, American Physical Society, v. 73, n. 4, p. 1067–1141, Dezembro 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.73.1067>>.

Hoar, Penner e Jacob 2002 HOAR, R.; PENNER, J.; JACOB, C. Evolutionary swarm traffic: If ant roads had traffic lights. In: _____. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*. IEEE Press, 2002. v. 2, p. 1910–1915. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1004535>>.

Hoey et al. 1999 HOEY, J. et al. Spudd: Stochastic planning using decision diagrams. In: *Proceedings of the Fifteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. Stockholm, Sweden: Morgan Kaufmann, 1999. p. 279–288.

Laval e Leclercq 2010 LAVAL, J. A.; LECLERCQ, L. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic. *Physical and Engineering Sciences*, v. 368, n. 1928, p. 4519–4541, Outubro 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0138>>.

Mazzamatti et al. 1998 MAZZAMATTI, M. et al. Benefits gained by responsive and traffic adaptive systems in sao paulo. *IEE Conference Publications*, IEE, v. 1998, n. CP454, p. 114–118, 1998. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/abstract/IEECPS/v1998/iCP454/p114/s1>>.

Mikami e Kakazu 1994 MIKAMI, S.; KAKAZU, Y. Genetic reinforcement learning for cooperative traffic signal control. In: *Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 223–228 vol.1.

- Ming 2001 MING, S. H. *Cálculo do ciclo de verdes ótimos quando o fluxo de saturação não é constante*. São Paulo, SP, Brasil, 2001. 11 p.
- Nagel e Schreckenberg 1992 NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, v. 2, p. 2221–2229, Dezembro 1992.
- Nagel et al. 1995 NAGEL, K. et al. *Two Lane Traffic Simulations using Cellular Automata*. 1995.
- Papoulis 1991 PAPOULIS, A. *Probability, random variables, and stochastic processes*. 3a. ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1991. (McGraw-Hill series in electrical engineering). ISBN 9780070484771. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=4IwQAQAIAAJ>>.
- Puterman 2005 PUTERMAN, M. L. *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. 1. ed. Estados Unidos: Wiley-Interscience, 2005. Paperback. (Wiley series in probability and mathematical statistics: Applied probability and statistics). ISBN 0471727822.
- Robertson 1986 ROBERTSON, D. Research on the transyt and scoot methods of signal coordination. *ITE Journal*, Janeiro 1986.
- Robertson e Bretherton 1991 ROBERTSON, D.; BRETHERTON, R. Optimizing networks of traffic signals in real time-the scoot method. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 1, p. 11 –15, Fevereiro 1991. ISSN 0018-9545.
- Robertson e Bretherton 1991 ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D. Optimizing networks of traffic signals in real time-the scoot method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 40, n. 1, p. 11–15, Fevereiro 1991.
- Roess, Prassas e McShane 2010 ROESS, R.; PRASSAS, E.; MCSHANE, W. *Traffic Engineering*. Pearson Education, 2010. ISBN 9780136135739. Disponível em: <<http://bks1.books.google.com.ag/books?id=fGE6PgAACAAJ>>.
- Russell e Norvig 2002 RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2. ed. Estados Unidos: Prentice Hall, 2002. Hardcover. (Prentice Hall series in artificial intelligence). ISBN 0137903952.
- Sanner 2010 SANNER, S. Relational dynamic influence diagram language (rddl): Language description. Não publicado. 2010.
- Schadschneider et al. 2000 SCHADSCHNEIDER, A. et al. A new cellular automata model for city traffic. In: *Traffic and Granular Flow '99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*. Berlim, Alemanha: Springer, 2000. p. 6. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/9911312>>.

- Simon e Gutowitz 1998 SIMON, P. M.; GUTOWITZ, H. A. A cellular automaton model for bi-directional traffic. *Physical Review E*, v. 57, 1998. Disponível em: <http://prola.aps.org/abstract/PRE/v57/i2/p2441_1>.
- Sims e Dobinson 1980 SIMS, A.; DOBINSON, K. The sydney coordinated adaptive traffic (scat) system philosophy and benefits. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 29, n. 2, p. 130 – 137, Maio 1980. ISSN 0018-9545.
- Smilowitz et al. 1999 SMILOWITZ, K. R. et al. Some observations of highway traffic in long queues. *Transportation Research Record*, v. 1678, p. 225–233, 1999.
- Spall e Chin 1997 SPALL, J.; CHIN, D. Traffic-responsive signal timing for system-wide traffic control. In: *American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997*. Albuquerque, Estados Unidos: [s.n.], 1997. v. 4, p. 2462 – 2463 vol.4.
- Transport Roads & Traffic Authority Transport Roads & Traffic Authority. *Adaptive Control*. http://www.scats.com.au/product_adaptive_control.html. Acesso em: 3 de novembro de 2011.
- Trevizan, Cozman e Barros 2007 TREVIZAN, F. W.; COZMAN, F. G.; BARROS, L. N. D. Planning under risk and knightian uncertainty. In: *Proceedings of the 20th international joint conference on Artificial intelligence*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. (IJCAI'07), p. 2023–2028. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1625275.1625602>>.
- TRL Limited 2008 TRL Limited. *Results from SCOOT Systems*. 2008. <http://www.scoot-utc.com/GeneralResults.php?menu=Results>. Acesso em: 21 de novembro de 2011.
- Vilanova 2006 VILANOVA, L. M. Siri - um novo simulador para redes de semáforos. *Revista dos transportes públicos*, São Paulo, SP, Brasil, n. 110, p. 41–54, Abril 2006. ISSN 0102-7212.
- Vilanova, Neto e Fernandes 2005 VILANOVA, L. M.; NETO, J. C.; FERNANDES, S. R. R. *O controle de semáforos em tempo real: a experiência de São Paulo*. São Paulo, SP, Brasil, 2005. 70 p.
- Villanova VILLANOVA, L. *Glossário de termos técnicos*. <http://www.sinaldetransito.com.br/glossario.php>. Acesso em: 3 de novembro de 2011.
- Webster 1957 WEBSTER, F. *Traffic Signal Settings - Technical Paper No 39*. Londres, Inglaterra: Road Research Laboratory, London, UK, 1957.

Glossário

Agente Neste contexto representa cada um dos veículos no simulador de multidões, na literatura é muitas vezes utilizado de maneira mais ampla para outras entidades que podem alternar entre diferentes estados, como os semáforos (Bazzan, Oliveira e Silva 2010). 12, 15

Autômatos celulares Modelo microscópico de simulação de multidões onde o espaço e o tempo são discretizados e as regras de atualização se baseiam em algumas posições ao redor da posição estudada (Helbing 2001). v, 13, 14, 16

Caminho estocástico mínimo (SSP) O problema do Caminho estocástico mínimo é uma extensão do problema do Processo markoviano de decisão em que também estão definidos um estado inicial e um conjunto de estados meta. Nesse problema o objetivo é maximizar a recompensa esperada nos caminhos entre o estado inicial e os estados meta (Bonet e Geffner 2003). 17, 74

Ciclo Tempo que um semáforo leva para voltar a repetir sua programação. Em geral semáforos de uma mesma região usam um tempo de ciclo comum (ou frações desse tempo), para permitir que a defasagem entre semáforos seja mantida (Villanova). 5–10

Defasagem Tempo decorrido entre a ocorrência de um ponto do ciclo de um semáforo e um ponto do ciclo de outro semáforo, conceito utilizado para a sincronização de semáforos e a criação de ondas verdes (Villanova). 1, 2, 7–10

Diagrama algébrico de decisão Uma árvore de decisão que tem como folhas valores reais. Esta árvore respeita duas propriedades: (i) para qualquer caminho entre a raiz e uma folha as variáveis estão sempre na mesma ordem; (ii) não existem sub-árvores repetidas (Hoey et al. 1999). 18–20, 74

Diagrama binário de decisão Um diagrama algébrico de decisão que pode ter apenas valores binários em suas folhas (Hoey et al. 1999). 19, 74

Faixa crítica A faixa de cada grupo semaforico que tem maior demanda de tráfego (Roess, Prassas e McShane 2010). 7

- Fase** Uma fase representa um intervalo de tempo entre quaisquer dois inícios de verde consecutivos. Mesmo que estágio (Villanova). 6, 7, 9, 10
- Grau de saturação** Quociente entre o fluxo em uma via e sua capacidade (Villanova). 6–10
- Grupo de movimento** Um grupo de movimento representa um conjunto de movimentações da mesma aproximação que têm direito de passagem simultaneamente (Villanova). 6
- Grupo semafórico** Um grupo semafórico representa todos os semáforos que apresentam sempre as mesmas fases. Existem definições que requerem que os semáforos estejam ligados ao mesmo circuito (Villanova). 6, 7, 29, 51, 57
- Hill-climbing** Algoritmo que busca otimizar uma função realizando pequenas mudanças nos seus parâmetros sempre em direção de máximos locais (Russell e Norvig 2002). 7
- Master Equation** Modelo macroscópico de simulação de multidões que se baseia em cadeias de Markov para definir as transições entre estados (Helbing 2001). 13
- Microscopic follow-the-leader** Modelo microscópico de simulação de tráfego onde as regras são baseadas em reações às decisões do veículo a sua frente (Helbing 2001). 12
- Modelo de cinética de gases** Modelo microscópico de simulação de multidões onde cada agente é considerado como uma partícula de gás e atualiza sua posição de acordo com a equação de Boltzman (Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000). 13
- Modelos fluidodinâmicos** Classe de modelos macroscópicos de simulação de multidões que se baseia em dinâmica de fluidos para definir a dinâmica do modelo (Chowdhury, Santen e Schadschneider 2000). 14
- Método de Roess** Método de divisão dos tempos de verde descrito por Roess que se baseia no cálculo do tempo ótimo de ciclo e na divisão desse tempo de acordo com a demanda da faixa crítica de cada grupo semafórico (Roess, Prassas e McShane 2010). 7
- Método de Webster** Método de divisão dos tempos de verde desenvolvido por Webster que se baseia em alocar o tempo de verde baseado nos graus de saturação de cada grupo semafórico e depois calcular o tempo de verde efetivo para cada grupo (Webster 1957). 6
- Onda stop-and-go** Situação observada no tráfego onde uma perturbação no tráfego se desloca, em geral em sentido contrário ao do fluxo (Laval e Leclercq 2010). 26
- Perfil de fluxo cíclico** Relação entre o fluxo médio de veículos e o tempo do ciclo do semáforo a montante do ponto estudado (Robertson e Bretherton 1991). 8, 9, 74

- Planejamento probabilístico** Área da ciência da computação que estuda o desenvolvimento de políticas de ação em um ambiente onde as ações têm efeitos probabilísticos. v, 2, 3, 17, 39, 41
- Política** Função que relaciona uma ação a estados do problema estudado (Bonet e Geffner 2003). 2, 3, 8, 18, 21, 22, 34–37, 39–42
- Processo markoviano de decisão (MDP)** Um processo markoviano de decisão é uma descrição de um problema onde cada situação do mundo independe das outras. Um MDP é descrito através da quádrupla (S, A, P, R) , em que S é o conjunto de estados possíveis do mundo, A é o conjunto de ações possíveis, P é a função de transição de estados, descrita para cada ação e R a função de recompensa (Puterman 2005). 3, 17, 74
- Programa de modernização semafórica SEMIN - Semáforos inteligentes** Programa para controle e implementação de semáforos atuados pelo tráfego desenvolvido pela CET-SP. 11, 74
- SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*)** Sistema de otimização de tempos de verde e tempos de defasagem que utiliza dois níveis de controle, o primeiro dá diretrizes para todos os semáforos e o segundo é um controle local baseado nestas diretrizes (Sims e Dobinson 1980). 10, 74
- SCOOT** Algoritmo muito popular para otimização de semáforos em tempo real. Segundo seu desenvolvedor é uma versão em tempo real do TRANSYT (Robertson e Bretherton 1991). 1, 8, 9, 74
- Semáforo** Dispositivo utilizado para controlar o direito de passagem em intersecções onde há conflitos (Villanova). 1–3, 5–15, 18, 21–23, 25, 26, 35, 39–41
- Semáforo atuado** Semáforos que atuam de acordo com informações atualizadas sobre o fluxo de veículos. Em geral essas informações são obtidas através do uso de sensores instalados na pista (Villanova). 5, 8, 11, 29
- Semáforo de tempo fixo** Semáforos que atuam de acordo com planos previamente calculados. Em geral o semáforo pode ter mais de um plano que é selecionado de acordo com o dia ou a hora (Villanova). 2, 3, 5, 11, 41
- Semáforo semi-atuado** Semáforos atuados que só recolhem informações de algumas das vias do cruzamento (Villanova). 9
- Simulador de multidões** Programas que realizam simulações para entender o comportamento de grandes grupos de agentes (pessoas, veículos, animais etc.) em determinadas situações. 3, 8, 15, 39, 41, 48

- Simulação de multidões**Área da ciência da computação que estuda e desenvolve simuladores de multidões. 2, 3, 12, 14, 41
- SIRI**Sistema para otimização de tempos de verde e das defasagens entre semáforos desenvolvido pela Companhia de engenharia de tráfego de São Paulo. A otimização dos tempos de verde se baseia no cálculo do grau de saturação e a das defasagens em uma linearização das rotas na área estudada (Vilanova 2006). 1, 8, 21, 40
- Slow to start**Qualidade dos modelos de simulação de tráfego em que quando um veículo pode começar a andar, porque, por exemplo, um semáforo abriu ou porque o veículo parado à sua frente andou, o seu movimento não começa imediatamente. Simula o tempo de reação dos motoristas (Helbing 2001). 25
- Stochastic Planning using Decision Diagrams (SPUDD)**Algoritmo de planejamento baseado no conceito de ADDs (Hoey et al. 1999). 18–21, 23, 74
- Taxa de conversão**Razão entre o número de veículos que realizam uma conversão ao passar por um ponto e o total de veículos que passam por esse ponto. 29
- Tempo de verde**Tempo que um grupo tem na fase verde. Quando se refere ao tempo de verde do semáforo é a soma dos verdes de todos os grupos (Webster 1957). 2, 5–10, 35, 37, 40
- Tempo de verde efetivo**Tempo de verde descontando-se o tempo perdido em cada fase (Webster 1957). 7
- Traffic Network Study Tool (TRANSYT)**Algoritmo para cálculo de defasagem entre semáforos de uma rede. Possui um módulo para cálculo do tempo de verde e da divisão de verdes. Utilizado em semáforos de tempo fixo (Robertson 1986). 1, 7–9, 74

Acrônimos

ADDDiagrama Algébrico de Decisão. 18–20

BDDDiagrama Binário de Decisão. 19

CET-SPCompanhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. 1, 8, 38

CFPPerfil de Fluxo Cíclico. 8, 9

CTACentral de Tráfego em Área. 11

MDPProcesso Markoviano de Decisão. 3, 17

SCATS*Sydney Coordinated Adaptative Traffic System*. 10

SCOOT*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*. 1, 9

SEMINSemáforos Inteligentes - Programa de modernização semafórica. 11

SPUDDStochastic Planning using Decision Diagrams. 18–21, 23

SSPCaminho Estocástico Mínimo. 17

TRANSYTTraffic Network Study Tool. 1, 7–9