

JOSÉ DOLORES VERGARA DIETRICH

**UMA PROPOSTA PARA SÍNTESE DE
CONTROLE REALIMENTADO DOS TEMPOS
DE VERDE EM REDES DE TRÁFEGO
VEICULAR URBANO**

**FLORIANÓPOLIS
2009**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

**UMA PROPOSTA PARA SÍNTESE DE
CONTROLE REALIMENTADO DOS TEMPOS
DE VERDE EM REDES DE TRÁFEGO
VEICULAR URBANO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Automação e Sistemas.

JOSÉ DOLORES VERGARA DIETRICH

Florianópolis, outubro de 2009.

UMA PROPOSTA PARA SÍNTESE DE CONTROLE REALIMENTADO DOS TEMPOS DE VERDE EM REDES DE TRÁFEGO VEICULAR URBANO

José Dolores Vergara Dietrich

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas, Área de Concentração em *Controle, Automação e Sistemas*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Werner Kraus Jr, Ph.D.
Orientador

Eduardo Camponogara, Ph.D.
Co-orientador

Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Banca Examinadora:

Eduardo Camponogara, Ph.D.
Presidente

Lenise Grandó Goldner, Dra.

Antonio Augusto Rodrigues Coelho , Dr.

Max Hering de Queiroz, Dr.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Werner Kraus Jr. pelo incentivo, paciência, dedicação e por acreditar sempre que o trabalho poderia dar frutos. Agradeço da mesma forma ao meu co-orientador Eduardo Camponogara que de uma maneira especial acompanhou o trabalho e, na ausência do orientador, doou-se com total empenho, sem o qual este trabalho perderia muito.

À minha esposa Tatiana, pela paciência, ajuda e companheirismo sempre presentes. E por acreditar que muito dos nossos sacrifícios receberão recompensa.

Ao meu pai José, não só pelas lições de lógica, física, matemática, determinação, superação e de vida, mas pelo exemplo de caráter indiferentemente da situação em que se encontre. Agradeço pela confiança em mim depositada e por saber que posso contar sempre com ele e para tudo.

À minha mãe Izabel, pessoa sem igual. Agradeço pelos ensinamentos tão precoces de moral e sobre valores. Por nos proporcionar, a mim e a meus irmãos, uma educação tão especial e tão íntegra. Pela sua dedicação exclusiva a nós, filhos. Por incentivar-me no início dos estudos técnicos. Por tanta e tanta coisa, obrigado.

Aos meus irmãos Taiana, Miriam, Leonardo e Aline, a quem amo do fundo do meu coração. Obrigado por estarem, apesar de distantes, tão presentes em minha vida. A eles, agradecimentos especiais por serem meus parceiros, em tudo, por tantos anos da minha vida.

Aos amigos que fiz no projeto CONTREAL: Felipe Augusto, Felipe Thomé, Vinicius, Marana e Rauh que tanto me auxiliaram durante o trabalho.

Aos amigos do LTIC pela amizade e pelo compartilhamento de conhecimento.

Ao nosso grupo de estudos de energia cinética, pelos dois anos de amizade e treinamento que tivemos juntos.

E por último, mas de maneira nenhuma em último, a Deus, por tudo e especialmente pela promessa cumprida de dias de descanso.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

UMA PROPOSTA PARA SÍNTESE DE CONTROLE REALIMENTADO DOS TEMPOS DE VERDE EM REDES DE TRÁFEGO VEICULAR URBANO

José Dolores Vergara Dietrich

Outubro/2009

Orientador: Werner Kraus Jr., Ph.D.

Co-orientador: Eduardo Camponogara, Ph.D.

Área de Concentração: Controle, Automação e Sistemas.

Palavras-chave: Controle de Tráfego Urbano, Controle Realimentado dos Tempos de Verde, Flutuações no Trânsito.

Número de Páginas: xxiv + 61

O ajuste dos semáforos em uma malha viária urbana nem sempre é adequado em função da dificuldade de atualizar os planos de tempos semaforicos que são a base da operação dos controladores de “tempo fixo” atualmente em uso. Dentre as ações possíveis para amenizar os efeitos negativos desse ajuste inadequado estão as estratégias de controle em tempo-real que têm por objetivo o aumento da eficiência das malhas viárias urbanas através de ajustes contínuos dos tempos semaforicos para as atuais condições de tráfego. A estratégia de controle *Traffic-responsive Urban Control* (TUC) é uma estratégia recentemente desenvolvida que apresenta bons resultados práticos quando comparada ao controle por tempos fixos e a outras estratégias de tempo real. Neste trabalho, foram explorados aspectos dinâmicos da estratégia TUC que não foram devidamente explorados na literatura existente. Em particular, observou-se um fenômeno de oscilações dos sinais de controle da estratégia mesmo na ausência de variações nos volumes de tráfego, ou seja, quando se esperaria um controle constante. Embora os volumes de tráfego permaneçam sem variações, estas oscilações dos tempos semaforicos induzem variações no tráfego, o que causa, além do deterioramento dos índices de desempenho da malha, perturbações para os usuários da via que esperam um comportamento estável do controle de tráfego. Com o objetivo de eliminar tais flutuações, apresenta-se uma estratégia de controle de tempos de verde diferente da sugerida na estratégia TUC original. Resultados de simulação mostram a superioridade da proposta deste trabalho para os casos testados.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Automation and Systems Engineering.

A FEEDBACK CONTROL STRATEGY FOR THE GREEN TIMES IN URBAN TRAFFIC NETWORKS

José Dolores Vergara Dietrich

October/2009

Advisor: Werner Kraus Jr, Ph.D.

Co-advisor: Eduardo Camponogara, Ph.D.

Area of Concentration: Control, Automation and Systems

Key words: Urban Traffic Control, Feedback Control of Green Time, Traffic Fluctuations.

Number of Pages: xxiv + 61

Traffic light timings in urban networks may not be adequate due to the difficulty in updating time plans which are the base for the operation of “fixed-time” controllers currently in use. Among the possible solutions to the negative impact of such mistiming there are the real-time control strategies that aim at increasing the efficiency of urban traffic networks by continuous adjustments of traffic lights for the prevailing traffic conditions. The control strategy TUC (*Traffic-responsive Urban Control*) has been recently developed and presents good practical results when compared to fixed-time control and other real-time strategies. In this work, dynamic aspects of the TUC strategy which have not been addressed by previous studies are explored. In particular, the phenomenon of oscillatory control behaviour even in the absence of variations in traffic arrivals is described. Although traffic volumes remain unchanged, the oscillations in traffic light timings imply in traffic fluctuations causing disturbances for drivers expecting a more stable behaviour of traffic, besides the deterioration of traffic performance. In order to eliminate such fluctuations, a control strategy for green splits is presented which departs from the original one introduced by TUC. Simulation results show the superiority of the proposed control in the tested cases.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivos do Trabalho	2
1.2	Estrutura	2
2	Estratégia de Controle TUC (<i>Traffic-responsive Urban Control</i>)	5
2.1	Técnicas de Controle em Tempo Real	5
2.2	TUC	6
2.3	Estimação do Número de Veículos na Via	7
2.4	Controle de Ciclo	10
2.5	Controle de Defasagem	11
2.6	Controle das Porcentagens de Verde	13
2.7	Sumário	18
3	Características do Simulador e da Malha Viária	19
3.1	Modelos de simulação: Macroscópico e Microscópico	19
3.2	Seguimento de Veículo (<i>Car-following</i>): Comportamento dos Veículos em um Microsimulador	20
3.3	Simulador de Tráfego <i>AIMSUN</i>	21
3.4	Características da Malha a ser Controlada	23
3.5	Sumário	25

4	Identificação de Flutuações Induzidas pelo Controle	29
4.1	Caracterização do Problema	29
4.2	Estratégia de Controle TUC e suas Implicações	32
4.3	Sumário	36
5	Proposta de Síntese de Controle para Tempos de Verde	37
5.1	Proposta de Estratégia de Controle para Tempos de Verde	37
5.2	Resultados	41
5.2.1	Resultados com Chegadas Constantes	41
5.2.2	Resultados com Chegadas Exponenciais	43
5.3	Comparações entre as Estratégias	44
5.4	Sumário	46
6	Conclusão	49
A	Terminologia	51
A.1	Defasagem	51
A.2	Ciclo	51
A.3	Ciclo Nominal	51
A.4	Concentração (κ)	52
A.5	Estágio	52
A.6	Fluxo (q)	52
A.7	Fluxo de Saturação (s)	52
A.8	Fluxo Nominal	53
A.9	<i>Headway</i>	53
A.10	Laço Indutivo	53
A.11	<i>Link</i>	53
A.12	Ocupação (o)	53

A.13 Porcentagens de verde	54
A.14 Via	54
A.15 Velocidade Média Harmônica	54
A.16 Verde Nominal	54
B Regulador Quadrático Linear	55
C Propriedades Estruturais de Sistemas de Controle Lineares	57
C.1 Controlabilidade	57
C.2 Estabilizabilidade	58
C.3 Observabilidade	58
C.4 Detectabilidade	58

Lista de Abreviaturas

LQR	Regulador Cuadrático Linear (<i>Linear-quadratic Regulator</i>)
TUC	<i>Traffic-responsive Urban Control</i>
AIMSUN	<i>Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Nonurban Networks</i>

Lista de Símbolos

Notação

A letras maiúsculas em itálico denotam matrizes.
 a^N representa o valor nominal (inicial) da variável.

Índices

j índice de interseções
 z índice de vias (principal)
 w índice de vias (transversal)
 k índice de tempo discreto

Conjuntos

J conjunto de interseções
 F_j conjunto de fases da interseção j
 I_j conjunto de vias de chegada da interseção j

Variáveis Específicas de Vias e Interseções

x_z número de veículos da via z (veh)
 x_z^{\max} capacidade máxima de veículos da via z (veh)
 $t_{z,w}$ taxa de conversão da via z para a w
 $t_{z,0}$ taxa de saída da via z
 S_z fluxo de saturação da via z (veh/h)
 q_z fluxo de entrada da via z (veh/h)
 u_z fluxo de saída da via z (veh/h)

s_z	fluxo de saída interno da via z (veh/h)
d_z	demanda interna da via z (veh/h)
Δd_z	denota a operação $d_z - d_z^N$ (veh/h)
C_j	tempo de ciclo da interseção j
$g_{j,i}$	representa o valor do tempo de verde da fase i da interseção j (s)
$\Delta g_{j,i}$	denota a operação $g_{j,i} - g_{j,i}^N$ (s)

Lista de Figuras

2.1	Estratégia de controle TUC. Adaptada de [5]	8
2.2	Situação em que fica evidente a falta de relação de um-para-um entre ocupação e quantidade de veículos em uma via, adaptada de [5]	9
2.3	Transformação aproximada entre ocupação e número de veículos, adaptada de [5]	10
2.4	Via com fila (em cinza)	12
2.5	Modelo <i>Store and Forward</i>	13
2.6	Via urbana	14
3.1	Comparação entre as distribuições de chegada para um fluxo de 60 veículos por hora, adaptada de [26]	22
3.2	Distribuição exponencial de chegadas, adaptada de [26]	23
3.3	Ambiente de simulação AIMSUN, mostrando parte da malha urbana de Macaé-RJ.	24
3.4	Malha viária utilizada nas simulações, identificando as interseções e os <i>links</i> .	25
3.5	rotas definidas para o tráfego de veículos nos experimentos determinísticos. .	26
4.1	Ocupação e contagem da via 7 (ver Figura 3.4) para a operação em tempo-fixo.	30
4.2	Flutuações no tempo de verde da interseção 4	31
4.3	Flutuações nas ocupações das vias da interseção 4	31
4.4	Exemplo de malha urbana	33
4.5	Flutuações no tempo de verde da interseção 4 após o ajuste do fator de importância do <i>link</i> de entrada	34

4.6	Flutuações nas ocupações das vias da interseção 4 após o ajuste do fator de importância do <i>link</i> de entrada	34
4.7	Matriz de realimentação L gerada considerando as rotas determinísticas da malha urbana mostradas na Figura 3.5	35
4.8	Detalhe do cruzamento da interseção 4 da malha em estudo	35
5.1	Cruzamento mostrando uma interseção com duas vias e dois estágios	39
5.2	Uma possível matriz Φ da malha viária da Figura 3.4	41
5.3	Comparação entre as estratégias de controle TUC (com correção dos fatores de importância) e a estratégia proposta neste trabalho: tempos de atraso para chegadas constantes	45
5.4	Comparação entre as estratégias de controle TUC (com correção dos fatores de importância) e a estratégia proposta neste trabalho: tempos de atraso para chegadas exponenciais	45
A.1	Exemplo de ciclo, estágios e tempo perdido.	52

Lista de Tabelas

3.1	Taxas de conversão entre vias da malha viária mostrada na Figura 3.4	27
5.1	Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC original, sem correção dos fatores de importância, para chegadas constantes	42
5.2	Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC com fator de importância corrigido para chegadas constantes.	42
5.3	Resultados de simulação utilizando a estratégia proposta neste trabalho para chegadas constantes.	43
5.4	Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC original para chegadas exponenciais	44
5.5	Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC com fator de importância corrigido para chegadas exponenciais	44
5.6	Resultados de simulação utilizando a estratégia proposta neste trabalho para chegadas exponenciais	46
5.7	Comparação dos resultados de simulação para chegadas constantes: TUC com e sem correção de Fator de Importância	46
5.8	Comparação dos resultados de simulação para chegadas constantes: TUC com correção de Fator de Importância e a Estratégia Proposta	46
5.9	Comparação dos resultados de simulação para chegadas exponenciais: TUC com e sem correção de Fator de Importância	47
5.10	Comparação dos resultados de simulação para chegadas exponenciais: TUC com correção de Fator de Importância e a Estratégia Proposta	47

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de controle em tempo real para tráfego urbano buscam, através da medição contínua do tráfego e cálculo de tempos semaforicos otimizados, suprir deficiências de sistemas amplamente utilizados como os de controle a tempo fixo, com o objetivo de dar mais fluidez ao trânsito adaptando-se às condições vigentes do tráfego.

O controle a tempo fixo utiliza planos de tráfego previamente estabelecidos de tal forma que, dependendo do horário, um plano diferente é utilizado. Durante o dia, ou até mesmo com o passar do tempo, os padrões de tráfego modificam-se e os planos fixos tornam-se obsoletos, se não forem reajustados, o que exige levantamento manual dos volumes de tráfego para o horário considerado por parte da gerência de sistema viário. Além disso, os controladores a tempo fixo não reagem a situações inesperadas do tráfego e pode não haver planos fixos programados para determinadas situações. Neste contexto, os três benefícios principais do controle em tempo-real são a redução no atraso veicular e número de paradas sob condições normais de operação, acomodação de padrões de tráfego incomuns e não planejados, e adaptação às variações dos padrões de tráfego ao longo do tempo [3].

O controle de tráfego em tempo real parte do princípio de observar as condições atuais do trânsito através de sensores instalados nas vias e com estes dados calcular, em tempo real, os tempos de semaforização para a área controlada. Uma das estratégias mais conhecidas para este fim é o *Traffic-responsive Urban Control* (TUC) [5] que analisa várias características do tráfego e atua de forma a otimizar o desempenho da malha viária, com o objetivo principal de diminuir as filas formadas no trânsito.

Entretanto, o controle em tempo real apresenta variações ciclo-a-ciclo dos tempos semaforicos. Tal efeito é esperado, pois, em geral, não há dois ciclos semaforicos consecutivos para os quais os volumes de tráfego sejam idênticos. Como as decisões de controle são baseadas em medições do tráfego durante o ciclo corrente, tais variações entre ciclos acarretam pequenas mudanças nos tempos semaforicos as quais, por sua vez, induzem flutuações no próprio

tráfego. Estabelece-se, então, uma situação de equilíbrio dinâmico, onde oscilações podem surgir e dificultar consideravelmente a ação de controle, uma vez que este equilíbrio pode ser descrito como um ciclo em que o controle reage para eliminar as flutuações e, por sua vez, estas ações geram novas oscilações no tráfego. A este ciclo chamamos de equilíbrio dinâmico.

Porém, *mesmo na ausência de variações nos volumes de tráfego*, são percebidas oscilações no sinal de controle da estratégia TUC, sendo que se esperaria um comportamento praticamente estável, ou seja, um regime permanente [9]. Embora os volumes de tráfego permaneçam sem variações, estas oscilações do controle (entenda-se mudança nos tempos semafóricos) induzem variações no tráfego, o que causa, além do deterioramento dos índices de desempenho da malha, perturbações para os usuários da via que esperam um comportamento estável do controle de tráfego. Estas oscilações ocorrem devido à lógica de operação do TUC, que vem sendo usado para operacionalizar o controle em tempo real em centrais de controle de tráfego. Neste trabalho estuda-se este tipo de oscilações, observadas especificamente na estratégia de controle TUC.

Com o objetivo de eliminar tais flutuações, apresenta-se uma estratégia de controle de tempos de verde diferente da estratégia TUC com o desafio de ainda manter a superioridade do controle em relação ao tempo fixo, no que tange ao desempenho geral da malha viária.

1.1 Motivação e Objetivos do Trabalho

Ao estudar as características do controle de tráfego na cidade de Macaé-RJ [19] utilizando a estratégia de controle TUC, perceberam-se oscilações em determinadas vias da malha e comportamentos discrepantes em algumas interseções, concedendo maiores tempos de verde para estágios cujos *links* estavam menos ocupados. Este comportamento, além de causar oscilações, deteriora o desempenho da malha.

Devido a algumas imprecisões no modelo matemático utilizado pelo TUC, chamado de *store-and-forward*, flutuações provenientes do próprio controle ocorrem. Observando estes fenômenos, buscou-se uma forma de controlar os tempos de verde utilizando outra estratégia de controle diferente da teoria do regulador quadrático linear (LQR), utilizada pelo TUC [5]) com o objetivo de eliminar as flutuações induzidas pelo controle e ainda manter o desempenho do sistema.

1.2 Estrutura

A dissertação continua no Capítulo 2 com a apresentação dos sistemas de controle de tráfego em tempo real, detalhando a estratégia TUC por ser a base para elaboração deste trabalho.

No Capítulo 3, é apresentado o simulador de tráfego *AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Nonurban Networks)*, ferramenta esta que foi utilizada para efetuar os experimentos deste trabalho. Neste capítulo também é detalhada a malha viária de Macaé-RJ, na qual foram feitos os experimentos, e as características de cada um destes.

O Capítulo 4 descreve o fenômeno de flutuações no trânsito no contexto da estratégia TUC e as suas causas, analisando as vantagens e desvantagens de tal estratégia.

No Capítulo 5 é apresentada uma nova proposta de lei de controle para tempos de verde com o intuito de eliminar as flutuações indesejadas e ainda manter os índices de desempenho. Também são mostrados os resultados dos diversos experimentos realizados neste trabalho e as comparações entre eles.

Por fim, no Capítulo 6 retomam-se os pontos importantes do trabalho, destacando-se as principais contribuições observadas e colocando-se sugestões para trabalhos futuros.

Ainda, no Apêndice A são listados os principais conceitos e termos utilizados neste trabalho, referentes à engenharia de tráfego. Também é apresentada, no Apêndice B, a metodologia do Regulador Quadrático Linear. No Apêndice C, algumas propriedades estruturais de sistemas de controle lineares são listadas.

Capítulo 2

Estratégia de Controle TUC (*Traffic-responsive Urban Control*)

Para entender a origem do fenômeno de flutuações comentado no capítulo anterior e poder analisá-lo, neste capítulo faz-se uma revisão da literatura e listam-se as principais estratégias de controle, dentre as quais mais detalhadamente a TUC, que é a técnica de controle utilizada como base para este trabalho.

2.1 Técnicas de Controle em Tempo Real

Duas classes de técnicas de controle realimentado podem ser identificadas: as técnicas cíclicas e as acíclicas. Sistemas cíclicos buscam ajustar continuamente os valores de ciclo, defasagem e frações de verde. SCOOT [16], [25] baseia as decisões de controle em histogramas representativos do fluxo veicular ao longo de dois ciclos, sendo um medido e outro estimado. A decisão de controle consiste em determinar se é melhor manter, adiantar ou atrasar a atuação. Como se baseia em medições do ciclo corrente, flutuações podem ser esperadas. De maneira similar, SCATS [20] toma decisões de manter, adiantar ou atrasar as ações de controle baseado no grau de saturação estimado a partir de medições ao longo de um ciclo, e portanto sujeito a variações. Um terceiro método nesta categoria, TUC [5], [6], [7], [23], ajusta o controle baseado em medições globais das ocupações da malha viária ao longo de um ciclo, calculando cada interseção separadamente de forma a implementar um controle ótimo de descarga das filas formadas [12]. As medições refletem também as variações ciclo-a-ciclo do tráfego, podendo apresentar a mesma flutuação dos tempos semaforicos. Por sua robustez e simplicidade de implementação, aliado aos bons resultados apresentados na prática [17], essa estratégia servirá de base para o presente estudo.

Sistemas acíclicos como OPAC [10], [11], RHODES [15], ALLONS-D [24] e PRODYN

[8] apresentam uma ação de controle essencialmente variável, não se restringindo a um ciclo comum das várias interseções da malha viária. Mesmo a sequência de estágios não é pré-determinada, podendo ser parte da otimização já que essas estratégias não consideram de maneira explícita os valores de tempo de verde, defasagens e ciclos, formulando o controle de tráfego como um problema combinatório de otimização, e, excluindo CRONOS, utilizam algoritmos de complexidade exponencial na busca do mínimo global. Por essa razão, apesar de conceitualmente aplicáveis, essas estratégias não são capazes de controlar malhas viárias nem ao menos de pequeno porte, utilizando então heurísticas em níveis hierárquicos superiores de controle no intuito de realizar a coordenação entre os nós da rede viária. Por outro lado, CRONOS utiliza uma heurística global de otimização com complexidade polinomial, permitindo a consideração simultânea de diversas interseções ao custo de encontrar um mínimo apenas local. Outra importante deficiência das estratégias supracitadas é a incapacidade apresentada na resposta a condições saturadas de tráfego [7].

2.2 TUC

TUC [1], [2] (Traffic-responsive Urban Control) foi desenvolvido de maneira a prover controle de tráfego em tempo-real coordenado em grandes redes urbanas até mesmo em condições de tráfego saturado. Este objetivo é atingido por meio de ferramentas metodológicas que permitem a aplicação em redes de larga escala e dá origem às seguintes características:

- Alta eficiência com respeito à imprecisão das medições, perturbações e falhas de hardware;
- Generalidade que leva à fácil aplicação em redes com características e dimensões arbitrárias virtualmente sem a necessidade de calibração ou ajustes;
- Extrema simplicidade de projeto e implementação de código;
- Requisitos reduzidos de medidas (um detector por via) e de comunicação (medidas/decisões uma vez por ciclo);
- Baixo esforço computacional.

A estratégia de controle TUC está dividida em quatro partes principais [5], que são mostradas na Figura 2.1 e discutidas mais detalhadamente nas subseções posteriores:

- Controle de porcentagens de verde (veja Apêndice A): O objetivo de controle é a minimização do risco de sobressaturação e bloqueio de interseções por fila em intersecção a jusante. A metodologia empregada nesta parte da estratégia TUC é baseada na Teoria de Regulador Quadrático Linear da Teoria de Controle Automático, e é aplicada em toda a rede.

- Controle de ciclo (veja Apêndice A): É efetuado através de um simples algoritmo baseado em realimentação, ou seja, controle apenas com um ganho proporcional, que modifica o tempo de ciclo de maneira a adaptar a duração deste ao nível máximo de saturação correntemente observado na rede.
- Controle de defasagem (veja Apêndice A): É aplicado através de uma lei de controle descentralizada que modifica a defasagem dos estágios principais de interseções sucessivas ao longo de arteriais, de maneira a criar "ondas verdes", levando em consideração uma possível existência de filas.
- Prioridade para transporte público coletivo: Esta parte da estratégia deve prover prioridade para veículos de transporte público modificando localmente de maneira apropriada os resultados globais dos módulos anteriores.

Devido a estas vantagens é que esta estratégia de controle foi escolhida para ser a base deste trabalho.

Estas quatro partes colaboram para alcançar o objetivo de controle da malha urbana como um todo. Neste trabalho foi utilizado apenas o controle de tempo de verde, já que o foco de estudo está em cruzamentos sem transporte público e sem vias arteriais. O controle de ciclo não foi utilizado visando reduzir a interferência de ações de controle simultâneas com o objetivo de analisar puramente o efeito da indução de perturbações pela ação de controle de tempo de verde. Antes de falar nas partes do controle TUC, faz-se necessário estudar como é feita a estimação de veículos nas vias.

2.3 Estimação do Número de Veículos na Via

Atualmente, a técnica mais utilizada para obter dados das vias em tempo real é o emprego de laços indutivos (veja Apêndice A). Esta técnica permite conhecer apenas uma indicação das condições do tráfego nas proximidades do laço indutivo através da medição da ocupação do *link* e da contagem (volume) de veículos. Esta medição pode ser dividida em três grupos:

- Baixa ocupação: indica que o fim da fila de veículos encontra-se à frente do sensor (ainda não chegou ao detector) e nestas condições representa a medição da quantidade de veículos que entram pelo *link*.
- Ocupação média: indica que o fim da fila de veículos está nas proximidades do detector.
- Ocupação alta: indica que o fim da fila de veículos encontra-se a montante do senso.

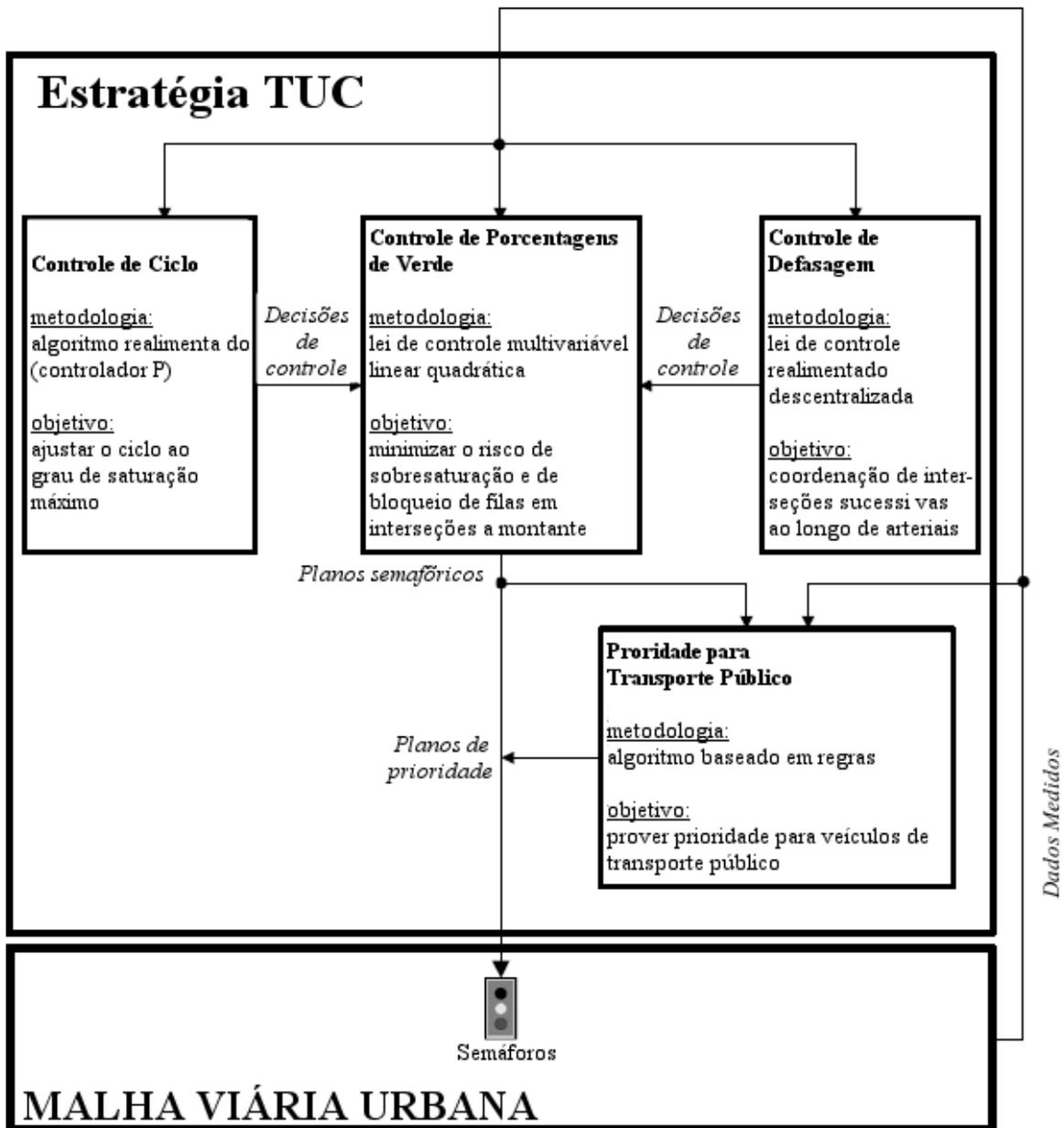


Figura 2.1: Estratégia de controle TUC. Adaptada de [5]

Após a realização de experimentos com o auxílio de simuladores pode-se verificar que não existe uma relação linear entre valores de ocupação e quantidade de veículos em um *link*, sendo que a medição de ocupação reflete apenas as condições do tráfego nas proximidades do detector enquanto a quantidade de veículos deveria ser uma medição em toda a área do *link* em questão [5]. Considere o exemplo mostrado na Figura 2.2. Assume-se que os instantes $k = 1$ até $k = 4$, que estão representados pelas partes (a), (b), (c) e (d) da Figura 2.2, representam a condição de uma via em quatro períodos consecutivos iguais ao tempo de ciclo da interseção. Nos quatro instantes o detector está coberto totalmente por veículos. Assim, é possível que o detector meça uma ocupação de 100% em todos os casos (veja a Figura 2.2 (e)), sendo que para cada caso há um número diferente de veículos na via, e como consequência a relação entre ocupação e número de veículos na via toma a forma mostrada na Figura 2.2 (e).

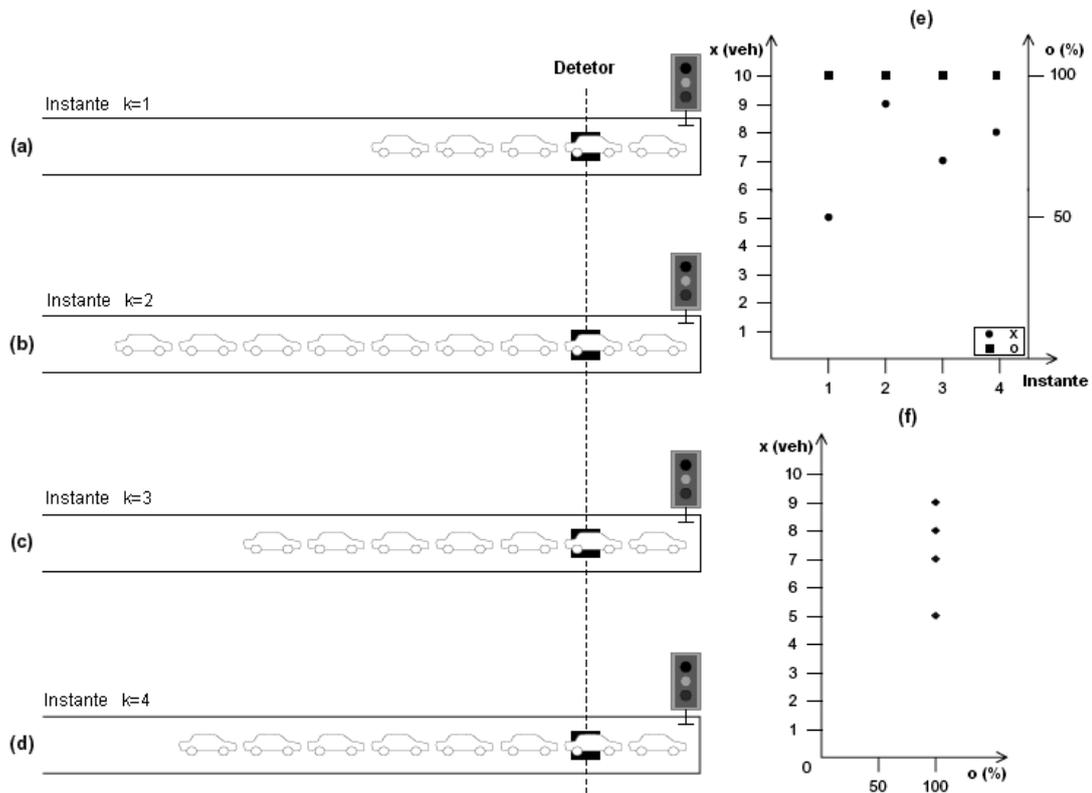


Figura 2.2: Situação em que fica evidente a falta de relação de um-para-um entre ocupação e quantidade de veículos em uma via, adaptada de [5]

Após várias simulações, os proponentes da estratégia TUC puderam identificar uma linha de tendência que poderia representar o número de veículos dependendo da ocupação medida, como mostrado na Figura 2.3, o que resultou em uma função não-linear encontrada empiricamente para fazer a transformação de ocupação em número de veículos, levando em conta o posicionamento do detector. Por outro lado, o posicionamento do detector também

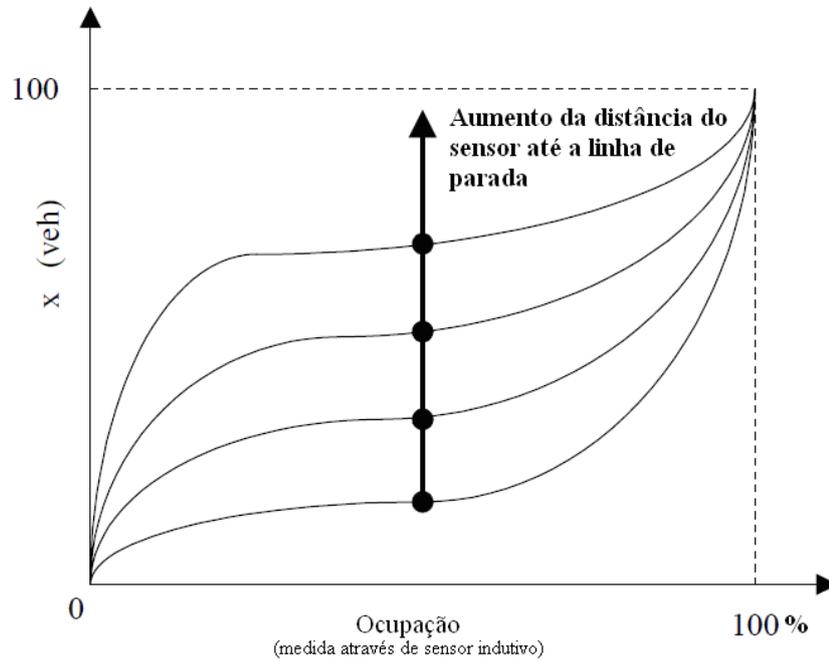


Figura 2.3: Transformação aproximada entre ocupação e número de veículos, adaptada de [5]

influencia na medição, sendo que os resultados posicionando o sensor na metade do comprimento da via apresentaram indicações mais reais da quantidade de veículos [5].

2.4 Controle de Ciclo

O controle de ciclo da semaforização de um sistema viário possibilita o aumento da capacidade das interseções, já que ao aumentar o tempo de ciclo os tempos perdidos, que são constantes, ficam proporcionalmente menores do que o tempo de verde efetivo. Porém, para permitir a coordenação da defasagem entre as interseções, o tempo de ciclo é único para todas elas. Um tempo de ciclo muito grande pode resultar em um atraso veicular em interseções não saturadas, pois haverá tempo de espera maior durante as fases vermelhas.

O controle de ciclo é efetuado através de um algoritmo baseado em realimentação, ou seja, controle apenas com um ganho proporcional, que modifica o tempo de ciclo de maneira a adaptar a duração do ciclo ao nível máximo de saturação correntemente observado na rede. O algoritmo deste controle pode ser representado nos seguintes passos:

1. Uma porcentagem p das vias da malha com carregamento máximo corrente $\sigma_z(k) = x_z(k)/x_{z,max}$, onde x_z representa o número de veículos nas vias, é identificada e com os seus respectivos carregamentos é feita uma média para estipular o carregamento médio máximo $\sigma(k)$.

2. O ciclo da malha é calculado através da seguinte lei de controle:

$$C(k) = C^N + K^c(\sigma(k) - \sigma^N) \quad (2.1)$$

onde C^N é o ciclo nominal da malha (por exemplo igual ao ciclo mínimo admissível C_{min}), σ^N é a média de carregamento nominal, por exemplo igual a zero, e K^c é o parâmetro de controle que determina a intensidade da reação do controle. Após a aplicação da equação (2.1), o tempo de ciclo calculado é ainda modificado segundo a restrição que diz que o ciclo deve estar dentro dos limites $[C_{min}, C_{max}]$ para que a sua aplicação seja factível, onde C_{min} e C_{max} são o tempo mínimo e máximo de ciclo permitidos, respectivamente.

3. Se o resultado da aplicação do tempo de ciclo calculado $C(k)$ é suficientemente alto enquanto todas as vias de chegada a determinada interseção apresentarem níveis de saturação suficientemente baixos, então estas interseções não saturadas operarão com tempo de ciclo de $C(k)/2$.

Os primeiros dois passos acima citados servem para ajustar o tempo de ciclo aos níveis máximos de saturação observados, enquanto o terceiro passo procura reduzir os tempos de atraso que ocorreriam em algumas interseções não saturadas devido a altos tempos de ciclo. A justificativa teórica de controle para a utilização de um ganho proporcional K_c na Equação (2.1) está de acordo com o já mencionado impacto que o tempo de ciclo tem sobre a capacidade da interseção. Ou seja, para um tempo de ciclo maior a capacidade da interseção aumenta proporcionalmente, sendo que isto leva a uma redução de $x_z(k)$ e, portanto do carregamento da via, que corresponde a um efeito integrativo no sistema. Em outras palavras, o processo sob a ação do controle de ciclo possui um integrador e, desta forma, um regulador apenas proporcional (P) é perfeitamente adequado para estabilizar o carregamento da via em torno de um valor apropriado.

2.5 Controle de Defasagem

O controle de defasagem é utilizado para permitir a formação de uma "onda verde" no sentido das vias arteriais. Desta forma, os veículos trafegando por estas vias, se transitarem em velocidade nominal, poderão encontrar semáforos "sincronizados", ou seja, verdes durante o trajeto na arterial. O controle de defasagem TUC é baseado nas seguintes suposições:

- A defasagem é inicialmente especificada em arteriais de mão única que não se interceptam.

- No caso de arteriais de mão dupla, uma defasagem é especificada para cada direção e a defasagem que será realmente implementada é a soma ponderada das defasagens nas duas direções.
- No caso de arteriais que se interceptam, o TUC considera uma ordem de prioridade que é pré-especificada na configuração da defasagem e o controle de defasagem é implementado a cada arterial sequencialmente, começando com a arterial com maior prioridade.

A estratégia TUC realiza o controle de defasagem de maneira descentralizada, isto é, para pares sucessivos de interseções ao longo das arteriais pré-definidas. Para cada par de interseções, a especificação de defasagem modifica o tempo de início de um estágio principal específico da interseção a montante.

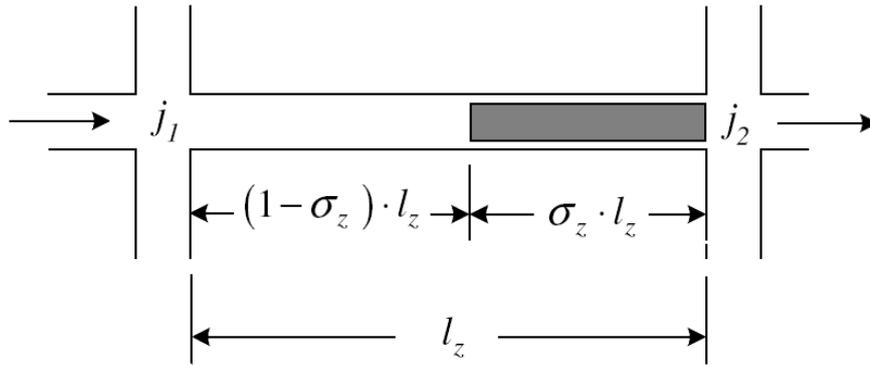


Figura 2.4: Via com fila (em cinza)

Como mencionado anteriormente, TUC considera a possível existência de fila de veículos enquanto especifica a defasagem entre duas interseções sucessivas j_1 e j_2 e a via z da rede que as conecta, no sentido j_1 para j_2 e que recebe direito de passagem no estágio principal da interseção j_2 que é mostrada na Figura 2.4, com comprimento do *link* l_z , velocidade de cruzamento V_z e com carregamento do *link* σ_z .

O comprimento da fila (parte cinza na Figura 2.4) é aproximadamente igual ao produto do carregamento da via pelo seu comprimento, ou seja $\sigma_z(k)l_z$. Enquanto o número de veículos na via for igual a zero, a defasagem entre as interseções deve ter o valor igual ao tempo de viagem em velocidade de cruzamento l_z/V_z na via. Isto é, o ciclo da interseção a jusante deve começar depois do ciclo da interseção a montante, ao que se denomina defasagem positiva. À medida que o número de veículos na via z cresce, a defasagem deve decrescer de maneira a permitir um descarregamento parcial da fila que se forma na via. Desta forma, o ciclo na interseção a jusante deve começar antes do que no caso da inexistência de filas e, em alguns casos, pode até mesmo começar mais cedo que o ciclo na interseção a montante, ao que se chama defasagem negativa.

Em outras palavras, uma defasagem ideal seria obtida quando as duas ondas de fluxo veicular descritas abaixo se encontrassem exatamente na cauda da fila existente:

- Onda de fluxo criada devido à mudança do sinal verde na interseção a montante j_1 . Esta onda se move a jusante com velocidade V_z , de forma que atingirá a cauda da fila em um tempo $t = [1 - \sigma_z(k)]l_z/V_z$ após a mudança de verde.
- Onda cinemática criada devido à mudança para verde na interseção a jusante j_2 . Esta onda se move a montante (ao longo da fila) com velocidade V^c que normalmente é estimada em torno de 15 km/h. Desta forma, a onda cinemática irá atingir a cauda da fila em um tempo $t = \sigma_z(k)l_z/V^c$.

2.6 Controle das Porcentagens de Verde

A metodologia empregada pelo TUC para o controle de tempos de verde é a formulação do problema de controle de tráfego como um problema de controle quadrático linear ótimo [5] baseado no modelo matemático *store-and-forward*. O controle das porcentagens de verde é o ponto central deste trabalho, já que as principais contribuições estão direcionadas para a formulação de uma nova lei de controle de tempos de verde.

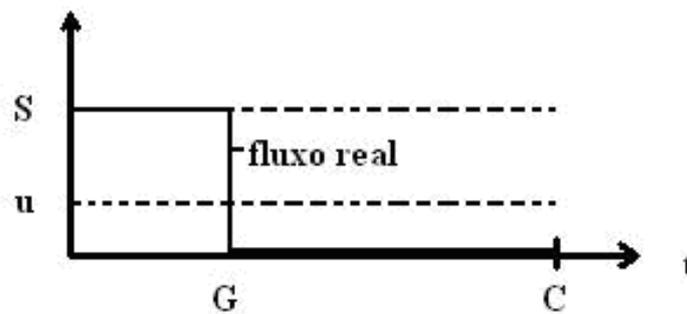


Figura 2.5: Modelo *Store and Forward*

Segundo a modelagem *store-and-forward*, os veículos transitam com velocidade constante e os cruzamentos se comportam de forma a acumular o excesso de veículos se o fluxo de saída for menor do que o de entrada, como mostrado na Figura 2.5. Assumindo demanda suficiente antes do cruzamento, a simplificação do modelo permite escrever o fluxo de saída $u(k)$ como:

$$u(k) = \frac{S \cdot G(k)}{C(k)} \quad (2.2)$$

onde S é o fluxo de saturação, G é o tempo de verde e C é o tempo de ciclo da interseção. A Equação (2.2) mostra que $u(k)$ é o fluxo total, calculado por $S \cdot G(k)$ dividido pelo tempo total de ciclo, resultando em uma média do fluxo durante o ciclo de operação da interseção.

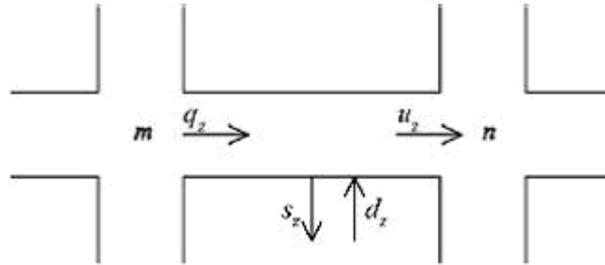


Figura 2.6: Via urbana

Considerando a interseção mostrada na Figura 2.6, a dinâmica na via z é expressa pela seguinte equação:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (2.3)$$

onde x_z é o número de veículos na via z , q_z e u_z são fluxos de entrada e saída respectivamente, da via z no período $[kT, (k+1)T]$, sendo T o intervalo de controle e $k = 1, 2, 3, \dots$. Para o fluxo que sai, tem-se a fórmula $s_z(k) = t_{z,0} q_z(k)$ com as taxas de saídas $t_{z,0}$ fixas e conhecidas. d_z é a demanda interna de entrada. Um exemplo de demanda interna de saída poderia ser a saída de veículos da via para um estacionamento. Por sua vez, a entrada de veículos provenientes de estacionamento em direção à via pode ser exemplo de demanda interna de entrada.

Pode-se formular o fluxo de entrada da via z pela equação $q_z(k) = \sum_{w \in I_{j_1}} t_{w,z} u_w(k)$, onde $t_{w,z}$ com $w \in I_m$, ou seja w representando todas as vias que chegam à interseção j_1 , são as taxas de conversão à via z das vias que convergem para a interseção j_1 . Assumindo que o espaço disponível nas vias a jusante e que x_z são bastante grandes, o fluxo de saída u_z de uma via é igual ao fluxo de saturação S_z se a via tem direito de passagem, e é igual a zero caso contrário. Entretanto, se o intervalo de controle T é escolhido não menor que o tempo de ciclo, um valor médio é obtido por $u_z(k) = S_z G_z(k) / C$ (modelo *store and forward*), onde G_z é o tempo efetivo de verde na via z calculado como $G_z(k) = \sum_{i \in v_z} g_{j,i}(k)$, onde v_z é o conjunto de estágios em que a via z tem direito de passagem.

Tendo os tempos de verde nominais $g_{j,i}^N$ de tal forma que possa ser calculada uma demanda de entrada d_z^N que leve a um regime permanente de filas, obtém-se:

$$(1 - t_{z,0})q_z^N + d_z^N - u_z^N = 0 \quad (2.4)$$

onde q_z^N e u_z^N são os fluxos nominais de regime permanente. Desta forma, pode ser definida a seguinte equação de estados:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[\begin{array}{l} (1 - t_{z,0}) \sum_{w \in I_m} \frac{t_{w,z} S_w(\sum_{i \in v_w} \Delta g_{m,i}(k))}{C} + \\ \Delta d_z(k) - \frac{S_z(\sum_{i \in v_z} \Delta g_{n,i}(k))}{C} \end{array} \right] \quad (2.5)$$

onde $\Delta g_{j,i} = g_{j,i} - g_{j,i}^N$ e $\Delta d_z = d_z - d_z^N$.

Considerando uma malha viária para todas as vias $z \in Z$, obtém-se a seguinte equação de estados matricial:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta g(k) + T\Delta d(k) \quad (2.6)$$

onde $x(k)$ é o vetor de estados contendo o número de veículos nas vias, Δg é o vetor de controle agregando os sinais $\Delta g_{j,i}$ com $i \in F_j$ e para todo $j \in J$, com F_j sendo o conjunto de fases da interseção j , e Δd é o vetor contendo as demandas de entrada $\Delta d = d_z - d_z^N$. A matriz A como sendo a matriz de estado e igual à identidade $A = I$, B e T as matrizes de entrada e perturbação, respectivamente.

A metodologia LQ (Linear Quadrática) utilizada pelo TUC presume não existirem elementos de predição o que leva a considerarmos que $\Delta d = 0$, tornando a lei de controle reativa apenas a perturbações já conhecidas. Desta forma, obtém-se a seguinte equação de estados:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta g(k) \quad (2.7)$$

onde $A = I$ e B é a matriz que representa a topologia da malha, os estágios fixados, os fluxos de saturação e as taxas de conversão. x é o vetor de estados correspondente ao número de veículos na via z .

O objetivo de controle de minimização de filas pode ser traduzido pela minimização e equalização da relação $x_z/x_{z,max}$ (medida em veículos), onde $x_{z,max}$ é a capacidade de armazenamento da via z . O critério quadrático que leva em consideração este objetivo de controle pode ser representado pela equação:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (\|\mathbf{x}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{g}(k)\|_R^2) \quad (2.8)$$

onde Q e R são matrizes de peso diagonais, definidas positivas. O horizonte de tempo infinito, aplicado na Equação (2.8), permite obter uma lei de realimentação invariante no tempo.

O primeiro termo da equação (2.8) penaliza os desvios dos estados $x(k)$ (número de veículos) o que representa a minimização da quantidade de veículos nas vias. Para tal, a diagonal principal de Q , ou seja, os fatores de ponderação correspondentes ao número de veículos x_z , são igualados a $1/x_{z,max}$.

A escolha da matriz R de ponderação afeta a magnitude das reações de controle. Isto se faz necessário para evitar altos valores de realimentação o que poderia levar a um comportamento de controle agressivo. Normalmente, a matriz R é escolhida como sendo $R = rI$. A escolha de r é feita por tentativa e erro, de modo a alcançar o comportamento satisfatório do sistema para as diversas aplicações de tráfego existentes. O procedimento de tentativa e erro começa com a definição de alguns valores plausíveis para r e então, os resultados do controle são analisados por simulação. Se o desempenho não for satisfatório, por exemplo a reação de controle for demasiado lenta ou demasiado rápida, r deve ser devidamente modificado e a simulação repetida. O processo é iterado quantas vezes forem necessárias até que o comportamento do controle seja satisfatório.

A minimização do objetivo de controle que leva em conta a ocupação e o esforço de controle leva à seguinte lei de controle realimentado:

$$g(k) = g^N - Lx(k) \quad (2.9)$$

onde g é o vetor de tempos de verde e L é a matriz de controle resultante da solução da equação discreta de Ricatti (ver Apêndice B), realizada *offline*, e x o vetor contendo o número de veículos nas vias da malha.

Como a metodologia LQR não leva em consideração as restrições de controle existentes, elas são aplicadas após o cálculo de $g(k)$, através da solução, em tempo-real, do seguinte

problema de otimização para cada interseção j :

$$\min_{G_{j,i}} \sum_{i \in F_j} (g_{j,i} - G_{j,i})^2 \quad (2.10a)$$

Sujeito a :

$$\sum_{i \in F_j} G_{j,i} + L_j = C \quad (2.10b)$$

$$G_{j,i} \in [g_{j,i}^{\min}, g_{j,i}^{\max}], \quad \forall i \in F_j \quad (2.10c)$$

onde $G_{j,i}$ são os tempos de verde factíveis mais próximos possível dos tempos de verde $g_{j,i}$ não factíveis obtidos do controlador; C é o ciclo semaforico, F_j é o número de estágios da interseção e $g_{j,i}^{\min}$ e $g_{j,i}^{\max}$ são os tempos de verde mínimo e máximo, respectivamente.

Um algoritmo foi desenvolvido para a resolução, com baixo custo computacional, deste tipo de problemas, onde a solução exata é encontrada em um número finito de iterações que não excede o número $|F_j|$ de estágios da interseção i .

Por outro lado, para calcular a matriz de controle L basta especificar as matrizes B , Q e R e através de um software que utilize a metodologia LQ resolver a equação de Riccati. Para determinar as matrizes A , B , Q e R outro software dedicado a essa finalidade pode ser utilizado, e este deve ser alimentado com as seguintes informações:

- o intervalo de controle T_{TUC} ,
- o número de *links* $z \in Z$,
- o número de estágios i de todas as interseções $j \in J$,
- a alocação de cada estágio v_z para cada *link* $z \in Z$,
- o fluxo de saturação S_z para cada *link* $z \in Z$,
- as taxas de conversão $t_{z,w}$ de cada *link* $z \in Z$ para cada *link* $w \in Z$ (é assim que a topologia da malha é indiretamente definida),
- as taxas de descarga $t_{z,0}$ para cada *link* $z \in Z$,
- as capacidades de armazenamento $x_{z,max}$ para cada *link* $z \in Z$, e
- os elementos da diagonal principal da matriz R

Com estas informações é possível obter automaticamente as matrizes A , B , Q e R de uma malha urbana a ser controlada.

Uma vez que a lei de controle multivariável (2.9) foi desenvolvida baseada em um modelo que não considera os efeitos de perturbações, esta possui comportamento reativo e não antecipativo, ou seja, reage às medições em tempo real da malha que está sob controle [5]. Desta forma, o controle responde indiretamente a perturbações desconhecidas, e, portanto, não precisa de qualquer previsão das condições de tráfego futuro. Por outro lado, é sabido que a informação da quantidade de veículos, necessária para executar a lei de controle, não pode ser diretamente medida até que sistemas de visão computacional sejam utilizados para este fim. Por esta razão é utilizada a informação de ocupação da via o_z , obtida através de detectores indutivos tradicionalmente utilizados, que é transformada em número de veículos (aproximadamente) através de uma função não linear, conforme apresentado na Seção 2.3.

2.7 Sumário

Foram apresentados conceitos sobre técnicas de controle em tempo real, mais especificamente a estratégia de controle TUC. Também foi comentado sobre as dificuldades que se tem na estimação de veículos em uma via e as estratégias adotadas para contornar esse problema.

Capítulo 3

Características do Simulador e da Malha Viária

No capítulo anterior foram expostas as técnicas de controle de tráfego em tempo-real utilizadas atualmente, das quais a técnica chamada TUC foi mais explorada.

Neste capítulo será apresentado o simulador *AIMSUN* e suas características de funcionamento. Será também detalhada a malha viária na qual foram feitos os experimentos deste trabalho.

3.1 Modelos de simulação: Macroscópico e Microscópico

Técnicas de simulação, que começaram a aparecer na área de transportes em 1950, podem ser hoje consideradas um elemento essencial para todos os que trabalham no projeto ou operação de estratégias de controle.

Duas técnicas de simulação são utilizadas com o objetivo de emular o comportamento do tráfego: modelos macroscópicos [27], [18] e microscópicos [22]. O modelo macroscópico de trânsito é baseado em uma analogia entre fluxo de tráfego e escoamento de fluidos. Já o microscópico leva em conta o comportamento individual de cada veículo.

O modelo macroscópico apresenta um nível de abstração maior do que o microscópico. Isto faz com que a técnica tenha as seguintes vantagens, se comparado com o modelo microscópico:

- A quantidade de dados de entrada para o modelo macroscópico é reduzida e a modelagem de redes maiores e complexas é facilitada,

- menos tempo de processamento computacional é necessário,
- a calibração do modelo macroscópico é mais simples.

Entretanto, simuladores macroscópicos têm suas limitações devido à sua incapacidade de representar fenômenos microscópicos como conflitos entre veículos, descontinuidade do fluxo introduzida pelo próprio sinal de trânsito, não-homogeneidade entre duas vias adjacentes, etc. Por um lado, o modelo de simulação macroscópico é apropriado para simular grandes redes, como rodovias, mas não apresenta resultados satisfatórios quando os impactos de ocorrências microscópicas são levados em conta. Por outro lado, o modelo microscópico de simulação tem a capacidade de trabalhar com mais peculiaridades do trânsito. Entretanto, isto requer um volume de dados muito elevado o que em uma simulação de redes de grande porte pode representar um fator proibitivo para a sua implementação. Por estes motivos, este modelo de simulação é apropriado para avaliar estratégias de controle em redes de tamanho pequeno a médio [21].

3.2 Seguimento de Veículo (*Car-following*): Comportamento dos Veículos em um Microsimulador

O modelo que descreve como um par de veículos se comporta e como interagem entre si, denominado *Car-following*, é o elemento central dos modelos microscópicos de tráfego e, portanto, define a qualidade do comportamento de veículos na simulação de tráfego em microsimuladores. O entendimento do comportamento dos motoristas é fundamental para a avaliação do desempenho dos modelos de trânsito. Vários fatores que afetam ou influenciam o comportamento dos veículos modelados pelo *car-following* foram encontrados e estes podem ser divididos em duas categorias.

A primeira categoria contempla as diferenças individuais de idade, sexo e experiência do motorista além do tamanho e características específicas do veículo. A segunda categoria engloba os fatores situacionais envolvendo tanto as condições do ambiente onde está o veículo quanto as condições em que o motorista se encontra. Dentre as condições do ambiente podem-se citar a hora do dia, o dia da semana, o clima e as condições da estrada (via). Fatores individuais do motorista podem ser a distração, a falta de reflexo devido à ingestão de álcool ou quaisquer elementos tóxicos, o estresse e a fadiga, a distância a ser percorrida, etc. Uma outra característica que é influenciada pelo motorista é a distância entre veículos, que tecnicamente é denominada *headway*. Esta distância é maior quanto maior for a idade do motorista, ao passo que pessoas do sexo masculino tendem a manter um *headway* menor do que as do sexo feminino. Por exemplo, pessoas com mais de 59 anos mantêm um *headway* de, em média, 1,83 s, aproximadamente 23% a mais do que um motorista na faixa de idade entre 23 e 37 anos [22].

Os modelos de seguimento de veículo são equações do tipo estímulo-resposta, em que a resposta é a reação de um motorista ao movimento do veículo que o precede na via. A resposta de sucessivos motoristas numa via é acelerar ou desacelerar proporcionalmente à magnitude do estímulo durante um certo tempo t e que começa após uma inércia de tempo T . A equação base para esse tipo de modelo é:

$$\text{Resposta}(t + T) = \text{Sensibilidade} \cdot \text{Estimulo}(t) \quad (3.1)$$

Um exemplo de modelo de seguimento de veículo linear, pois a resposta, aceleração ou desaceleração, é diretamente proporcional ao estímulo fornecido por intermédio da diferença entre as velocidades dos dois veículos é dado por:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = \alpha[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (3.2)$$

onde \ddot{x}_{n+1} e \dot{x}_{n+1} são a aceleração e a velocidade do veículo seguidor e \dot{x}_n é a velocidade do veículo à frente.

3.3 Simulador de Tráfego *AIMSUN*

O simulador *AIMSUN* (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban e Non-Urban Networks*) é um simulador de tráfego microscópico apto para trabalhar com diferentes tipos de tráfego, como redes urbanas, estradas, rodovias, rótulas, arteriais e qualquer combinação destes, desenvolvido no *Laboratorio de Investigación Operativa y Simulación*, que é um grupo de pesquisa da *Universitat Politècnica de Catalunya*. O simulador foi projetado e implementado como uma ferramenta para análise de tráfego com o intuito de ajudar os engenheiros na concepção e avaliação de sistemas de tráfego. Pode ser muito útil em testes de novos sistemas de controle de tráfego e políticas de gestão, quer sejam baseados em tecnologias tradicionais ou como a implementação de Sistemas de Transporte Inteligentes. O *AIMSUN* segue uma abordagem de simulação microscópica. Isto significa que o comportamento de cada veículo da rede é continuamente modelado durante todo o período de tempo da simulação, enquanto ele viaja através da malha [22].

O modelo de simulação implementado no *AIMSUN* está baseado no modelo Gipps [14], que considera que veículos aceleram para atingir a velocidade desejada e desaceleram quando o condutor precisa evitar uma colisão. Desta forma, deslocam-se e, continuamente, buscam manter a velocidade de cruzeiro.

É possível configurar a entrada de veículos na malha com diversas distribuições de chegada, dentre as quais estão as distribuições Exponencial, Uniforme, Normal, Constante

e ASAP (Assim que possível). Para exemplificar como seria o espaçamento entre veículos utilizando cada uma das distribuições disponíveis, mostra-se na Figura 3.1 um comparativo entre elas para uma via de chegada com taxa de 60 veículos por hora sem sofrer congestionamento [26]. As marcas no eixo horizontal são os veículos e cada distribuição de chegada é identificada com um símbolo diferente, detalhado na legenda. Nota-se que, por exemplo, para as chegadas constantes, o espaçamento entre veículos é sempre o mesmo.

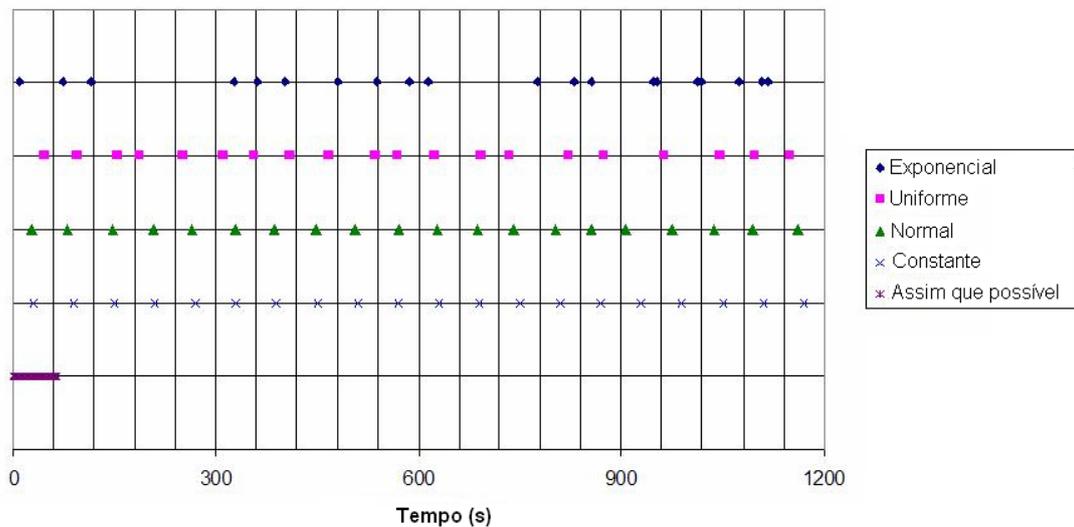


Figura 3.1: Comparação entre as distribuições de chegada para um fluxo de 60 veículos por hora, adaptada de [26]

A seguir, são apresentadas as definições das chegadas constantes e exponenciais.

Chegadas Constantes: O intervalo de tempo entre dois veículos consecutivos (*headway*) na entrada da malha é sempre constante. O fluxo de entrada de veículos é dado por λ , em veículos por segundo e o *headway* entre eles dado por $1/\lambda$ segundos.

Chegadas Exponenciais: A distribuição exponencial tem larga aplicação em engenharia. Esta distribuição calcula probabilidades para um certo tempo e espaço entre eventos sucessivos, ocorrendo em um processo de Poisson. É comumente usada para tempos entre chegadas a, por exemplo, cabines de pedágios. Pode-se usar também esta distribuição para calcular probabilidades de falhas, quando do estudo de confiabilidade; ou seja, o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que uma peça é sujeita a um esforço mecânico e o instante em que ocorre uma falha (a quebra da peça, por exemplo). Desta forma, é uma distribuição adequada para simular as chegadas de veículos em uma malha real.

A função densidade de probabilidade para uma distribuição exponencial é expressa por

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (3.3)$$

$$f(t) = 0 \quad \text{para } t < 0 \quad (3.4)$$

onde o fluxo de entrada de veículos é dado por λ , em veículos por segundo e o *headway* entre eles dado por $1/\lambda$ segundos.

O intervalo de tempo entre dois veículo consecutivos (*headway*) na entrada da malha é amostrado através da distribuição exponencial, mostrada na Figura 3.2.

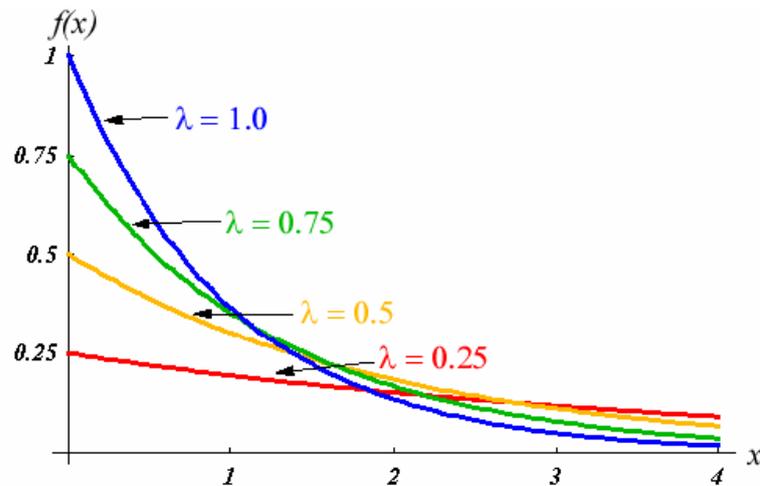


Figura 3.2: Distribuição exponencial de chegadas, adaptada de [26]

onde $f(t)$ é a função densidade de probabilidade e t é o tempo entre os veículos (*headway*).

Neste trabalho foram utilizadas as distribuições constante e exponencial. A distribuição constante foi utilizada nos experimentos onde o fator determinístico era desejado. Por outro lado, a distribuição exponencial foi usada nas simulações em que se desejava obter um comportamento dos veículos o mais parecido com a realidade de uma malha viária sujeita a perturbações naturais no tráfego.

Na Figura 3.3 mostra-se o ambiente de simulação AIMSUN, onde foi montada parte da malha urbana de Macaé-RJ, utilizada neste trabalho.

3.4 Características da Malha a ser Controlada

Com a finalidade de estudar de maneira isolada o fenômeno de flutuações, foi estruturada uma malha viária onde pudessem ser retiradas o máximo de condições probabilísticas, tornando o experimento o mais determinístico possível. Para isso, foi escolhida uma parte da

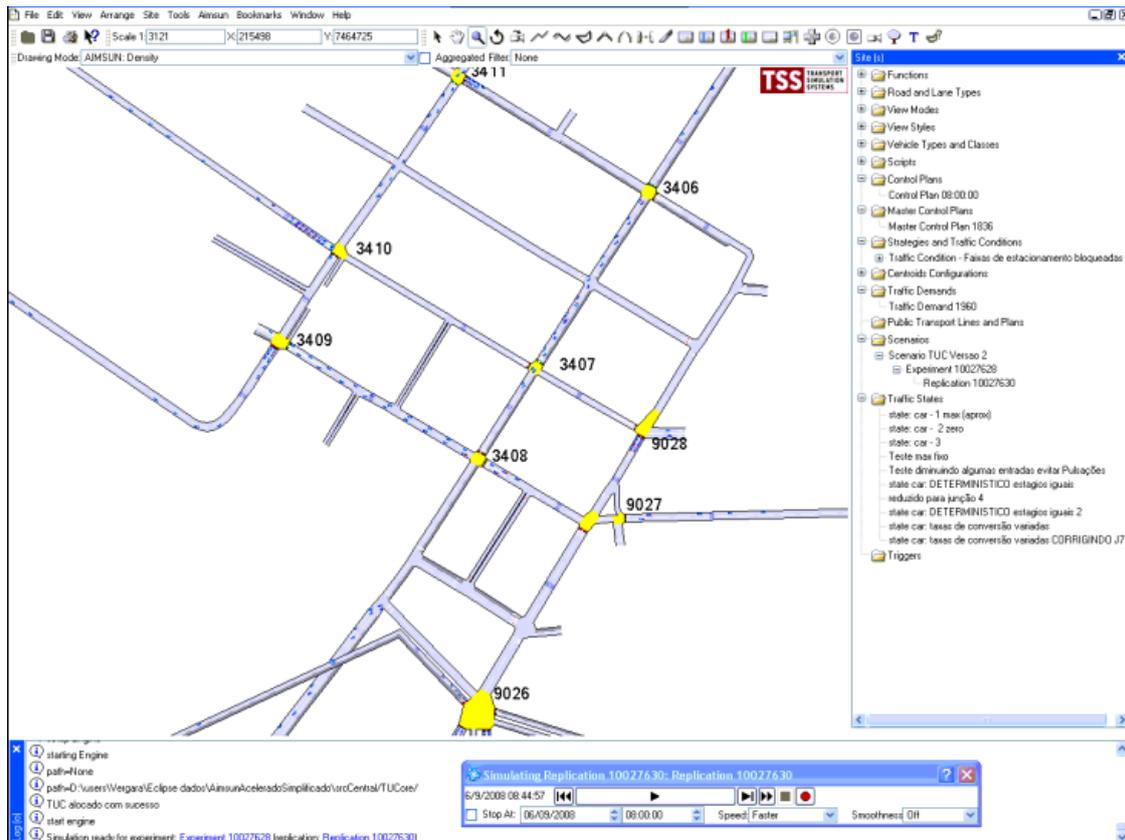


Figura 3.3: Ambiente de simulação AIMSUN, mostrando parte da malha urbana de Macaé-RJ.

malha viária de Macaé-RJ, na qual foram definidas rotas fixas para os veículos. Esta malha possui 11 interseções (junções) controlados, com 23 estágios e 26 *links* e está mostrada na Figura 3.4, sendo que todas as vias têm fluxo de saturação igual a 1800 veículos por hora por faixa.

Para os experimentos chamados de determinísticos, as rotas que os veículos percorrem foram definidas de forma que não há conversão para *links* perpendiculares, ou seja, a rota tem taxas de conversão de *cem por cento* para o *link* consecutivo em linha reta e *zero* para os demais, definindo rotas fixas que são mostradas na Figura 3.5.

Foram também realizados experimentos utilizando rotas com taxas de conversão entre as vias, dando uma característica probabilística para o experimento, o que se assemelha mais à realidade do trânsito em uma malha urbana. As taxas de conversão utilizadas para estes experimentos são dadas na Tabela 3.1.

Estipulando o ciclo semafórico em 60 s e o verde nominal em 30 s para todas as interseções com 2 estágios, que são as que foram analisadas neste trabalho, os fluxos de entrada utilizados para os experimentos foram definidos pelo fluxo máximo possível para a via utilizando os verdes nominais como tempo de verde. A esta demanda foi chamada de *fluxo nominal*.

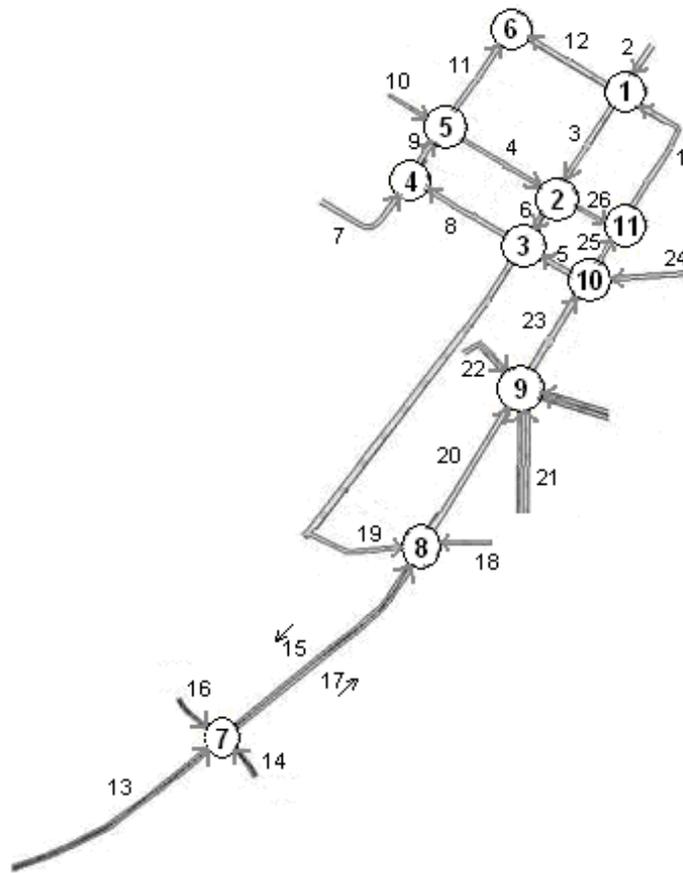


Figura 3.4: Malha viária utilizada nas simulações, identificando as interseções e os *links*

3.5 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de micro e macrosimulação, assim como as características do simulador *AIMSUN*. Foi também descrita a malha viária na qual foram feitos os experimentos deste trabalho e suas características.

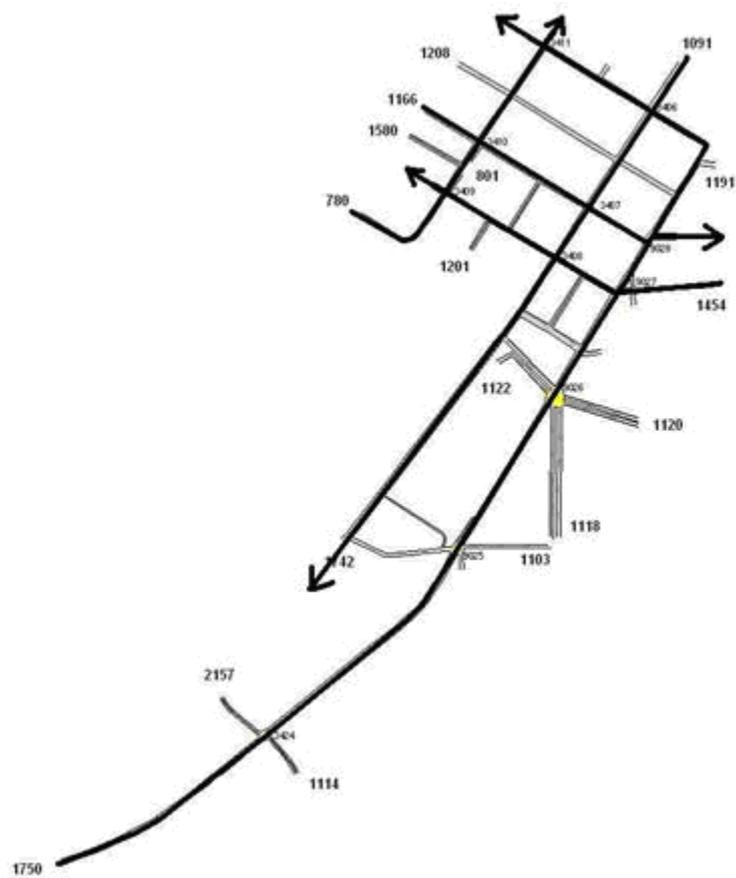


Figura 3.5: rotas definidas para o tráfego de veículos nos experimentos determinísticos.

Tabela 3.1: Taxas de conversão entre vias da malha viária mostrada na Figura 3.4

<i>Link de Origem</i>	<i>Link de Destino</i>	<i>Taxa de Conversão (%)</i>
1	3	25
1	12	75
2	3	50
2	12	50
3	6	50
3	26	50
4	6	25
4	26	75
5	8	75
6	8	50
7	9	50
8	9	25
9	4	50
9	11	50
10	4	75
10	11	25
13	17	75
14	17	40
16	17	40
17	20	100
18	15	50
18	15	50
19	15	50
19	20	50
20	23	100
21	23	50
22	23	30
23	5	25
23	25	75
24	5	75
24	25	25
25	1	75
26	1	25

Capítulo 4

Identificação de Flutuações Induzidas pelo Controle

Nos capítulos anteriores foram apresentadas a estratégia de controle TUC, as ferramentas de simulação utilizadas e a configuração da malha a ser estudada. Neste capítulo será feita uma análise detalhada do problema de flutuações no trânsito e as suas causas, assim como os resultados obtidos utilizando a estratégia TUC de controle.

4.1 Caracterização do Problema

O tráfego em uma malha urbana certamente não se comporta de maneira uniforme em todos os momentos do dia. Porém, para fins de análise de desempenho de estratégias de controle, é interessante fazer simulações, através de modelos computacionais, de um cenário determinístico no qual se estabelecem rotas fixas e entradas constantes na malha (ver Seção 3.4). Para esta situação, a operação em tempo-fixo, que é a utilização de planos semafóricos fixos, deve apresentar resultados mostrando ocupações constantes, já que os sinais de controle são fixos, podendo ocorrer pequenas oscilações decorrentes do comportamento dos veículos na malha. Esta situação pode ser observada na Figura 4.1 onde se veem a ocupação e a contagem de veículos praticamente constantes.

Entretanto, qual deveria ser o comportamento de um sistema de controle de tráfego em tempo-real para uma situação destas? Esperar-se-ia que houvesse oscilações, mas de pequena amplitude, decorrentes da ação de controle. Porém, foram observadas flutuações com grande amplitude e com características peculiares, as quais são analisadas no decorrer deste capítulo e podem ser observadas nas Figuras 4.2 e 4.3. Tais flutuações foram obtidas, utilizando a estratégia de controle TUC, em simulações onde as entradas de veículos na malha seguiam uma distribuição constante de chegada, ou seja, os veículos entravam na malha com

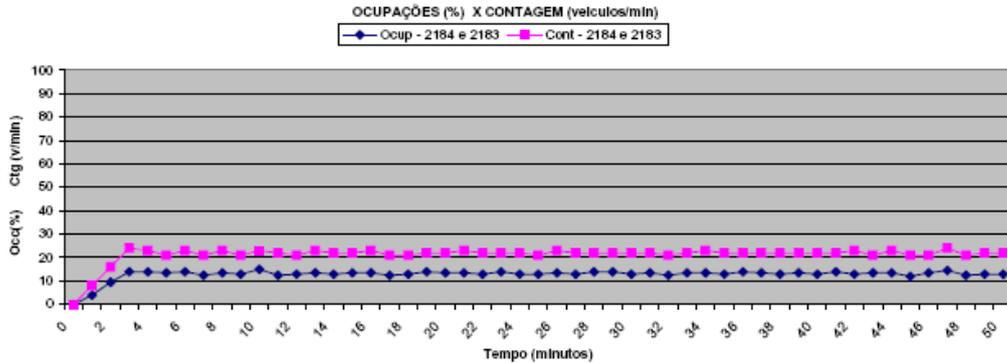


Figura 4.1: Ocupação e contagem da via 7 (ver Figura 3.4) para a operação em tempo-fixo.

espaçamento entre si praticamente iguais, dentro do cenário determinístico, onde as rotas dos veículos eram fixas.

Na Figura 4.2 observa-se um gráfico com os tempos de verde da interseção número 4, na qual se verifica que o tempo de verde nominal (o tempo de verde com qual a interseção inicia) é, para ambos os estágios, de 30s. Com o passar do tempo, o estágio 1 recebe mais tempo de verde e, conseqüentemente, o estágio 2 menos tempo. Porém, a situação rapidamente é invertida e o estágio 2 passa a ter mais tempo de verde do que o estágio 1. Observa-se uma oscilação repetitiva e permanente, à qual chamamos de equilíbrio dinâmico, pois o fenômeno se apresenta ciclicamente sem mostrar tendência para dissipar-se.

Já na Figura 4.3 pode ser visto o valor de ocupação e contagem de uma das vias da interseção 4, onde se observa que, apesar da ocupação acompanhar a oscilação do valor do estágio, mostrado na Figura 4.2, a contagem de veículos varia pouco e sem relação com a frequência de oscilação da ocupação, refletindo o fato que apesar das filas variarem, os volumes de tráfego são similares ao caso tempo fixo. Desta forma, percebe-se que o fenômeno de formação de filas se manifesta, já que a ocupação aumenta e não há alteração no volume de tráfego de saída.

Mesmo com entradas constantes esperava-se que houvesse oscilações na malha provenientes da ação de controle e que o sistema não atingisse um regime estacionário, apresentando pequenas oscilações. Entretanto, o fenômeno de flutuações apresenta oscilações elevadas para um sistema operando a entradas de fluxo constantes. Estas oscilações foram observadas com maior intensidade nas interseções de entrada, como na interseção 1, 4 e 5, mas ocorrem em toda a malha.

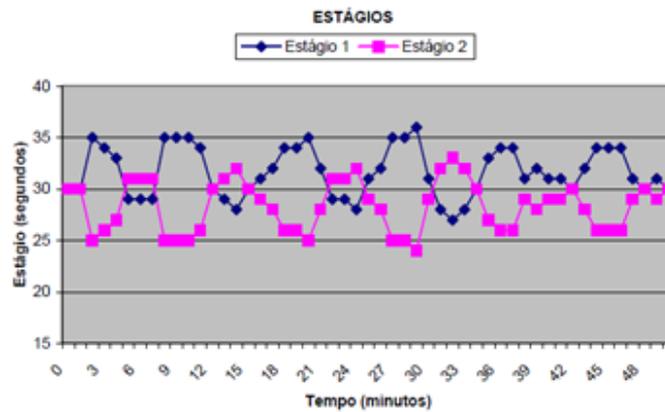


Figura 4.2: Flutuações no tempo de verde da interseção 4

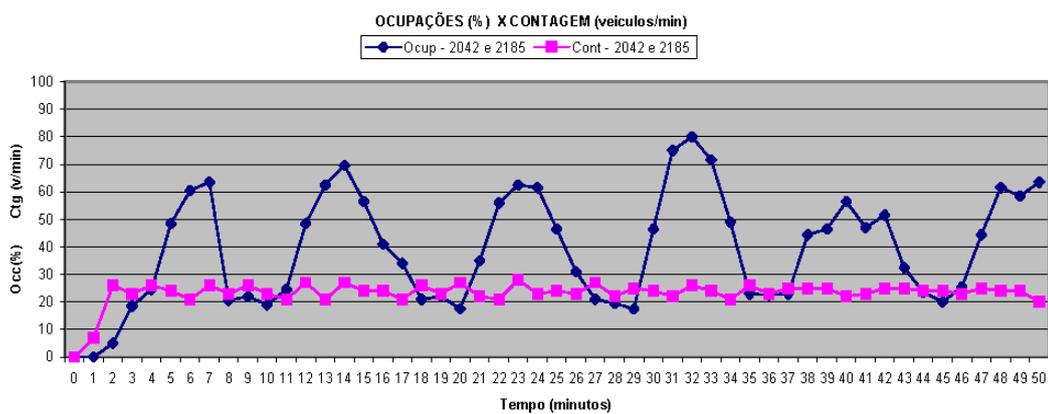


Figura 4.3: Flutuações nas ocupações das vias da interseção 4

4.2 Estratégia de Controle TUC e suas Implicações

Em um sistema de controle de tráfego, várias podem ser as causas de oscilações que eventualmente possam ser detectadas no sinal de controle e/ou na ocupação das vias. Dentre estas causas podem estar falhas dos elementos físicos, calibração inadequada dos parâmetros do controlador e, no caso de simulações, do simulador, etc. Porém, neste caso, as flutuações estão sendo geradas por ações desproporcionais do controle que são decorrentes da modelagem do sistema e da estratégia de controle adotada, dentre outras. Como a estratégia de controle adotada para este trabalho é a TUC, todas as oscilações observadas e mostradas aqui foram obtidas com esta, porém, como já citado na Seção 2.2, utilizando apenas o controle de tempos de verde.

A explicação para o surgimento das oscilações do controle mesmo em presença de demandas constantes (determinísticas) nas entradas da rede pode ser obtida a partir da seguinte observação. Seja a rede viária simplificada mostrada na Figura 4.4, a qual contém um recorte da malha simulada (ver Figura 4.8) contendo apenas os cruzamentos 4, 3 e 10 (a Figura 3.4 mostra a malha viária geral).

Pela forma de cálculo do controle TUC, os tempos de verde do cruzamento 4 são, a grosso modo, dados por:

$$g_7(k+1) = L_{7,8} \cdot x_8(k) + L_{7,5} \cdot x_5(k) + L_{7,24} \cdot x_{24}(k) \quad (4.1)$$

$$g_8(k+1) = L_{8,7} \cdot x_7(k) \quad (4.2)$$

onde k denota o tempo em número de ciclos transcorridos, g_i com $i = 7, 8$ é o tempo de verde de cada estágio sendo o estágio 7 (Equação (4.1)) o primeiro e o estágio 8 (Equação (4.2)) o segundo, conforme a matriz L mostrada na Figura 4.7, x_{li} é o número de veículos nas vias $li \in \mathcal{L}_i$ (conjunto de todas as vias que alimentam o verde i) e $L_{i,li}$ é o elemento da matriz L que determina a contribuição do número de veículos de uma dada via para o cômputo do verde i . Neste caso simplificado, $\mathcal{L}_7 = \{5, 8, 24\}$ e $\mathcal{L}_8 = \{7\}$ são os conjuntos de vias que alimentam os verdes 7 e 8, respectivamente. Note-se, ainda, que k avança junto com o tempo de ciclo. Portanto, os veículos estimados ao longo do ciclo k definem os tempos de verde para o ciclo seguinte, $k+1$.

A partir das Equações 4.1–4.2, é possível perceber a origem das oscilações do controle. Claramente, se os elementos de L forem da mesma ordem de grandeza, o número de veículos necessário para fornecer um tempo de verde g_8 maior que g_7 deve ser maior que as contribuições de *três* outras vias que alimentam o verde g_7 . Como o TUC estima os veículos em um ciclo a partir da ocupação ao longo do ciclo, decorre que é preciso aumentar muito a ocupação da via 7 para garantir um verde mais longo. Quando este verde é finalmente concedido, a fila acumulada na via 7 dissipa-se rapidamente, levando a uma queda da ocupação. A

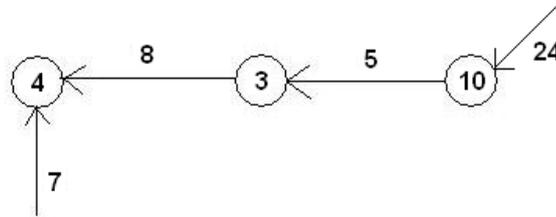


Figura 4.4: Exemplo de malha urbana

baixa na ocupação, por sua vez, volta a diminuir o verde além do desejável para escoamento da demanda constante que chega pela via 7, gerando o equilíbrio dinâmico indesejável. Este é o fenômeno que gera as flutuações mostradas nas Figuras 4.2 e 4.3.

Contudo, as discrepâncias da ação de controle podem ser minimizadas corrigindo o *fator de importância do link*, que é um parâmetro de configuração na estratégia TUC [17]. Este parâmetro é uma ponderação da importância de uma via em relação a todas as demais. Atualmente esta correção não se dá em relação a todas as demais vias, mas apenas em relação àquelas que houver necessidade ¹. Esta correção nada mais é do que a aplicação de uma constante multiplicando algum elemento da matriz de realimentação L , gerada pelo método LQR que é detalhado na Seção 2.6, sendo que as colunas da matriz representam os *links* da malha, enquanto as linhas correspondem aos estágios. A constante que faz a correção do fator de importância é dada por:

$$L_{i,j} = k_{i,j} \times L_{i,j}^{LQR} \quad (4.3)$$

onde $L_{i,j}$ é a posição da matriz L na linha i coluna j ; $k_{i,j}$ é a constante de ponderação, aqui chamada de fator de importância e aplicada na linha i coluna j da matriz L ; $L_{i,j}^{LQR}$ é o valor inicialmente encontrado pelo TUC, através do método LQR, para o valor da matriz L na linha i e coluna j .

Desta forma, pode-se escolher qual *link* deve ter maior importância e para qual estágio. Esta escolha não é de fato trivial. Deve analisar-se o comportamento da malha e verificar em quais interseções o comportamento da ação de controle apresenta resultados discrepantes se comparados com a ocupação da via. Contudo, deve levar-se em conta que a ocupação da via é influenciada pela ação de controle, fato que dificulta mais a tarefa de encontrar não só os locais onde há a necessidade de aplicar a correção do fator de importância, mas também a magnitude desta ponderação.

¹R. Carlson, comunicação pessoal, 15 de julho de 2009

O artifício de aumentar o *fator de importância do link* em uma determinada interseção foi utilizado e apresentou resultados positivos, como pode ser visto nas Figuras 4.5 e 4.6, onde se analisa novamente o cruzamento da interseção 4. Na Figura 4.6 pode-se observar a variação na ocupação da via 7 (ver Figura 3.4) que está muito menos oscilatória do que o observado na Figura 4.3, onde se vê oscilações elevadas e permanentes. Variações pequenas, como as observadas na Figura 4.6 são totalmente aceitáveis, pois são decorrentes da atuação responsiva do controle, como colocado no Capítulo 1.

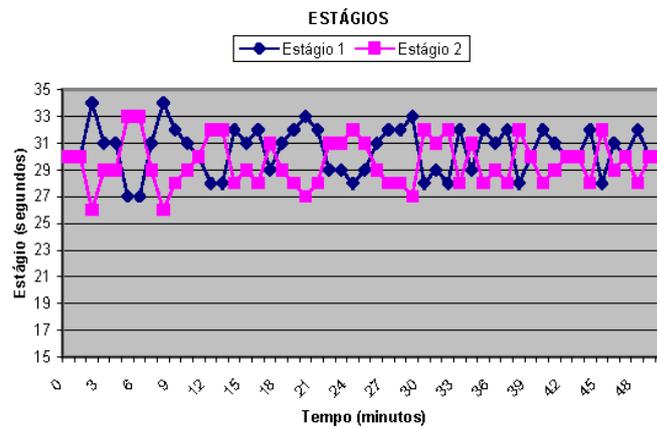


Figura 4.5: Flutuações no tempo de verde da interseção 4 após o ajuste do fator de importância do *link* de entrada

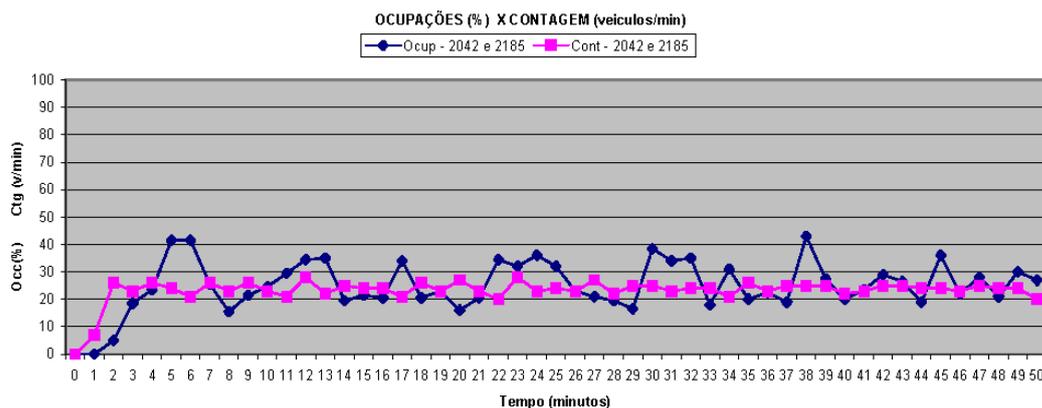


Figura 4.6: Flutuações nas ocupações das vias da interseção 4 após o ajuste do fator de importância do *link* de entrada

Entretanto, o ajuste do fator de importância, que originalmente foi sugerido para corrigir medições de *links* de entrada à malha, que poderiam estar estimando um número equivocado de veículos [17], é utilizado para corrigir o desbalanceamento da quantidade de *links* que favorecem um dos tempos de verde de um determinado estágio.

Juncões Splits		LINKS																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	1	0	-0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	-0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	-0,1	0	-0,1	0	-0,3	0	0	-0,4	0	0	-0,4	0	-0,5	0	
2	3	0	0	0	-0,7	0	0	0	0	0	-0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
2	4	0	-0,7	-0,7	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	0	-0,7	-0,7	0	0	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	0	0	0	0	-0,8	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7	0	0	
4	7	0	0	0	0	-0,7	0	0	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,6	0	0	
4	8	0	0	0	0	0	0	-0,7	0	0,2	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	9	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	0	0	0	0	0	0	-0,7	0	-0,8	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7	-0,1	0	-0,1	0	-0,3	0	0	-0,3	0	0	-0,4	0	-0,5	0
6	12	0	0	0	0	0	0	-0,6	0	-0,7	0	-0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,7	0	-0,7	0	0,2	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0
7	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	15	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	0	-0,4	0	-1	0	0	0,3	0	0	0,2	0	0,1	0
8	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,9	0	0	0	0	0	0	0
8	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,9	0	0	0	0	0	0
9	18	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,2	0	-0,2	0	-0,4	0	0	-0,6	0	0	0,3	0	0,2	0
9	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-0,9	0	0	0	0
9	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	21	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	-0,2	0	-0,1	0	-0,3	0	0	-0,5	0	0	-0,6	0	0,3	0	0
10	22	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	0	0
11	23	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	-0,2	0	-0,1	0	-0,3	0	0	-0,4	0	0	-0,5	0	-0,6	0	0
11	24	0	0	0	0	-0,7	0	0	0	0	0	0	-0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,8
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	

Figura 4.7: Matriz de realimentação L gerada considerando as rotas determinísticas da malha urbana mostradas na Figura 3.5

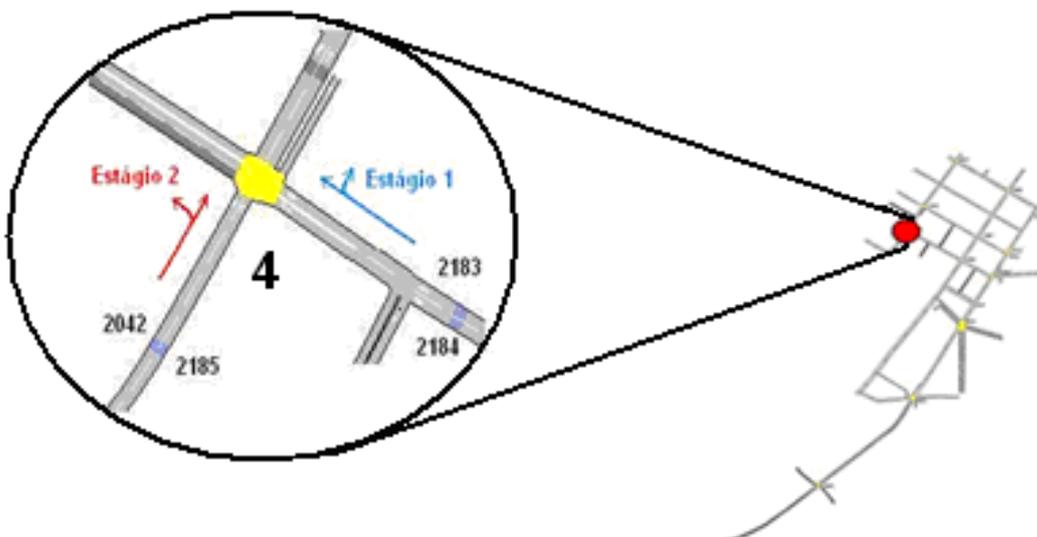


Figura 4.8: Detalhe do cruzamento da interseção 4 da malha em estudo

4.3 Sumário

Neste capítulo foi feita uma análise detalhada do problema de flutuações no trânsito, as suas causas e consequências. Foi também mostrado o comportamento da estratégia TUC para a malha apresentada no capítulo anterior e as suas peculiaridades de controle, assim como a estrutura da matriz de realimentação L , utilizada pelo TUC.

Capítulo 5

Proposta de Síntese de Controle para Tempos de Verde

A análise do fenômeno oscilatório do tráfego induzido pelo controle TUC que surgiu com a utilização da metodologia LQR para encontrar a matriz de realimentação L , motivou a procura de uma maneira diferente de estruturar esta matriz. A solução oferecida pelo TUC é o ajuste dos fatores de importância de vias que apresentem problemas com a estimação de veículos, como mostrado na Seção 4.2. Entretanto, não existe um procedimento sistemático para a determinação dos pesos dos fatores de importância, o que torna isto uma tarefa árdua.

Com a intenção de sistematizar uma forma de síntese para a lei de controle realimentado de tempos de verde, uma nova proposta é apresentada neste capítulo, assim como os resultados comparativos entre as diferentes estratégias de controle.

5.1 Proposta de Estratégia de Controle para Tempos de Verde

Inicialmente, de uma forma experimental, foram definidos critérios para a construção da nova matriz de realimentação do sistema. Buscando manter a estrutura multivariável do conjunto na qual é possível analisar a influência entre os estados do sistema, sugere-se, inicialmente, a alteração na lei de controle (2.9) para:

$$g(k) = g^N - w\Phi x(k) \quad (5.1)$$

onde Φ é uma matriz obtida por inspeção com base na arquitetura da malha e $\Phi \in \{0, 1\}^{m \times n}$, sendo m o número de vias (*links*) e n o número de estágios da malha a ser controlada; w é um escalar que pondera o controle e influencia a magnitude do desvio possível a partir do verde

nominal; $g(k)$ é o vetor dos tempos de verde e g^N é o vetor contendo os tempos de verde nominal. O valor w do escalar que multiplica a matriz Φ é um valor encontrado por tentativa e erro, cuja magnitude, por convenção e conveniência, normalmente está compreendido no intervalo de $0 < w < 1$.

Esta estrutura é uma lei de controle aplicável à malha em estudo, pois nos experimentos feitos neste trabalho, como foi citado na Seção 3.4, padronizou-se o fluxo de saturação das vias da malha para 1800 veículos por hora em cada faixa e as vias com o mesmo número de faixas. Por este motivo é possível utilizar o parâmetro w como um escalar, pois todas as vias têm o mesmo fluxo de saturação. Para casos em que as vias apresentem fluxos de saturação diferentes, no lugar de um escalar e uma matriz Φ , deverá ser usada uma matriz Ψ na estrutura da lei de controle (5.2).

$$g(k) = g^N - \Psi x(k) \quad (5.2)$$

onde Ψ é uma matriz de realimentação estruturada manualmente, da mesma forma que a matriz de Φ , mas em vez de ser preenchida com valores unitários nas posições desejadas, estas devem ser preenchidas com o inverso do fluxo de saturação da própria via $1/S_z$. Com isto, efetua-se uma espécie de correção do peso a ser utilizado na matriz de realimentação, com respeito aos diferentes fluxos de saturação existentes nas vias da malha.

Para melhor compreensão, a seguir mostra-se um exemplo de um cruzamento simples. Seja J_1 uma interseção cujas vias são chamadas de z e w . A via z tem direito de passagem no estágio 1 e a via w no estágio 2. Sejam os fluxos de saturação de 1800 veh/h por faixa e a via w com uma faixa e a z com duas, como mostrado na Figura 5.1. Considere-se que ambas as vias estão 50% carregadas e têm a mesma ocupação. Considerando isso, o tamanho das filas é o mesmo. Para esta situação, a princípio, o mais razoável é conceder 50% do tempo de verde da interseção para cada estágio, escoando por igual ambos os fluxos. Porém, analisando a Equação (5.2) pode-se ver que a matriz de realimentação está sendo multiplicada pela *quantidade de veículos na via em uma hora*, considerando um ciclo de 60s, e não pela sua ocupação. Sendo assim a via z tem o dobro de veículos do que os da via w . Desta forma, se os valores $l_{z,w}$ na matriz de realimentação forem iguais, será dado maior tempo de verde para a via que tiver maior número de veículos, no caso, a via z .

Para corrigir este problema, cada via é multiplicada pelo seu fluxo de saturação, fazendo com que os tempos de verde levem em conta a capacidade de armazenamento da via. Considerando que os verdes nominais das vias sejam iguais, o cálculo do tempo de verde será:

$$g_1(k) = g^N - (-1/3600) \cdot 600 = g^N + 1.666 \cdot 10^{-1} \quad (5.3)$$

$$g_2(k) = g^N - (-1/1800) \cdot 300 = g^N + 1.666 \cdot 10^{-1} \quad (5.4)$$

onde se têm tempos iguais fazendo com que, quando forem computados dentro das restrições mostradas nas Equações (2.10b) e (2.10c), ambos os estágios recebam 50% do tempo de verde daquela interseção.

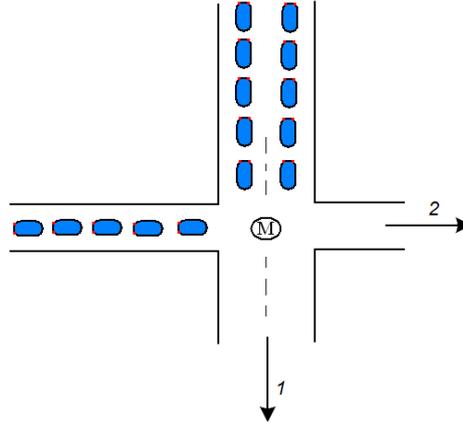


Figura 5.1: Cruzamento mostrando uma interseção com duas vias e dois estágios

A matriz de realimentação deve ser montada com base na arquitetura da malha, como será exemplificado posteriormente para o caso da malha de Macaé-RJ, e leva em consideração os seguintes pontos:

1. Respeitar o equilíbrio entre estágios concorrentes de uma determinada junção, permitindo influência do mesmo número de *links* para cada estágio.
2. O peso da influência de cada via deve ser calculado pela relação $1/S_z$.
3. Caso os estágios da junção possam ter mais do que um *link* influenciando o tempo de verde, é possível escolher o *link* a jusante como *link* de guarda para evitar o fechamento da interseção, atribuindo um valor positivo para este *link*.
4. Se a junção for de entrada e houver mais *links* de entrada do que estágios, desprezar o ponto n° 1 e acumular os *links* de entrada no seu respectivo estágio.

OBS: As dimensões da matriz de realimentação mantêm-se iguais às da matriz L .

Um ponto de discussão é: *a ocupação de quais vias deve ser levada em conta para calcular o valor do tempo de verde para determinado estágio?* Após alguns experimentos em simulação e analisando o fenômeno de flutuações mostrado no Capítulo 4, chegou-se à conclusão de que, já que a estratégia TUC não leva em conta o atraso de transporte existente no modelo real e que é um sistema reativo (responsivo), ou seja, apenas reage a perturbações já

acontecidas, para o cálculo do tempo de verde *pode ser* suficiente o conhecimento apenas das vias cujo fluxo tenha a possibilidade de escoar, no mesmo ciclo semafórico, até a determinada junção. Ou seja, uma interseção não necessitaria das informações de vias cujo fluxo não chegue, no mesmo ciclo, até ela. Isto é razoável, pois, como já foi dito, o sistema reage a perturbações conhecidas e não tem um comportamento antecipatório.

Pela estrutura da lei de controle (2.9) e pelo fato de que as medições sempre são positivas, os valores contidos na matriz de realimentação Ψ devem ser negativos, de forma que teremos sempre $g(k) > g^N$ fazendo-se necessário, assim como na estratégia TUC, aplicar o mesmo problema de otimização mostrado na Equação (2.10a), sujeito às restrições de ciclo e de tempos mínimos e máximos de verde, mostradas nas Equações (2.10b) e (2.10c) .

Porém, assim como é feito originalmente pelo TUC, é possível atribuir valores positivos para determinadas vias, normalmente a jusante da interseção em questão, com a intenção de evitar o fechamento do cruzamento (*gridlock*), sendo que, neste trabalho, estes *links* serão chamados de *links de guarda*. Desta forma, se a via onde o cruzamento descarrega o fluxo estiver muito ocupada, este estágio (tempo de verde) será menor, já que na matriz de realimentação Ψ haverá um valor positivo para o cálculo do tempo de verde. Isto somente será possível se o estágio em questão já possuir, no cálculo de tempo de verde, mais do que uma via com valor negativo, ou seja, favorecendo o aumento do tempo de verde. O caso em que não é possível a atribuição de um *link* de guarda acontece quando se tem uma interseção de entrada, cujos estágios têm apenas uma via que é levada em conta para o cálculo do tempo de verde. Isto acontece na interseção 4 da malha de Macaé-RJ onde o estágio 2, detalhado na Figura 4.8, leva em consideração apenas a via 7 para o cálculo de verde. Neste caso não deve ser colocado *link* de guarda.

No caso onde se utiliza uma matriz com valores unitários e um ponderador para todos os seus valores (equação (5.1)), percebe-se a importância que tem *quais* vias compõe o cálculo do tempo de verde em determinada interseção e não tanto o valor dessa ponderação. Como citado na Seção 4.2, um eventual erro de ponderações para os *links* não é tão prejudicial quanto a má escolha de quais *links* influenciarão neste cálculo, assim como o equilíbrio da quantidade de *links* para cada estágio.

Utilizando a mesma malha viária mostrada na Figura 3.4, a matriz Φ poderia ser a matriz mostrada na Figura 5.2, tendo ela 23 linhas (estágios) e 26 colunas (*links* ou vias).

Sabendo que os tempos de verde de uma mesma interseção são complementares e por sua vez concorrentes entre si, é razoável pensar que os pesos dos *links* para cada estágio devam ser compatíveis entre si para não causarem problemas de favorecimento de um deles e conseqüente desfavorecimento do outro. Pode ser facilmente verificado que para cada linha da matriz tem-se, geralmente, o mesmo número de *links* relacionados.

Junções Splits		LINKS																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
4	7	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
	12	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
10	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
11	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	0
	23	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Figura 5.2: Uma possível matriz Φ da malha viária da Figura 3.4

5.2 Resultados

Nesta seção é feita uma síntese dos resultados obtidos com os experimentos realizados na malha de Macaé-RJ mostrada na Figura 3.4 no ambiente de simulação AIMSUN. Para tal, foram utilizadas tanto entradas de veículos na malha seguindo uma distribuição constante quanto exponencial, porém sempre utilizando as taxas de conversão apresentadas na Seção 3.4. Comparações de desempenho para cada um dos experimentos são apresentadas mostrando as situações em que cada uma das estratégias apresentam vantagens e desvantagens.

5.2.1 Resultados com Chegadas Constantes

Os testes com entradas de veículos comportando-se segundo uma distribuição constante foram os que apresentaram maiores flutuações no tráfego, sendo que para uma situação de tráfego estável esperava-se que o controle encontrasse uma região de equilíbrio e operasse em um regime com poucas variações. Na Tabela 5.1 são mostrados os índices de desempenho da estratégia de controle TUC *sem a correção de fatores de importância* para os experimentos utilizando entradas constantes, nos quais foi variado o volume de tráfego de 80 a 200% do fluxo máximo para um plano nominal, estabelecido na Seção 3.4 como *fluxo nominal*. Por outro lado, a Tabela 5.2 mostra os mesmos resultados utilizando a estratégia TUC com os fatores de importância corrigidos.

Pode ser observado nas Tabelas 5.1 (TUC sem a correção do fator de importância) e

Tabela 5.1: Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC original, sem correção dos fatores de importância, para chegadas constantes

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	34,0	62,7	118,9	197,2	452,3	s/km
Densidade	9,8	14,1	22,7	33,2	68,0	veh/km
Fluxo	7312	8038	8209	8245	8297	veh/h
Velocidade harmônica	35,5	27,7	19,4	13,7	7,0	km/h
Velocidade	37,4	31,7	26,2	21,6	10,5	km/h
Tempo de parada	24,2	50,7	108,0	189,5	458,8	s/km
Paradas	1,1	1,8	2,6	3,8	5,7	#/veh/km
Tempo de viagem	101,5	130,1	186,0	263,7	518,3	s/km

Tabela 5.2: Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC com fator de importância corrigido para chegadas constantes.

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	32,3	44,3	71,9	138,4	408,2	s/km
Densidade	9,7	12,3	17,2	27,3	67,5	veh/km
Fluxo	7318	8183	8783	8857	9158	veh/h
Velocidade harmônica	36,1	32,2	25,8	17,5	7,6	km/h
Velocidade	38,1	34,8	30,2	23,9	10,8	km/h
Tempo de parada	22,5	32,5	57,9	123,8	404,6	s/km
Paradas	1,1	1,4	2,2	4,0	9,2	#/veh/km
Tempo de viagem	99,8	111,7	139,3	205,3	474,4	s/km

5.2 (TUC com a correção do fator de importância) que com o aumento do número de veículos todos os índices de desempenho se deterioram. Isto é razoável, pois o objetivo do controle é buscar uma proporção de tempo de verde para ambos os estágios de uma mesma interseção que seja mais favorável globalmente. Portanto, se o fluxo estiver totalmente saturado o objetivo passa a ser agir de forma a proporcionar o melhor desempenho global para a situação atual.

Comparando os resultados obtidos com e sem correção dos fatores de importância (Tabelas 5.1 e 5.2) nota-se uma melhora substancial em todos os índices de desempenho para os experimentos *com* a utilização da correção dos fatores de importância. Se levado em conta apenas o índice de desempenho *tempo de atraso*, observa-se uma melhora de até 39,5% no experimento utilizando 100% do fluxo nominal.

Por outro lado, na Tabela 5.3 são apresentados os resultados obtidos com a estratégia de controle proposta neste trabalho, para as mesmas situações dos experimentos anteriores.

Se comparadas a estratégia TUC sem a correção do fator de importância com a pro-

Tabela 5.3: Resultados de simulação utilizando a estratégia proposta neste trabalho para chegadas constantes.

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	30,9	45,8	67,9	127,4	408,7	s/km
Densidade	9,6	12,7	17,3	26,8	69,0	veh/km
Fluxo	7327	8117	8737	8861	8891	veh/h
Velocidade harmônica	36,6	31,8	26,6	18,5	7,6	km/h
Velocidade	38,5	35,5	31,7	25,3	10,9	km/h
Tempo de parada	21,3	34,6	54,8	112,8	400,8	s/km
Paradas	1,1	1,3	1,9	3,5	10,3	#/veh/km
Tempo de viagem	98,3	113,4	135,5	194,7	475,2	s/km

posta apresentada neste trabalho, nota-se uma diminuição de até 43% do tempo de atraso para o caso de 100% do fluxo nominal. Observa-se que também para os demais índices de desempenho a melhoria é substancial.

Porém, se a estratégia proposta neste trabalho for comparada com os resultados obtidos pelo TUC com correção do fator de importância, nota-se uma semelhança nos índices de desempenho, porém com melhora de até 8% do tempo de atraso para caso de 110% do fluxo nominal.

5.2.2 Resultados com Chegadas Exponenciais

Os testes com entradas de veículos seguindo a distribuição exponencial foram feitos com o intuito de analisar o desempenho do sistema em uma situação real de trânsito urbano, onde os carros não têm espaçamento constante entre si. Também foram feitos experimentos com fluxos de veículos variando o fluxo de entrada de 80% a 200% do fluxo nominal, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 onde são mostrados os experimentos com a estratégia TUC sem e com correção dos fatores de importância e utilizando a estratégia proposta neste trabalho, respectivamente.

Os índices de desempenho também apresentam degradação sempre que o nível de veículos em trânsito é aumentado. Ou seja, ambas as estratégias mostram que em situações de tráfego saturado o desempenho global da malha é prejudicado.

Se compararmos estratégia TUC com e sem correção dos fatores de importância para chegadas exponenciais, vemos que a correção desses fatores diminui o índice *tempo de atraso* em 29,3%, para o caso de 100% do fluxo nominal. Já a estratégia proposta neste trabalho diminui o *tempo de atraso* em 34,9%.

Entretanto, se comparada a estratégia TUC com correção do fator de importância e a

Tabela 5.4: Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC original para chegadas exponenciais

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	40,6	58,8	121,6	216,6	445,7	s/km
Densidade	10,5	13,8	23,1	35,1	67,6	veh/km
Fluxo	7383	8128	8201	8237	8401	veh/h
Velocidade harmônica	33,4	28,6	19,1	12,7	7,0	km/h
Velocidade	35,7	31,2	25,4	20,3	10,6	km/h
Tempo de parada	29,4	45,0	109,2	210,0	450,5	s/km
Paradas	1,3	1,9	2,9	4,0	5,9	#/veh/km
Tempo de viagem	107,7	126,0	188,4	283,0	511,6	s/km

Tabela 5.5: Resultados de simulação utilizando a estratégia TUC com fator de importância corrigido para chegadas exponenciais

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	36,1	50,7	85,9	172,9	417,8	s/km
Densidade	10,1	13,0	19,1	31,8	68,2	veh/km
Fluxo	7383	8168	8583	8764	9047	veh/h
Velocidade harmônica	34,9	30,5	23,5	15,0	7,4	km/h
Velocidade	37,0	33,3	28,0	21,8	10,8	km/h
Tempo de parada	25,4	37,9	70,2	159,2	414,9	s/km
Paradas	1,2	1,6	2,6	4,7	8,8	#/veh/km
Tempo de viagem	103,3	117,9	152,9	239,7	483,9	s/km

estratégia de controle proposta neste trabalho, nota-se uma diminuição no *tempo de atraso* em todos os casos, exceto no de 90% do fluxo nominal, chegando a ser até 7,8% menor.

5.3 Comparações entre as Estratégias

Considerando os resultados obtidos com a estratégia TUC utilizando a correção dos fatores de importância, uma comparação do índice de desempenho *tempo de atraso* é feita a seguir.

Inicialmente, com o aumento do volume de tráfego nota-se uma degradação maior nos índices de desempenho da estratégia TUC. Na Figura 5.3 mostra-se o tempo de atraso da malha para ambas as estratégias, TUC com correção dos fatores de importância e a estratégia proposta neste trabalho, utilizando entradas constantes. Para o caso de 110% do fluxo nominal a estratégia TUC apresenta um tempo de atraso 7,9% maior do que o da estratégia apresentada neste trabalho, como pode ser visto na comparação feita nas Tabelas 5.7 e 5.8. Para as chegadas exponenciais, Figura 5.4, para um volume de trânsito de 100%

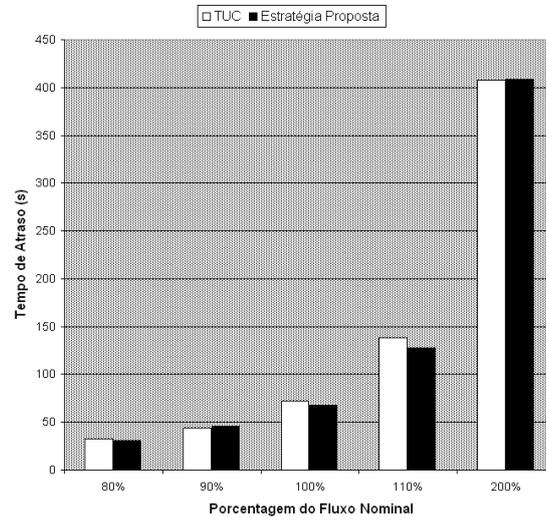


Figura 5.3: Comparação entre as estratégias de controle TUC (com correção dos fatores de importância) e a estratégia proposta neste trabalho: tempos de atraso para chegadas constantes

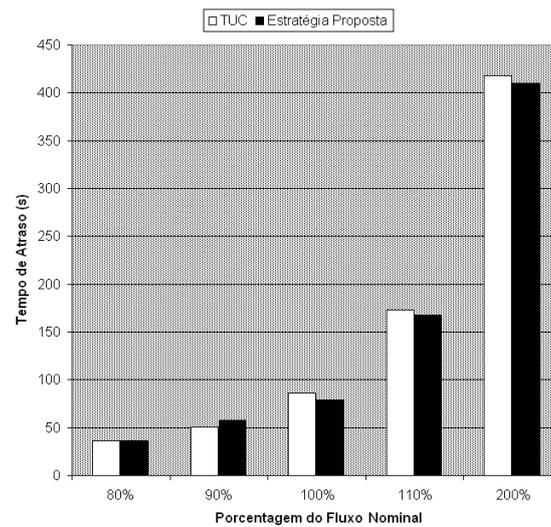


Figura 5.4: Comparação entre as estratégias de controle TUC (com correção dos fatores de importância) e a estratégia proposta neste trabalho: tempos de atraso para chegadas exponenciais

Tabela 5.6: Resultados de simulação utilizando a estratégia proposta neste trabalho para chegadas exponenciais

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal					Unidade
	80%	90%	100%	110%	200%	
Tempo de atraso	36,0	57,8	79,2	167,8	410,2	s/km
Densidade	10,6	14,1	19,1	31,7	68,9	veh/km
Fluxo	7344	8098	8589	8720	8876	veh/h
Velocidade harmônica	33,6	28,8	24,6	15,3	7,6	km/h
Velocidade	36,3	33,2	30,4	22,3	11,0	km/h
Tempo de parada	29,0	45,2	65,4	153,2	403,1	s/km
Paradas	1,3	1,6	2,0	4,5	10,1	#/veh/km
Tempo de viagem	107,2	125,2	146,5	235,0	476,6	s/km

do fluxo nominal, a estratégia de controle proposta apresentou um tempo de atraso até 7,8% menor do que o TUC. Já para 90% do fluxo nominal, a estratégia TUC apresentou resultados melhores.

Para resultados extremos, de fluxo baixo ou muito alto o TUC e a estratégia proposta apresentam resultados muito similares. Estes resultados são também mostrados nas comparações feitas nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.7: Comparação dos resultados de simulação para chegadas constantes: TUC com e sem correção de Fator de Importância

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal				
	80%	90%	100%	110%	200%
TUC Original	34,0	62,7	118,9	197,2	452,3
TUC com FI corrigido	10,6	14,1	19,1	31,7	68,9
Diminuição no tempo de atraso	-5,1%	-29,4%	-39,6%	-29,8%	-9,76%

Tabela 5.8: Comparação dos resultados de simulação para chegadas constantes: TUC com correção de Fator de Importância e a Estratégia Proposta

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal				
	80%	90%	100%	110%	200%
TUC com FI corrigido	32,3	44,3	71,9	138,4	408,2
Estratégia Proposta	30,9	45,8	67,9	127,4	408,7
Diminuição no tempo de atraso	-4,3%	3,5%	-5,6%	-7,9%	0,1%

5.4 Sumário

Neste capítulo foi detalhada a estratégia de controle proposta neste trabalho, e a vantagem de apresentar uma forma sistemática para obtenção da matriz de realimentação.

Tabela 5.9: Comparação dos resultados de simulação para chegadas exponenciais: TUC com e sem correção de Fator de Importância

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal				
	80%	90%	100%	110%	200%
TUC Original	40,6	58,8	121,6	216,6	445,7
TUC com FI corrigido	36,1	50,7	85,9	172,9	417,8
Diminuição no tempo de atraso	-11,0%	-13,8%	-29,3%	-20,2%	-6,25%

Tabela 5.10: Comparação dos resultados de simulação para chegadas exponenciais: TUC com correção de Fator de Importância e a Estratégia Proposta

Parâmetro	Porcentagem do fluxo nominal				
	80%	90%	100%	110%	200%
TUC com FI corrigido	36,1	50,7	85,9	172,9	417,8
Estratégia Proposta	36,0	57,8	73,2	167,8	410,2
Diminuição no tempo de atraso	-0,4%	14,0%	-7,8%	-2,9%	1,8%

Os resultados desta estratégia foram comparados com os resultados obtidos com o TUC, percebendo-se que existem situações em que uma estratégia se comporta melhor do que outra, dependendo do volume de tráfego.

No próximo capítulo são expostas as conclusões finais deste trabalho.

Capítulo 6

Conclusão

Os sistemas de controle em tempo-real para tráfego urbano têm sido pesquisados amplamente nos últimos anos, pois se trata de um tema de pesquisa que busca, se não solucionar, minimizar os problemas que os grandes centros urbanos criaram com o aumento da frota de veículos. As oportunidades comerciais que o controle de tráfego propicia também têm fomentado a pesquisa, já que é constante o aumento da frota de veículos, o que demanda soluções para tornar o tráfego mais eficiente com poucas modificações na estrutura física da malha urbana. Este trabalho apresentou uma análise comparativa dos resultados obtidos entre a estratégia de controle TUC e a nova estratégia proposta nesta dissertação.

Inicialmente foi mostrada a proposta de controle TUC e as suas características de funcionamento. Também foram apresentados conceitos de simulação como macro e micro-simulação, seguimento de veículos (*car-following*) para compreender o funcionamento do simulador AIMSUN, com o qual foram feitos os experimentos e as análises de desempenho das estratégias de controle.

Como mostrado no Capítulo 2, várias são as estratégias utilizadas para controle em tempo-real de uma malha urbana. Devido às vantagens da estratégia TUC esta tem sido amplamente pesquisada e foi a estratégia de controle utilizada como base para este trabalho. Porém, apesar das qualidades e vantagens do método TUC, observou-se que o comportamento do controlador, ou seja, a ação de controle, induzia perturbações que geraram oscilações constantes e permanentes na malha, sem mostrar tendência para dissiparem-se. Estes resultados foram obtidos através de simulações em um contexto determinístico, ou seja, onde o comportamento dos veículos é conhecido e constante, as rotas de cada veículo são fixas e pré-determinadas e as chegadas destes se dão sempre com o mesmo intervalo de tempo entre eles. Para esta configuração, esperava-se que a estratégia de controle, através da mudança dos tempos de verde, gerasse pequenas oscilações, mas que se mantivessem em um patamar que poderia ser considerado constante.

Discutiram-se neste trabalho as causas de tais oscilações e apresentaram-se duas possíveis soluções: uma que é o ajuste dos fatores de importância dos *links*, ajuste tal já incorporado nos parâmetros de ajuste da estratégia TUC [17] e outra que é uma nova proposta para estruturar a matriz de realimentação do controle. Resultados positivos são obtidos com ambas as soluções. Porém, não existe um procedimento sistematizado para o ajuste dos fatores de importância dos *links*, o que torna esta tarefa de ajuste muito difícil, já que o ajuste é feito através de testes de funcionamento da malha, onde se observa o comportamento da estimação de número de veículos e compara-se com os que realmente estão na via [17].

Já a proposta de estruturação da matriz de realimentação apresentada neste trabalho segue um procedimento sistematizado, no qual é possível definir os pesos utilizados na matriz de realimentação através de uma inspeção da arquitetura da malha sem necessitar de ajustes posteriores, ou seja, o procedimento metodológico proposto tem a vantagem de ser sistemático e depender apenas de análise topológica da rede e de parâmetros facilmente obtidos em campo.

Os resultados de desempenho de ambas as estratégias de controle são similares, porém nos casos um pouco mais saturados a estratégia proposta neste trabalho se apresenta, no índice de desempenho, *tempo de atraso*, 8% mais eficiente, sendo que os resultados com chegadas exponenciais podem ser mais investigados em termos estatísticos através da execução de vários ensaios variando o fluxo de entrada. Preliminarmente, percebe-se que o desempenho é similar, com leve vantagem para o método proposto.

Para trabalhos futuros indicam-se os seguintes pontos:

- Estudar uma maneira de ponderar os valores da matriz de realimentação para possibilitar a utilização de *links* de guarda em quaisquer situações, já que nesta proposta esta utilização tem algumas restrições. Desta forma, o fenômeno de *gridlock* poderá ser evitado com mais facilidade;
- Estudar a possibilidade e a viabilidade de modificar a lei de controle de tempos de verde para retirada do parâmetro verde nominal g^N ;
- Estudar a existência de flutuações indesejadas, percebidas pelo motorista, que ainda possam estar sendo induzidas pelo controle e que não estejam sendo computadas nos índices de desempenho normalmente utilizados, como previsibilidade do trânsito, segurança nas vias, etc;
- Aplicação da proposta na cidade de Macaé-RJ, para avaliar os resultados em um cenário real.

Apêndice A

Terminologia

Diversos termos de engenharia de tráfego foram utilizados no decorrer deste trabalho. Este apêndice busca esclarecer os principais conceitos e termos aqui utilizados. Estas definições foram retiradas de [13].

A.1 Defasagem

Também conhecida pelo termo em inglês *offset*. É a diferença entre o início de estágios pré-determinados de duas interseções consecutivas. Pode ser positiva ou negativa. É positiva se o estágio da interseção a jusante inicia após o estágio da interseção a montante, e negativa no caso contrário.

A.2 Ciclo

Um ciclo compreende a repetição da sequência de indicações semafóricas (fases) de uma interseção, sendo o intervalo de repetição conhecido como tempo de ciclo, usualmente medido em segundos (veja Figura A.1).

A.3 Ciclo Nominal

Tempo de ciclo com o qual uma interseção inicia a sua operação.

A.4 Concentração (κ)

Quantidade de veículos que ocupam uma unidade de comprimento de uma via em um instante de tempo. Também chamada de Densidade.

A.5 Estágio

Entende-se por estágio o período em que um conjunto de indicações semaforicas de uma interseção permanece constante (Figura A.1). Intervalos constantes de alguns segundos, denominados tempo perdido, são inseridos entre os diversos estágios para evitar interferência entre fluxos conflitantes.

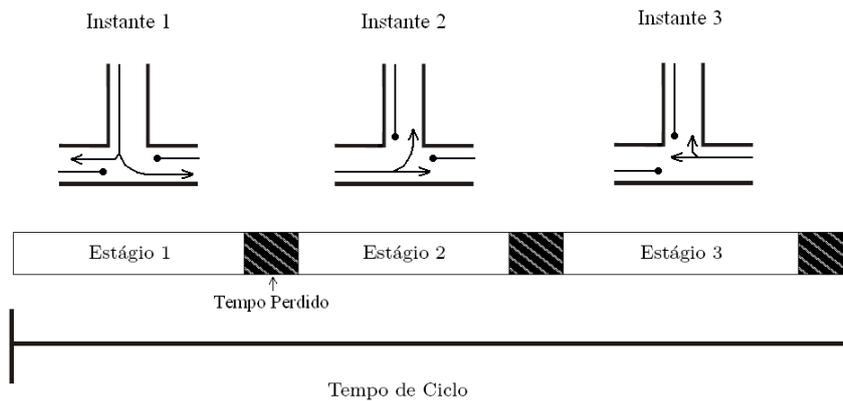


Figura A.1: Exemplo de ciclo, estágios e tempo perdido.

A.6 Fluxo (q)

Número de veículos que passam por um ponto durante um determinado tempo. Também chamado de Volume de Tráfego. Normalmente expresso em veículos/hora.

A.7 Fluxo de Saturação (s)

É o fluxo máximo de uma determinada via se esta contasse com uma fila infinita e com indicação semaforica verde.

A.8 Fluxo Nominal

Máximo fluxo de veículos para a situação em que todas as interseções estejam operando com verdes nominais.

A.9 *Headway*

***Headway* espacial:** é a distância entre dois veículos consecutivos movimentando-se em uma mesma via.

***Headway* temporal:** é o intervalo de tempo entre a passagem de dois veículos consecutivos em uma mesma via.

A.10 Laço Indutivo

Sensor utilizado comumente na detecção de veículos sensível à variação da permeabilidade magnética nas suas proximidades. Esta variação ocorre quando um veículo se aproxima dele, pois o campo indutivo gerado pelo laço passa pelas partes metálicas do veículo absorvendo parte da energia gerada.

A.11 *Link*

Segmento urbano que liga duas interseções, ou que serve de entrada ou saída para uma malha urbana.

A.12 Ocupação (o)

A taxa de ocupação o ou carregamento de uma via é a razão entre o fluxo de veículos (q) em uma via e o fluxo de saturação (s) desta, $o = q/s$. Porém, uma estimativa da ocupação com a utilização de sensores indutivos pode ser dada por

$$o = \frac{\text{Tempo em que há detecção}}{\text{Tempo total de observação}}$$

que é a estimativa utilizada normalmente nas técnicas de controle em tempo-real.

A.13 Porcentagens de verde

É a fração do tempo de verde de uma interseção dada a um estágio. Ou seja, cada estágio tem uma porcentagem de verde atribuído a ele, cuja soma é o tempo total de verde daquela interseção.

A.14 Via

Sucessão de vários *links*.

A.15 Velocidade Média Harmônica

Velocidade calculada através das médias dos tempos de viagem. Pode ser calculada dividindo a distância percorrida pela média aritmética dos tempos de viagem de cada veículo.

A.16 Verde Nominal

Tempo de verde com o qual um estágio inicia.

Apêndice B

Regulador Quadrático Linear

O problema LQR e a solução de um problema de otimização de mínimos quadrados convexo com algumas propriedades especiais: garante estabilidade em malha fechada do sistema, provê níveis garantidos de robustez e é de fácil cômputo. A definição do problema, sua colocação e as hipóteses necessárias para sua obtenção são apresentadas a seguir.

Teorema 1 (LQR em Regime Permanente). *Dada a dinâmica discreta do sistema*

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k); \quad x(0) = x_0, \quad (\text{B.1})$$

onde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ e $u(k) \in \mathbb{R}^m$, juntamente com o índice de desempenho a ser minimizado

$$y(k) = Cx(k), \quad (\text{B.2})$$

sendo $y(k) \in \mathbb{R}^p$. Define-se uma função custo quadrática

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [x(k)'Qx(k) + u(k)'Ru(k)] \quad (\text{B.3})$$

onde sem perda de generalidade, os estados de interesse são ponderados apenas em relação ao esforço de controle através da matriz R . Assume-se que:

Hipótese 1. *Todos os estados do sistema estão disponíveis.*

Hipótese 2. *O par $[A, B]$ é controlável e o par $[A, C]$ é detectável (Apêndice C)*

Hipótese 3. $R = R' > 0$

Então o controle linear quadrático é único e ótimo, sendo a lei de controle que minimiza J dada por:

$$K = -R^{-1}B'S \quad (\text{B.4})$$

onde S é a solução única, simétrica e positiva definida da equação de Riccati

$$SA + A'S + C'C - SBR^{-1}B'S = 0 \quad (\text{B.5})$$

Esta teoria pode ser aplicada ao controle de porcentagens de verde, o que é feito pela teoria TUC.

Dadas as matrizes A , B , Q e R , o ganho da matriz L pode ser calculada de:

$$L(k) = [R + B^T P(k+1)B]^{-1} B^T P(k+1)A \quad (\text{B.6})$$

onde a matriz de Riccati $P(k)$ é a solução da equação a diferenças de Riccati:

$$P(k) = Q + A^T P(k+1)A - A^T P(k+1)BL(k) \quad (\text{B.7})$$

Apêndice C

Propriedades Estruturais de Sistemas de Controle Lineares

Dentre as propriedades de um sistema linear de malha aberta, duas delas merecem destaque: controlabilidade e observabilidade. A primeira está associada ao número e localização dos atuadores do sistema enquanto a segunda ao número e localização dos sensores. Quando a estrutura do sistema apresenta essas propriedades temos garantia de poder projetar um controlador de tal forma que os pólos da malha fechada possam ser escolhidos de forma arbitrária (desejada) pelo projetista.

C.1 Controlabilidade

Um sistema é controlável num instante t_0 se for possível, por meio de um vetor de controle sem restrições em seus elementos, transferi-lo de qualquer estado inicial $x(t_0)$ para qualquer outro estado em um intervalo finito de tempo. A controlabilidade do sistema

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

pode ser testada verificando se o posto da matriz de controlabilidade

$$M_c = [BAB \dots A^{n-1}B]$$

é igual à dimensão do vetor de estado do sistema [4]. Quando a matriz de controlabilidade possui posto r , inferior ao número de variáveis de estado, então existe uma transformação de

similaridade T tal que

$$\tilde{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ 0 & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = CT^{-1}, \quad \tilde{D} = D$$

onde $\tilde{A}_{11} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ e o par $(\tilde{A}_{11}, \tilde{B}_1)$ é controlável.

C.2 Estabilizabilidade

O sistema é dito estabilizável quando os autovalores não controláveis são estáveis, isto é os autovalores de \tilde{A}_{22} possuem parte real negativa.

C.3 Observabilidade

O sistema C.1 é observável se todo estado inicial $x(t_0)$ puder ser determinado a partir do conhecimento de $y(t)$, $u(t)$ durante um intervalo de tempo finito, $t_0 \leq t \leq t_1$. A observabilidade pode ser testada verificando se o posto da matriz de controlabilidade

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

é igual à dimensão do vetor de estado do sistema [4]. Quando a matriz de observabilidade possui posto r , inferior ao número de variáveis de estado, então existe uma transformação de similaridade T tal que

$$\tilde{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ 0 & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = CT^{-1}, \quad \tilde{D} = D$$

onde $\tilde{A}_{11} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ e o par $(\tilde{A}_{11}, \tilde{B}_1)$ é observável.

C.4 Detectabilidade

O sistema é dito detectável quando os autovalores não observáveis são estáveis, isto é os autovalores de \tilde{A}_{22} possuem parte real negativa.

Referências Bibliográficas

- [1] K. Aboudolas, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos. Control and optimization methods for traffic signal control in large-scale congested urban road networks. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 3132–3138, Nova York, jul 2007.
- [2] C. Bielefeldt, C. Diakaki, and M. Papageorgiou. TUC and the smart nets project. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pages 55–60, 2001.
- [3] F. Boillot, J.M. Blosseville, J.B. Lesort, V. Motyka, M. Papageorgiou, and S. Sellam. Optimal signal control of urban traffic networks. In *Proceedings of the Sixth IEE International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, pages 75–79, Londres, 1992.
- [4] C. T. Chen. *Linear Systems Theory and Design*. Oxford, third edition, 1999.
- [5] C. Diakaki. *Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Networks*. PhD thesis, Departamento de Engenharia de Produção e Gerenciamento, Universidade Técnica de Creta, 1999.
- [6] C. Diakaki, M. Papageorgiou, and partners of the TABASCO project. Urban integrated traffic control implementation strategies. Technical report project tabasco (tr1054), Transport Telematics Office, Bruxelas, Bélgica, set 1997.
- [7] C. Diakaki, M. Papageorgiou, and K. Aboudolas. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice*, 10:183–195, 2002.
- [8] J.L. Farges, L. Khoudour, and J.B. Lesort. Prodyn: On site evaluation. *Proceedings of the 3rd IEE Conference on Road Traffic Control*, pages 62–66, 1990.
- [9] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. Workman. *Digital Control of Dynamic Systems*. Prentice Hall, third edition, 1997.
- [10] N.H. Gartner. OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. *Transportation Research Record*, 906:75–81, 1983.

-
- [11] N.H. Gartner, F.J. Pooran, and C.M. Andrews. Implementation of the OPAC adaptive strategy in a traffic signal network. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pages 195–200, Oakland, 2001.
- [12] D. C. Gazis and R. B. Potts. The oversaturated intersection. In *Proceedings of the Second International Symposium on Traffic Theory*, pages 221–237, Londres, 1963.
- [13] D. L. Gerlough and M. J. Huber. *Traffic Flow Theory: A Monograph*. Transportation Research Board, National Research Council, 1975.
- [14] P.G. Gipps. A behavioural car following model for computer simulation. *Transportation Research Board*, 15B:4063–414, 1981.
- [15] K.L. Head, P.B. Mirchandani, and S. Shelby. The RHODES prototype: a description and some results. In *77th Transportation Research Board Annual Meeting*, pages 1–12, Tucson, 1998.
- [16] P.B. Hunt, D.I. Robertson, R.D. Bretherton, and M.C. Royle. The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering and Control*, 23:190–199, 1982.
- [17] E. Kosmatopoulos, M. Papageorgiou, C. Bielefeldt, V. Dinopoulou, R. Morris, J. Mueck, A. Richards, and F. Weichenmeier. International comparative field evaluation of a traffic-responsive signal control strategy in three cities. *Transportation Research Part A*, 40: 399–413, 2006.
- [18] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis, and F. Middelham. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool metanet. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3:282–292, 2002.
- [19] W. Kraus. Jr, E. Camponogara, R. S. Oliveira, and M. H. de Queiroz. Projeto central de controle de tráfego em tempo real. In *UFSC, Depto. de Automação e Sistemas*, 2007.
- [20] P. Lowrie. The Sydney co-ordinated adaptive traffic system - principles, methodology algorithms. In *In Proceedings of the IEE International Conference on Road Traffic Signalling*, pages 67–70, Londres, 1982.
- [21] L. Magne, S. Rabut, and J.F. Gabard. Towards an hybrid macro-micro traffic flow simulation model. In *INFORMS Spring String 2000 Conference*, pages 1–7, Salt Lake City, USA, may 2000.
- [22] S. Panwai and H. Dia. Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6:314–325, 2005.
- [23] M. Papageorgiou. Overview of road traffic control strategies. In *Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, pages LIX–LLX, 2004.

-
- [24] I. Porche, M. Sampath, R. Sengputa, Y. Chen, and S. Lafortune. A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signal. In *INFORMS Spring String 2000 Conference*, pages 1–7, Salt Lake City, USA, may 2000.
- [25] D.I. Robertson and R.D. Bretherton. Optimizing networks of traffic signals in real time - the scoot method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 11-15, 1991.
- [26] TSS-Transport Simulation Systems. *AIMSUN 5.1 Simulator User's Manual v5.1.4*, 12 2006.
- [27] M. van den Berg, A. Hegyi, B. De Schutter, and J. Hellendoorn. A macroscopic traffic flow model for integrated control of freeway and urban traffic networks. *4²nd IEEE Conference on Decision and Control Proceedings*, pages 2774–2779, 2003.

