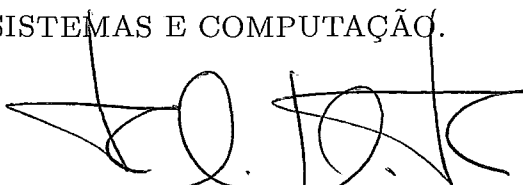


CONTROLE DISTRIBUÍDO DA SINALIZAÇÃO DE INTERSEÇÕES E DO
FLUXO DE TRÁFEGO


Ivomar Brito Soares

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA
COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



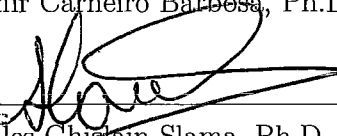
Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.




Prof. Félix Mora-Camino, Ph.D.



Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.



Prof. Jules Ghislain Slama, Ph.D.



Prof. Cristiana Bentes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2007

SOARES, IVOMAR BRITO

Controle Distribuído da Sinalização de Interseções e do Fluxo de Tráfego

[Rio de Janeiro] 2007

XVI, 97 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas Inteligentes de Transporte
2. Escalonamento por Reversão de Arestas
3. Controle Distribuído de Tráfego

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

Aos membros da banca examinadora, pela generosidade ao disponibilizar tempo para a apreciação deste trabalho.

Aos meus orientadores, Felipe França e Félix Mora-Camino, pela sugestão do tema proposto, pelo acompanhamento durante o desenvolvimento desse trabalho, pelas inúmeras lições aprendidas e por seu companheirismo e amizade.

À Talita e à Saul, pela leitura crítica de uma versão preliminar deste texto.

Ao Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC/COPPE/UFRJ) por todo o suporte fornecido que me permitiu desenvolver essa dissertação de mestrado. Em especial gostaria de agradecer a: Cláudia, Solange, Roberto Rodrigues, Mercedes, Itamar, Adilson e Lourdes.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela base sólida de minha formação. Em especial, ao Prof. Wilton Pereira da Silva, meu orientador de iniciação científica por três anos, pelas muitas lições aprendidas e por sua amizade.

Aos meus professores do mestrado: Gerson Zaverucha (Teoria de Conjuntos e Lógica), Felipe França (Arquitetura de Computadores I e II), Ricardo Farias (Estrutura de Dados e Algoritmos), Paulo Augusto Veloso (Teoria da Computação), Claudio Amorim (Arquiteturas Avançadas), Valmir Barbosa (Algoritmos Distribuí-

dos) e Vítor Costa (Sistemas Operacionais).

Aos autores referenciados que, com seus trabalhos, possibilitaram a realização desta pesquisa.

À Capes, pela bolsa de mestrado fornecida, que permitiu custear minhas despesas durante os dois anos que morei no Rio de Janeiro.

Aos vários amigos que fiz na UFRJ: Bruno, Leandro, Talita, Alexandre, Bernardo, Danilo, Fabiano, André Nathan, Patrícia, André Lúcio, Vivian, Cristiane, João Victor, Thiago Henrique, Yammil, Elison, Tiago, Fernando, João Maurício, Luciana, Carlos Melo, Sérgio Gonzalez, Reinaldo, Carina, Roberto Rodrigues, Leiser, Gustavo, Ramon, Priscila, Guilherme. Obrigado a todos por seu companheirismo e agradáveis momentos que me proporcionaram.

Aos meus familiares que residem na cidade do Rio de Janeiro, sem o seu apoio e suporte, minha vida durante o mestrado teria sido muito mais difícil. Um agradecimento especial ao meu primo e grande amigo Saul por sua infinita disponibilidade e nobreza de caráter.

À minha família (Ivonete, Iomar, Jalusa) por sempre estarem presentes quando preciso, e por me darem apoio quando a distância e a saudade de casa se tornam muito grandes.

A Deus, que com sua infinita generosidade, sempre tem colocado em meu caminho pessoas maravilhosas e ótimas oportunidades. Obrigado por tudo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONTROLE DISTRIBUÍDO DA SINALIZAÇÃO DE INTERSEÇÕES E DO FLUXO DE TRÁFEGO

Ivomar Brito Soares

Agosto / 2007

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Félix Mora-Camino

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Uma nova estratégia para o controle distribuído da sinalização de interseções de tráfego, em cenários de *Sistemas Inteligentes de Transporte*, é introduzida. Regiões de uma interseção são mapeados como recursos atômicos, compartilhados por ondas de fluxo de tráfego, que são associadas a processos. Estes, por sua vez, têm sua atividade modulada pela dinâmica de grafos distribuída conhecida como *Escalonamento por Reversão de Arestas*, que garante, por construção, a ausência de fenômenos indesejáveis, tais como, violação de *exclusão mútua*, *bloqueio perpétuo* e *fome*. Como prova de conceito, é proposta uma generalização do conhecido paradigma da *onda verde* para uma rede de vias formando uma grade Manhattan. Um novo mecanismo distribuído, análogo a um *pipeline* assíncrono, é também derivado para o controle de veículos movendo em pelotão. Finalmente, por meio de microsimulações, é apresentada uma análise quantitativa restrita do impacto do mecanismo da onda verde generalizada no fluxo de tráfego, considerando veículos que aceitam e que não aceitam a sugestão da onda verde generalizada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DISTRIBUTED CONTROL OF INTERSECTIONS SIGNALIZATION AND TRAFFIC FLOW

Ivomar Brito Soares

August / 2007

Advisors: Felipe Maia Galvão França

Félix Mora-Camino

Department: Computing and Systems Engineering

A new strategy for the distributed control of traffic intersections signalization, in *Intelligent Transportation Systems* scenarios, is introduced. Regions that make up an intersection are taken as atomic resources, shared by traffic flow waves, that are associated to processes. These, in their turn, have their activity modulated by the distributed graphs dynamics known as *Scheduling by Edge Reversal*, that guarantees, by construction, the absence of undesired phenomena, such as, violation of *mutual exclusion*, *deadlock* and *starvation*. As a proof of concept, a generalization of the well known *green wave* paradigm for a Manhattan grid neighborhood is proposed. A new distributed mechanism, analogous to an asynchronous *pipeline*, is also derived for the control of vehicles moving as a *platoon*. Finally, by means of microsimulations, a restricted quantitative analysis of the impact of the generalized green wave mechanism on traffic flow is shown, considering vehicles that accept and that do not accept the generalized green wave suggestion.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	<i>ITS</i> como Sistemas Restritos por Vizinhança	2
1.2	Objetivos e Contribuições	4
1.3	Trabalhos Relacionados	5
1.3.1	Sinalização de Interseções	5
1.3.2	Coordenação de Sinais de Trânsito	8
1.3.3	Guiagem Automática de Veículos	11
1.3.3.1	Controle Adaptativo de Cruzeiro	12
1.3.3.2	Introdução de Vias Apropriadas para <i>AVG</i>	13
1.3.3.3	Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo	14
1.3.3.4	Pelotão de Veículos	15
1.4	Estrutura do Trabalho	18
2	Fundamentos	19
2.1	Elementos do Fluxo de Tráfego	19
2.1.1	Relacionamento Fluxo-Densidade	20

2.1.2	Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego	21
2.2	Modelos de Perseguição Veicular	22
2.2.1	<i>Intelligent Driver Model</i>	23
2.2.1.1	Propriedades Dinâmicas	25
2.2.1.2	Modelando Veículos e Perfis de Motoristas Distintos	26
2.3	O Escalonamento por Reversão de Arestas	27
2.3.1	Conceitos	27
2.3.2	Generalizações do <i>SER</i>	30
2.3.2.1	Escalonamento por Reversão de Arestas Múltiplas	30
2.3.2.2	Escalonamento por Reversão de Arestas com Hibernação	32
2.3.3	Modelagem Usando <i>SER</i> : um <i>Pipeline</i> de Cinco Estágios em Arquitetura de Computadores	35
3	Controle Distribuído e o <i>SER</i> em Sistemas Inteligentes de Transportes	39
3.1	Sinalização de Interseções como Compartilhamento de Recursos	39
3.1.1	Interseção Simples	42
3.1.1.1	Modelo <i>SER</i>	43
3.1.1.2	Dinâmica	44
3.1.2	Interseção Complexa	45
3.1.2.1	Modelo <i>SER</i>	47

3.1.2.2	Dinâmica	48
3.1.3	Interseção Complexa Combinando o Tráfego de Veículos e Pedestres	50
3.1.3.1	Modelo <i>SER</i>	52
3.1.3.2	Dinâmica	53
3.1.4	Comentários	55
3.2	A Onda Verde Generalizada: Os Tapetes Verdes	56
3.2.1	Cálculo dos Parâmetros da Onda Verde	59
3.2.1.1	Tempo de Deslocamento T_{ov}	59
3.2.1.2	Velocidade de Deslocamento V_{ov}	60
3.2.1.3	Comprimento C_{ov}	60
3.2.2	Comentários	61
3.3	Pelotão de Veículos Modelado como um <i>Pipeline</i> Assíncrono	62
3.3.1	Modelo <i>SER</i>	63
3.3.2	Comentários	65
4	Análise Quantitativa Restrita da Onda Verde Generalizada	66
4.1	Ambiente de Simulação	66
4.2	Métrica	69
4.3	Cenários e Resultados	70
4.3.1	Cenário 1: Avenida	71
4.3.1.1	Primeira situação: Variando o fluxo de entrada	72

4.3.1.2	Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes	73
4.3.1.3	Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva	74
4.3.1.4	Comentários	74
4.3.2	Cenário 2: Grade Manhattan 5x5 Simétrica	75
4.3.2.1	Primeira situação: Variando o fluxo de entrada	77
4.3.2.2	Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes	79
4.3.2.3	Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva	81
4.3.2.4	Comentários	82
4.3.3	Cenário 3: Grade Manhattan 2x2 Assimétrica	84
4.3.3.1	Primeira situação: Variando o fluxo de entrada	85
4.3.3.2	Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes	86
4.3.3.3	Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva	87
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	88
5.1	Conclusões	88
5.2	Trabalhos Futuros	90

Lista de Figuras

1.1	Interseção na cidade de Makati nas Filipinas.	6
1.2	Pelotões de ônibus e carros realizado pelo <i>PATH Project</i>	17
2.1	Relação entre fluxo e densidade: o diagrama fundamental.	22
2.2	Representação dos estímulos de entrada dos modelos de perseguição veicular.	23
2.3	Exemplo da dinâmica do <i>SER</i> ($m = 2, p = 5$).	29
2.4	Exemplo da dinâmica do <i>SMER</i>	31
2.5	Exemplo da dinâmica do <i>SER^H</i>	34
2.6	<i>Pipeline</i> simples de cinco estágios em arquitetura de computadores. . .	36
2.7	Grafo de restrições para um <i>pipeline</i> de cinco estágios.	38
3.1	Interseção simples.	43
3.2	Grafo de restrições da interseção simples.	44
3.3	Situação 1 da dinâmica <i>SER</i> da interseção simples.	44
3.4	Situação 2 da dinâmica <i>SER</i> da interseção simples.	45
3.5	Interseção complexa.	46

3.6	Grafo de restrições da interseção complexa.	48
3.7	Situação 1 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa.	49
3.8	Situação 2 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa.	49
3.9	Situação 3 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa.	50
3.10	Interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres. . .	51
3.11	Grafo de restrições da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.	53
3.12	Situação 1 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.	54
3.13	Situação 2 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.	54
3.14	Situação 3 da dinâmica <i>SER</i> da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.	55
3.15	Rede Manhattan 3x3 simétrica onde foi implementado o mecanismo da onda verde generalizada.	58
3.16	Representação de uma via dividida em regiões para o deslocamento de um pelotão de veículos modelado como um <i>pipeline</i> assíncrono. . .	63
3.17	Grafo de restrições do pelotão de veículos modelado como um <i>pipeline</i> assíncrono.	64
3.18	Fotografia do deslocamento de um pelotão de veículos modelado como um <i>pipeline</i> assíncrono.	65
4.1	Simulação da rede Manhathan 2x2 simétrica da Figura 3.15.	68
4.2	Quatro interseções em linha reta.	70

4.3	Cenário 1: Avenida.	71
4.4	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função do fluxo de entrada.	72
4.5	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função da porcentagem de veículos verdes.	73
4.6	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função da probabilidade de fazer uma curva.	74
4.7	Cenário 2: Grade Manhattan 5x5 Simétrica.	76
4.8	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função do fluxo de entrada - Caso 1. . .	77
4.9	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função do fluxo de entrada - Caso 2. . .	78
4.10	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da porcentagem de veículos verdes - Caso 1.	79
4.11	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da porcentagem de veículos verdes - Caso 2.	80
4.12	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da probabilidade de fazer uma curva - Caso 1.	81
4.13	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da probabilidade de fazer uma curva - Caso 2.	82

4.14	Cenário 3: Grade Manhattan 2x2 Assimétrica.	84
4.15	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função do fluxo de entrada.	85
4.16	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função da porcentagem de veículos verdes.	86
4.17	Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função da probabilidade de fazer uma curva.	87

Lista de Tabelas

2.1	Valores típicos dos parâmetros do <i>Intelligent Driver Model</i> para um carro padrão.	26
3.1	Compartilhamento da interseção simples.	43
3.2	Compartilhamento da interseção complexa.	47
3.3	Compartilhamento da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.	52

Palavras-chave

1. Sistemas Inteligentes de Transporte
2. Escalonamento por Reversão de Arestas
3. Controle Distribuído de Tráfego

Capítulo 1

Introdução

Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems - ITS*) [10] referem-se a uma variedade de ferramentas, como conceitos em engenharia de tráfego, *hardware*, *software* e tecnologias de comunicação. Estes conceitos podem ser aplicados, de maneira integrada, com o objetivo de melhorar a eficiência e a segurança do sistema de transporte, tentando dar vazão aos desafios do aumento do tráfego sem a necessidade de se construir capacidades adicionais.

O *ITS* tem o potencial de melhorar o fluxo de tráfego, pela redução dos congestionamentos; melhorar a qualidade do ar, pela redução da poluição e dos atrasos nas viagens; melhorar a segurança em geral, provendo avisos antecipados de possíveis situações de risco. Pode também minimizar os efeitos do ambiente, rodovias e fatores humanos que contribuem para os acidentes no trânsito.

Investimentos nessa área impulsionam o crescimento econômico de uma região, aperfeiçoando a mobilidade dos indivíduos e reduzindo o consumo de combustível. Adicionalmente, o *ITS* apresenta um grande potencial para facilitar as viagens, fornecendo informações precisas e personalizadas em tempo real.

1.1 *ITS* como Sistemas Restritos por Vizinhança

O mundo está repleto de sistemas restritos por vizinhança, talvez o maior sistema restrito por vizinhança seja o próprio universo [15]. Em sistemas desse tipo, processos distintos competem entre si pelo direito de utilizar um conjunto de recursos atômicos e compartilhados para poder operar. As principais preocupações ao se criar estratégias de escalonamento para tais sistemas são com a **concorrência** (medida da quantidade de processos que podem estar operando simultaneamente), **bloqueio perpétuo** (*deadlock*, permanente impossibilidade de um grupo de processos prosseguir com suas tarefas, pela ocorrência de alguma condição que impede que ao menos um recurso seja concedido a cada um dos processos desse grupo), **justiça** (todos os processos possuem iguais prioridades de operação) e **fome** (*starvation*, situação em que um dos processos permanece indefinidamente sem conseguir operar, enquanto outros estão operando normalmente) [3]. Em geral, concorrência deve ser maximizada, justiça deve ser obtida, enquanto bloqueio perpétuo e fome devem ser minimizados ou extintos [15].

No caso de *ITS*, alguns cenários podem ser vistos como possuindo essa característica de funcionamento sob restrição por vizinhança. Um exemplo interessante é a questão da manipulação do tráfego de veículos através de uma intersecção, que representa um dos problemas mais importantes nessa área. Nesse cenário, cada fluxo de veículos incidente e que deseja cruzar a intersecção, proveniente de vias distintas, pode ser imaginado como sendo um processo, que se tornaria ativo, quando a ele tenha sido concedido o direito de cruzá-la. Alguns desses processos podem estar, portanto, competindo entre si pelo direito de trafegar por diferentes regiões que compõem a intersecção. Essas diferentes regiões representariam os diferentes recursos atômicos e compartilhados que um processo necessitaria ter posse para poder estar ativo.

Para esse exemplo específico, a concorrência está ligada a quantidade de fluxos

de veículos, provenientes de vias distintas, que podem estar cruzando a interseção simultaneamente. Intuitivamente, para essa situação, espera-se que a concorrência seja maximizada, aumentando a fluidez e a capacidade de manipulação do tráfego pela interseção. Deve-se evitar o bloqueio perpétuo e a fome que, neste caso, estariam representados pela permanente impossibilidade de alguns ou todos os fluxos de veículos poderem cruzá-la. Outra característica de fundamental importância é com a segurança, onde um determinado fluxo de veículos só poderá trafegar pela interseção quando se tiver a garantia de que nenhum outro fluxo conflitante esteja trafegando pelas mesmas regiões.

Estratégias na literatura existem com o objetivo de se criar políticas de escalonamento dos recursos compartilhados por processos em sistemas restritos por vizinhança [3]. Dentre elas, uma que fornece uma solução potencialmente ótima para este problema é o Escalonamento por Reversão de Arestas (*Scheduling by Edge Reversal - SER*) estudado por Barbosa [6]. O *SER* foi criado com a suposição de que os sistemas designados, além de serem restritos por vizinhança, funcionam em alta carga (os processos estão continuamente exigindo acesso aos recursos compartilhados) e deve-se garantir exclusão mútua no acesso aos recursos compartilhados (apenas um processo por vez pode estar utilizando um determinado recurso compartilhado). Este mecanismo de escalonamento foi demonstrado como tendo o potencial de prover a maior concorrência entre os esquemas de escalonamento com características de restrição por vizinhança, enquanto é capaz de evitar, por construção, problemas tradicionais como bloqueio perpétuo e fome, caso algumas condições simples sejam satisfeitas. É também um mecanismo justo, fornecendo iguais prioridades aos diferentes processos para poderem operar, e consegue garantir, através da exclusão mútua, a segurança essencial e desejada em *ITS*.

1.2 Objetivos e Contribuições

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver uma nova estratégia de controle distribuído para alguns cenários em Sistemas Inteligentes de Transporte que permitem uma interpretação como sistemas restritos por vizinhança. Foi utilizado o Escalonamento por Reversão de Arestas para gerenciar a política de escalonamento dos recursos atômicos e compartilhados com garantias de exclusão mútua entre os diversos processos. Os cenários em *ITS* trabalhados são os seguintes: a sinalização de interseções; a coordenação de interseções, através da generalização do conhecido paradigma da onda verde para uma rede de vias formando uma grade Manhattan; e o controle do tráfego de veículos na forma de um pelotão modelado como um *pipeline* assíncrono.

Resumidamente, as contribuições principais desta dissertação são:

- introdução de um mecanismo distribuído para o controle da sinalização de interseções que seja seguro (só será dada permissão a um veículo trafegar pela interseção quando existir a garantia de que não haverá outro veículo trafegando pelas mesmas regiões, evitando assim o risco de colisões), justo (em tempo finito, todos os veículos terão a permissão de trafegar pela interseção) e flexível (ter liberdade para se utilizar qualquer algoritmo para a determinação dos intervalos de tempos que os sinais permanecem abertos e em que instantes eles irão abrir);
- generalização do paradigma da coordenação de interseções em uma linha reta, comumente conhecido como “onda verde”, para um conjunto de vias de uma rede do tipo Manhattan;
- aplicar o modelo *SER*, originalmente proposto para o controle de um *pipeline* assíncrono em Arquitetura de Computadores [12], para se controlar o deslocamento de veículos em pelotão (um *pipeline* de veículos), podendo ser usado

como um mecanismo distribuído anti-colisões.

1.3 Trabalhos Relacionados

Nessa seção, inicialmente, são descritos brevemente os principais tipos de controle utilizados para se realizar a sinalização de interseções (controle a tempo fixo, a tempo atuado e baseado em lógica fuzzy) relatando algumas vantagens e desvantagens da utilização de cada um deles. Em seguida, algumas técnicas utilizadas para se gerar a coordenação de diversos sinais de trânsito e conseguir o fenômeno da onda verde são descritas. Apresentando, inicialmente, as mais tradicionais, baseadas em programas de computador (*TRANSYT-7F* e *SYNCHRO*) que geram planos de sinalização ótimos. Depois, alguns trabalhos mais recentes, que utilizam a técnica distribuída em inteligência artificial de multi-agentes para realizar essa coordenação. Por fim, são descritos alguns sistemas de Guiagem Automática de Veículos (*Automated Vehicle Guidance - AVG*) (Controle Adaptativo de Cruzeiro, Introdução de Vias Apropriadas para *AVG*, Pelotão de Veículos e Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo), que são sistemas criados com o objetivo de que certas atividades, relativas à condução de um veículo, sejam parcial ou completamente delegadas a um sistema automatizado. Aqui, dá-se enfoque especial as implicações no desempenho do tráfego ao serem utilizados tais sistemas.

1.3.1 Sinalização de Interseções

Uma interseção representa um dos componentes mais complexos do sistema de transporte, onde fluxos de tráfego conflitantes competem pelo direito de atravessá-la [10] (a Figura 1.1 mostra um exemplo na cidade de Makati nas Filipinas). Quando o volume de tráfego é baixo, o tráfego pela interseção pode ser regulado usando regras básicas, por exemplo, uma regra comum diz que um motorista deve dar a

permissão ao motorista que vem pela sua direita. Todavia, quando o volume de tráfego aumenta, torna-se bastante difícil para os motoristas selecionarem espaços adequados a fim de realizarem as manobras desejadas pela interseção. Quando essa situação acontece, torna-se essencial o uso de algum mecanismo de sinalização do tráfego, por exemplo, pela utilização de sinais de trânsito.

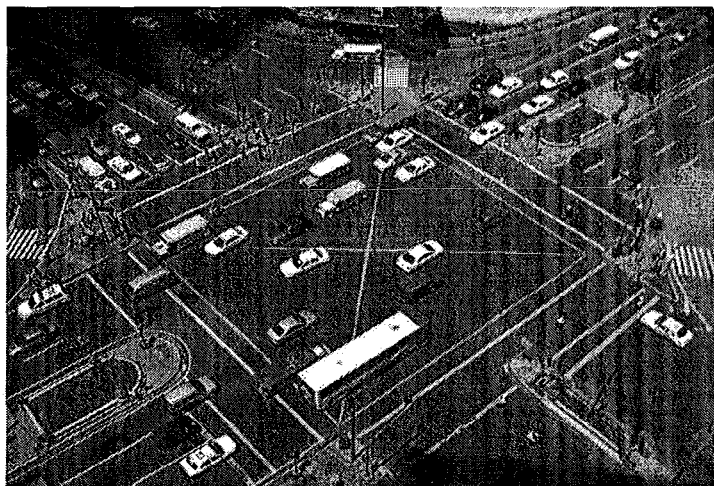


Figura 1.1: Interseção na cidade de Makati nas Filipinas.

Sinais de trânsito realizam um papel fundamental no desempenho total de um sistema de tráfego. Quando mal concebidos, podem resultar em atrasos desnecessários e excessivos. Por outro lado, o mecanismo de controle de um sinal de trânsito, caso seja desenvolvido apropriadamente, pode prover o movimento ordenado de veículos e pedestres, aumentando a capacidade de manipulação do tráfego pela interseção.

Dentre os diversos mecanismos de controle já utilizados para os sinais de trânsito, pode-se citar: o controle a **tempo fixo**, a **tempo atuado** e o baseado em lógica **fuzzy**. Outras técnicas como algoritmos genéticos e redes neurais também já foram utilizadas [32].

- **Controle a tempo fixo:** nesse tipo de controle, os parâmetros de funciona-

mento do sinal de trânsito são determinados de acordo com o volume médio do fluxo de veículos, durante certos períodos do dia [17]. Apesar da variação do fluxo de tráfego possuir certa uniformidade, quando analisado de maneira macroscópica; porém, quando analisado de maneira microscópica, possui grande variabilidade, especialmente durante um único ciclo do sinal [9]. O controle a tempo fixo tem dificuldade em se adaptar a essa aleatoriedade do fluxo de tráfego, e o efeito disso é uma má resposta de controle.

- **Controle a tempo atuado:** nesse tipo de controle, as durações de verde são variáveis, indo de um intervalo de tempo de verde mínimo a um intervalo de tempo de verde máximo [17]. O intervalo de tempo entre o verde mínimo e o verde máximo chama-se de intervalo de decisão, durante o qual, um determinado algoritmo decide a permutação para a fase seguinte. Esse tipo de controle superou a restrição do controle a tempo fixo quanto à variabilidade do tráfego, mudando a temporização do sinal de acordo com a chegada aleatória dos veículos e, com isso, tem o potencial para aumentar a capacidade de uma interseção e diminuir o atraso [9]. Contudo, ele apenas considera o fluxo de tráfego na fase atual, desconsiderando o fluxo em fases antagônicas, podendo ocasionar longas filas nessas fases.
- **Fuzzy:** os pesquisadores que realizam planejamento de trânsito, em geral, avaliam as condições de tráfego baseados em opiniões subjetivas, incluindo expressões mal-definidas ou não-mensuráveis [19]. Em adição a termos lingüísticos como curto e longo, freqüentemente são utilizados termos numéricos subjetivos, como, por exemplo, tempo de viagem ou atraso estimado. Para esse ramo “ilógico” dos problemas de transportes, a lógica fuzzy, introduzida ao controle de tráfego por Pappis [20], provê alternativas que combinam variáveis subjetivas com um método sistemático para a resolução de problemas. Com lógica fuzzy é possível avaliar os valores relacionados à utilização de diferentes variáveis e imitar o processo humano de tomada de decisão. Contudo, os algoritmos

baseados em lógica fuzzy são freqüentemente complicados e possuem muitos parâmetros, sendo difícil usá-los na prática [9].

1.3.2 Coordenação de Sinais de Trânsito

Várias abordagens existem com o objetivo de se tentar melhorar o desempenho do fluxo de tráfego nas grandes cidades. Uma classe dessas abordagens lida com a coordenação dos sinais de trânsito, permitindo que veículos trafegando em uma determinada direção, e com uma determinada velocidade, cruzem diversas interseções com um número mínimo de paradas. Esse é um paradigma muito popular no controle de tráfego urbano e recebe a denominação genérica de “onda verde”. Para tentar se obter a onda verde máxima, já foram propostos ábacos, técnicas gráficas, procedimentos de tentativa e erro, programação linear inteira mista, entre outros [18].

Uma das maneiras mais populares para se gerar a coordenação de sinais de trânsito baseia-se na utilização de programas de computador destinados a criação de planos de sinalização ótimos [10]. A idéia básica do funcionamento desses programas consiste em tentar encontrar um conjunto de parâmetros de temporização do sinal de trânsito que minimizam uma determinada medida de desempenho (atraso total, número de paradas, etc), satisfazendo a diferentes restrições. Entre os programas de computador mais famosos com esse objetivo estão o *TRANSYT-7F* e o *SYNCHRO*.

O modelo do *TRANSYT-7F* (*TRAffic Network StudY Tool*) [1] possui duas funções principais:

1. **A simulação do fluxo de tráfego.** Para esse fim, o *TRANSYT* utiliza uma abordagem de simulação macroscópica que modela pelotões de veículos ao invés de veículos individuais. Esse modelo utiliza um algoritmo de dispersão de

pelotões para simular a dispersão ou o espalhamento dos veículos ao trafegarem pela via. O *TRANSYT* se mostra capaz de modelar bem realisticamente o fluxo de tráfego e estimar um número considerável de medidas de desempenho, como: atraso, paradas e formação de filas, consumo de combustível e tempo de viagem;

2. **A otimização dos planos de sinalização de trânsito.** Para definir um plano de sinalização ótimo, o *TRANSYT* varia diversos parâmetros relativos à temporização do sinal, até que um plano que otimiza uma função objetivo, definida pelo usuário, seja identificado.

O *SYNCHRO* [10] é outro software usado para gerar planos de sinalização ótimos. Para realizar a otimização, o *SYNCHRO* usa uma função objetivo que tenta minimizar uma combinação dos seguintes parâmetros: atraso, número de paradas e o número de veículos em uma fila. Uma vantagem singular do *SYNCHRO* é sua habilidade em modelar com exatidão a operação de controladores atuados dentro de um sistema coordenado.

Um dos motivos principais, pelo qual metodologias de coordenação de sinais de trânsito, se baseiam predominantemente em programação linear, é devido ao fato que abordagens totalmente descentralizadas podem causar gargalos de comunicação [13]. Alguns métodos mais recentes usam técnicas mais robustas e flexíveis (pode-se quebrar um determinado grupo de coordenação, de modo que uma interseção possa começar a coordenar em outra direção com outros vizinhos) como a abordagem de multi-agentes em inteligência artificial [2] [13]. Nessas abordagens, cada sinal de trânsito é considerado como sendo um agente, e a idéia principal, ao se realizar o controle de tráfego, é tentar obter um certo comportamento global a partir dos micro-comportamentos individuais dos sinais. Os benefícios dessa nova técnica são basicamente três [13]:

- não é necessário existir um agente central para determinar a direção da coordenação;
- os agentes podem construir dinamicamente subgrupos de coordenação de sinais de trânsito que correspondam as suas necessidades atuais, permitindo que os veículos trafeguem por uma determinada direção sem parar;
- evita comunicação entre os agentes, quando eles precisam decidir em qual direção irão coordenar (não existe comunicação explícita ou negociação).

Em um dos trabalhos nesse contexto, Balan [2] ¹ tentou criar um mecanismo que não só prima pela eficiência da circulação do tráfego (eficiência está relacionado aos seguintes fatores: níveis mais baixos de emissões de gases tóxicos, velocidades médias mais altas, menor probabilidade de paradas, etc), como também tenta ser justo. Utilizando um sistema de créditos, um sinal dá prioridade para trafegar pela interseção faixas cujos veículos apresentam o maior tempo de espera em sinais anteriores (possuem a maior quantidade de créditos), de modo que, ao final, todos os veículos tenham esperado aproximadamente um mesmo intervalo de tempo. A partir das simulações, foi obtido o resultado de justiça esperado para alguns casos. Para outros, foi atingido mais eficiência em detrimento da justiça. Em um outro trabalho nesse contexto, Oliveira *et al* [13] propõem uma abordagem mais geral, no qual um conjunto de interseções a serem coordenadas é determinado dinamicamente. Os sinais de trânsito executam um algoritmo distribuído de satisfação de restrições (*OptAPO*) criando ondas verdes *ad hoc*.

Uma outra abordagem multi-agente encontrada na literatura baseia-se na técnica denominada colônia de formigas (*swarm intelligence*) [14]. Nesse trabalho, Oliveira *et al* definiram que cada sinal de trânsito se comporta como um inseto social (agente), onde os planos de sinalização são vistos como tarefas a serem rea-

¹Em seu trabalho, Balan afirma ser impossível obter o fenômeno da onda verde em todas as vias simultaneamente.

lizadas por cada inseto, sem um mecanismo centralizado ou de alocação de tarefas. Obtém-se, desta forma, um comportamento global como resultado das interações locais de cada inseto. Nesta abordagem, a habilidade de mudar de tarefa (a escolha de um determinado plano de sinalização segundo certos critérios de otimização), a fim de servir as necessidades da colônia (aos níveis local e global) estão localizadas em cada interseção. Os estímulos são providos pelos veículos, que, enquanto esperam pelo próximo sinal verde, estão continuamente exalando “feromônio” (esta metáfora é válida, pois, muitas interseções tem sensores que detectam a contagem de veículos). O volume de tráfego proveniente de uma determinada direção pode ser avaliado pelo agente, podendo ocasionar alguma mudança no plano de sinalização. Nas simulações realizadas, obtém-se uma sincronização global dos sinais de trânsito a partir de um comportamento local de cada agente.

1.3.3 Guiagem Automática de Veículos

Guiagem Automática de Veículos (*Automated Vehicle Guidance - AVG*) é o termo dado a todos os sistemas criados a fim de que, certas atividades relativas à condução de um veículo, sejam parcial ou completamente delegadas a um sistema automatizado [34]. Vários benefícios são esperados pela utilização de tais sistemas, como: **melhoria na utilização das vias**(por exemplo, esses sistemas permitem que os veículos trafeguem mais próximos uns dos outros), **aumento da segurança** (estima-se que 90% dos acidentes de trânsito sejam causados por erros humanos [26] e muitas das tecnologias propostas têm como objetivo retirar os humanos do controle dos veículos) e do **conforto** (por exemplo, muitos desses sistemas se incumbem de realizar tarefas repetitivas, reduzindo a carga sobre o motorista).

Pode-se agrupar o desenvolvimento e a implantação dos sistemas *AVG* em três estágios distintos (outras possibilidades de organizá-los podem ser imaginadas e descritas) [34]. A seguir, será apresentada uma descrição sucinta das principais ca-

racterísticas de cada um desses estágios, listando alguns sistemas já desenvolvidos e em desenvolvimento que são mais característicos de cada um deles. Posteriormente, serão detalhados alguns estudos relacionados ao desempenho do tráfego em um cenário *AVG* onde esses sistemas estão presentes.

- **Estágio 1:** começam a aparecer os primeiros sistemas que permitem auxiliar o motorista ou executar independentemente algumas tarefas relativas à condução do veículo. Veículos com e sem a presença de sistemas *AVG* coexistirão no tráfego. Não é previsto ainda qualquer comunicação entre os veículos, nem infra-estrutura inteligente de auxílio aos veículos *AVG* nas vias. Um exemplo de um desses sistemas, já implantado atualmente em alguns veículos, é o **Controle Adaptativo de Cruzeiro**.
- **Estágio 2:** prevê-se a introdução de faixas nas vias destinadas à circulação exclusiva de veículos dotados de sistemas *AVG*. Similarmente ao estágio anterior, não existe ainda nenhuma comunicação entre os veículos, nem infra-estrutura inteligente adicional presente nas vias.
- **Estágio 3:** esse estágio difere dos anteriores pela presença de infra-estrutura nas vias dotada de sistemas inteligentes e comunicativos, permitindo a comunicação dos veículos com a via e entre si. Outro desenvolvimento importante consiste na designação de vias próprias para veículos *AVG* formando uma rede de vias dedicadas. Exemplos de sistemas típicos desse estágio são o **Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo** e os **Pelotões de Veículos**.

1.3.3.1 Controle Adaptativo de Cruzeiro

Em [33], Zhang descreve o funcionamento do Controle Adaptativo de Cruzeiro (*Adaptive Cruise Control - ACC*) e realiza um dos primeiros estudos acerca das implicações na capacidade de utilização das vias ao se misturarem veículos com e sem

este mecanismo. O *ACC* permite que um veículo, utilizando medições efetuadas por radar ou laser, mantenha distância e velocidade apropriadas para o veículo da frente, desacelerando ao se aproximar de um outro veículo ou acelerando até atingir a velocidade apropriada quando o tráfego permite. Essa velocidade apropriada é calculada levando em consideração a velocidade desejada pelo motorista (determinada por ele próprio), o limite de velocidade local na via (determinado por equipamento de bordo ou recebido da via por comunicação a curta distância) e uma velocidade de referência (máxima velocidade resultante da operação do veículo). Caso a velocidade atual seja maior do que a velocidade de referência, o motorista é avisado. Ele não reagindo a tempo, o sistema intervém e reduz a velocidade do veículo automaticamente. Esse sistema fornece mais conforto ao motorista, visto que o retira da tarefa de estar continuamente tendo que ajustar sua velocidade para se adequar a velocidade do veículo da frente.

Zhang realizou um grande número de experimentos em situações reais de tráfego, nos quais 90 motoristas participaram. Tentou-se cobrir um grande número de cenários e diferentes porcentagens de veículos equipados com *ACC* (0%, 30%, 50% e 100%). O comportamento dos veículos foi avaliado analisando a menor separação para o veículo da frente. Os resultados obtidos das simulações mostram um considerável melhoramento quando analisado o aspecto da segurança. A proporção de veículos, que atingem uma distância para o veículo da frente menor do que 1s, decresce com o aumento da taxa de veículos que utilizam o *ACC*. Por outro lado, parâmetros macroscópicos, como densidade de tráfego e velocidade média, pouco mudaram como resultado da utilização desse mecanismo.

1.3.3.2 Introdução de Vias Apropriadas para *AVG*

Em [30], van Arem *et al* exploram os impactos no fluxo de tráfego ao se designar uma faixa exclusivamente dedicada para veículos inteligentes. Foi analisada uma

configuração que consiste em uma auto-estrada, na qual, a faixa da esquerda, de um conjunto de quatro faixas, foi bloqueada. Os veículos inteligentes foram considerados como possuindo o mecanismo *ACC* (ver 1.3.3.1). No cenário descrito, situações de congestionamento podem aparecer na região próxima à faixa interrompida, caso tráfego suficiente seja fornecido.

Foi utilizada uma taxa de veículos possuindo o mecanismo *ACC* variando entre 50 e 60% e as separações entre os veículos variando entre 0.7 e 1.0s. Cenários com e sem uma faixa *ACC* dedicada foram investigados. O fluxo máximo de veículos, para a situação de referência, foi melhorado em 8%, quando comparado ao caso de não se ter uma faixa dedicada para veículos *ACC*. No caso oposto, onde se tem uma faixa dedicada, obteve-se um melhoramento no fluxo máximo de 32% e uma separação de 0.7s. Outros benefícios obtidos estão relacionados a melhoramentos em segurança e a um processo de acoplamento entre os veículos realizado de forma mais suave. Os autores enfatizam que experimentos mais extensivos são necessários, especialmente no que diz respeito aos impactos no fluxo de tráfego quando considerada a existência ou não de faixas especiais dedicadas.

1.3.3.3 Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo

O Controle de Cruzeiro Adaptativo e Cooperativo (*Cooperative Adaptive Cruise Control - CACC*) [31] é uma extensão do *ACC* (ver 1.3.3.1) onde se adiciona a possibilidade de comunicação entre os veículos, provendo o sistema *ACC* com mais informações e de melhor qualidade sobre o veículo que está seguindo. As informações adicionais disponíveis podem incluir dados mais precisos sobre a velocidade, aceleração, avisos de falha e de perigos iminentes, capacidades máxima e atual de frenagem. Com informações desse tipo, o controlador *ACC* pode melhor se antecipar aos problemas. Torna-se possível, então, que o deslocamento do veículo se processe de maneira mais segura e suave, possuindo uma resposta mais rápida e,

conseqüentemente, permitindo uma maior proximidade para o veículo da frente (o intervalo de separação entre os veículos pode ser menor do que 0.5s). Com isso, o *CACC* tem o potencial de aumentar a capacidade do tráfego, pela diminuição da separação entre veículos consecutivos e melhorar a estabilidade. O melhoramento da eficiência do fluxo de tráfego depende largamente da quantidade de veículos que o utilizam.

Van Arem *et al*, em [31], realizam um dos primeiros estudos quantitativos, de como a vazão e a capacidade do fluxo de veículos pode ser afetada pela existência de veículos equipados com *CACC*. Chegou-se a conclusão que o *CACC* é capaz de melhorar as características do fluxo de tráfego. Quando menos de 40% dos veículos utilizam o sistema *CACC* não se obtém um efeito muito forte visível no fluxo de tráfego. Acima de 60%, verificam-se melhorias na estabilidade e na vazão do tráfego, principalmente em situações de alto volume, onde existem mais interações e mais veículos podem participar de um pelotão *CACC*.

1.3.3.4 Pelotão de Veículos

O fenômeno do Pelotão de Veículos reduz a separação entre os veículos, utilizando acoplamento eletrônico e possivelmente mecânico. Isso permite que vários carros acelerem ou freiem simultaneamente, aumentando a vazão do tráfego. Por motivos de segurança, ao se criar mecanismos de pelotões de veículos, tenta-se adotar pequenas distâncias intra-pelotão, para aumentar o acoplamento e a capacidade da pista, e altas distâncias inter-pelotões, pois, caso ocorra um acidente com algum pelotão de veículos, o que vier logo em seguida tenha possibilidade de parar completamente antes de colidir [26]. Karaanslan *et al*, em [16], descrevem o fenômeno do pelotão de veículos. No cenário explorado, o pelotão é liderado por um carro manualmente conduzido e os veículos seguintes estão sob um mecanismo de controle automático de espaçamento. Baseado em um determinado modelo de velocidade-

densidade, a capacidade de uma rodovia foi aumentada por um fator de quatro, para pelotões constituídos de 20 veículos. A Figura 1.2 mostra dois experimentos de pelotões de ônibus e carros completamente automatizados realizados com sucesso pelo *PATH Project* [29].

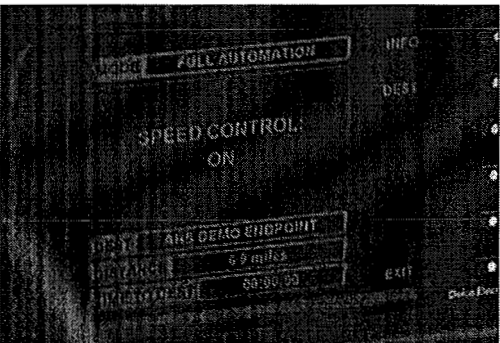
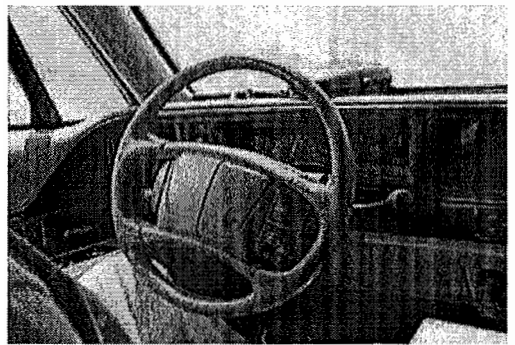
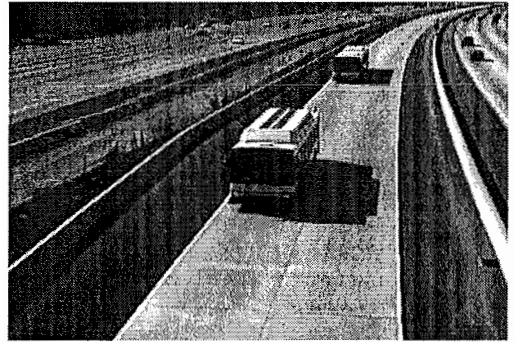
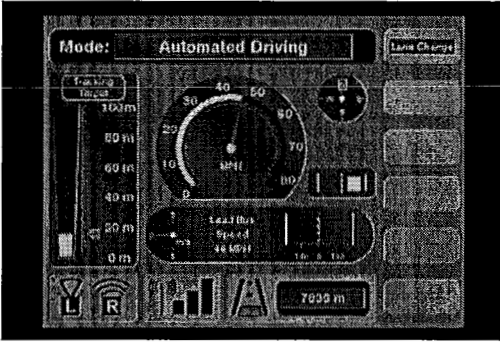


Figura 1.2: Pelotões de ônibus e carros realizado pelo *PATH Project*.

1.4 Estrutura do Trabalho

O restante dessa dissertação está organizada conforme descrito a seguir:

- O **Capítulo 2**, inicialmente, define os elementos básicos utilizados para se descrever um fluxo de tráfego. Depois, são descritos os modelos que permitem simular o comportamento dos veículos ao trafegar em uma via. Por fim, é apresentado uma introdução teórica do *SER* e suas generalizações.
- O **Capítulo 3** mostra como o *SER* foi utilizado para se modelar três cenários distintos em *ITS*: a sinalização, a coordenação de interseções (onda verde generalizada) e o deslocamento de veículos em linha reta.
- O **Capítulo 4** apresenta uma análise quantitativa restrita do impacto da utilização do mecanismo da onda verde generalizada no fluxo de tráfego.
- O **Capítulo 5**: apresenta conclusões e comentários finais sobre o trabalho realizado e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos

Esse capítulo aborda os conceitos teóricos mais relevantes para o desenvolvimento da presente dissertação. Na Seção 2.1, são descritos os elementos básicos utilizados para se descrever um fluxo de tráfego. Na Seção 2.2, são apresentados os Modelos de Perseguição Veicular, que permitem simular, com certo grau de realismo, o comportamento dos veículos ao trafegar em uma via. Será dado enfoque ao Intelligent Driver Model que foi o modelo utilizado nas simulações. Na Seção 2.3, é apresentado o Escalonamento por Reversão de Arestas (e suas generalizações) que foi a estratégia distribuída utilizada para realizar o controle da sinalização das interseções e do fluxo de tráfego. Na Seção 2.3.3, mostra-se, a título de exemplificação, como utilizar essa estratégia distribuída para modelar o comportamento de um pipeline simples de cinco estágios em arquitetura de computadores.

2.1 Elementos do Fluxo de Tráfego

O fluxo, a densidade e o *headway* são os três elementos básicos comumente utilizados para se descrever o tráfego de veículos [10]. Uma descrição breve destes elementos será apresentada a seguir:

- **Fluxo (q):** definido como o número de veículos que passam por um determinado ponto de uma via durante um dado intervalo de tempo. Fluxo é comumente expresso em veículos por hora (v/h). Um parâmetro importante para o fluxo é o valor de fluxo máximo (q_m) (capacidade de uma seção de uma via);
- **Densidade (k):** definida como sendo o número de veículos presente em uma unidade de comprimento de uma via em um dado instante de tempo. A densidade é tipicamente expressa em veículos por quilômetro (v/km). Existem dois parâmetros importantes para a densidade: a densidade de engarrafamento k_j e a densidade ótima k_0 . A densidade de engarrafamento k_j ocorre em condições extremas de congestionamento, onde o fluxo e a velocidade do tráfego dos veículos aproximam-se de zero. A densidade ótima k_0 ocorre em condições de fluxo máximo;
- **Headway:** definido como o intervalo de tempo ou a distância entre dois veículos. O tempo de *headway* h é definido como sendo o intervalo de tempo entre o instante em que um veículo passa por um determinado ponto de uma via e o momento que o veículo seguinte passa pelo mesmo ponto. O tempo de *headway* é tipicamente expresso em segundos. A distância de *headway* d é definido como a distância entre a frente de um veículo e a frente do veículo seguinte.

2.1.1 Relacionamento Fluxo-Densidade

Os três parâmetros básicos para o tráfego de veículos (fluxo, velocidade e densidade) estão relacionados entre si de acordo com a seguinte equação:

$$fluxo = velocidade \times densidade$$

$$q = uk. \quad (2.1)$$

Essa equação diz que o fluxo é igual ao produto da velocidade pela densidade. Por exemplo, se uma região de uma via de comprimento igual a 1 quilômetro contiver 10 veículos ($k = 10$), e a velocidade média dos 10 veículos for 50 km/h , depois de 1 hora, 500 veículos terão passado por essa região. Em outras palavras, o valor do fluxo q nesse caso é 500 v/h .

2.1.2 Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego

O relacionamento entre a densidade e o fluxo é geralmente denominado **diagrama fundamental**. As seguintes hipóteses podem ser feitas levando em consideração esse relacionamento:

1. Em um valor de densidade igual a 0 (por exemplo, não existem veículos trafegando na via), o fluxo será também igual a 0;
2. Inicialmente, quando a densidade cresce, o fluxo também cresce, visto que aumenta-se a quantidade de veículos trafegando na via;
3. Quando a densidade atingir seu valor máximo (por exemplo, a densidade de engarrafamento, k_j), o fluxo deve ser zero, visto que os veículos estão parados;
4. De **2** e **3** pode-se concluir que, a medida que a densidade cresce, o fluxo inicialmente também cresce, até atingir um valor máximo q_m . Aumentos adicionais na densidade irão levar a uma redução do fluxo, o que eventualmente vai se tornar zero quando a densidade atingir a densidade de engarrafamento.

Esse relacionamento entre o fluxo e a densidade toma a forma geral mostrada na Figura 2.1. A velocidade u em um dado ponto pode ser representada pela inclinação da linha radial que vai da origem até o ponto onde se deseja calcular a velocidade.

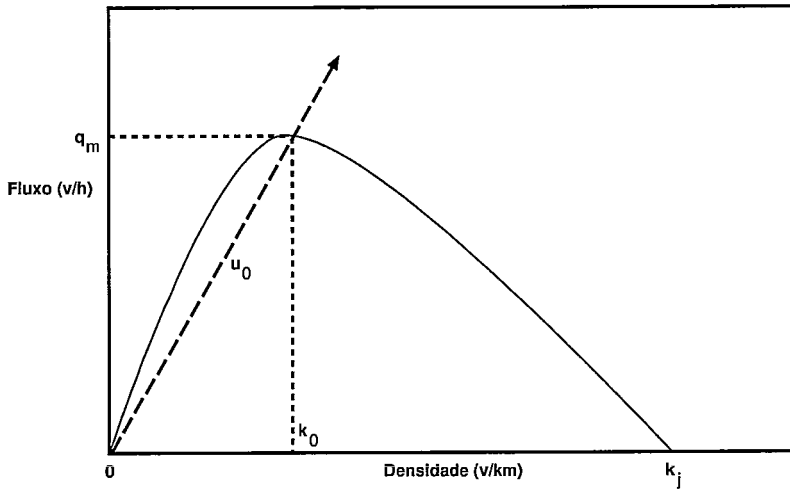


Figura 2.1: Relação entre fluxo e densidade: o diagrama fundamental.

2.2 Modelos de Perseguição Veicular

Há aproximadamente cinquenta anos, pesquisadores tentam modelar o tráfego de veículos em uma via através de modelos microscópicos contínuos no tempo, os chamados **Modelos de Perseguição Veicular** (*Car-Following Models*) [28] [22]. Todos os modelos têm em comum o fato de que tentam descrever a dinâmica de movimentação dos veículos, representada pela determinação de sua posição (x_α) e velocidade (v_α), através de um conjunto de equações diferenciais ordinárias. Nesses modelos, assume-se que os estímulos de entrada para os motoristas são:

- A sua própria velocidade (v_α);
- A distância do veículo da frente ($s_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1}$, onde $x_{\alpha-1}$ é a posição e $l_{\alpha-1}$ é o comprimento do veículo da frente);
- A velocidade do veículo da frente ($v_{\alpha-1}$).

Na Figura 2.2 tem-se uma representação dos estímulos de entrada dos modelos de perseguição veicular.

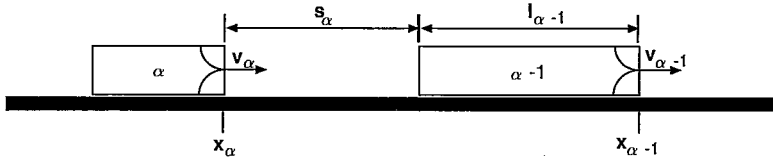


Figura 2.2: Representação dos estímulos de entrada dos modelos de perseguição veicular.

A equação de movimento de cada veículo pode ser caracterizada por uma função aceleração $\ddot{x}_\alpha(t)$ (os dois pontos em cima do x indica a derivada segunda) que depende dos estímulos de entrada e é definida como segue

$$\ddot{x}_\alpha(t) = \dot{v}_\alpha(t) = F(v_\alpha(t), s_\alpha(t), v_{\alpha-1}(t)). \quad (2.2)$$

Em geral, o comportamento de um motorista (α) possivelmente não depende apenas do veículo imediatamente à frente ($\alpha - 1$), mas sim, dos n_α veículos à frente. Obtém-se, então, uma equação de movimento em uma forma mais generalizada

$$\ddot{x}_\alpha(t) = \dot{v}_\alpha(t) = F(x_\alpha(t), v_\alpha(t), x_{\alpha-1}(t), v_{\alpha-1}(t), \dots, x_{\alpha-n_\alpha}(t), v_{\alpha-n_\alpha}(t)) \quad (2.3)$$

2.2.1 *Intelligent Driver Model*

A dinâmica do *Intelligent Driver Model* [28] pode ser descrita pelas duas equações diferenciais ordinárias mostradas abaixo

$$\dot{x}_\alpha = v_\alpha \quad (2.4)$$

$$v_\alpha = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right], \quad (2.5)$$

onde

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + Tv + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}. \quad (2.6)$$

Esse modelo possui uma característica agradável que é o fato de que todos os parâmetros possuem um significado bem intuitivo. A descrição dos parâmetros é apresentada a seguir:

- a : aceleração habitual para um veículo;
- v_0 : velocidade desejada que o veículo obteria em uma situação de tráfego livre (velocidade absoluta máxima que é obtida quando o fluxo de tráfego aproxima-se de zero);
- δ : expoente de aceleração (indica como a aceleração diminui quando se aproxima da velocidade desejada);
- s^* : distância dinâmica desejada do veículo da frente;
- s_0 : menor distância para o veículo da frente (deve ser mantida mesmo em uma situação de engarrafamento onde o tráfego esteja parado);
- T : intervalo de tempo de segurança do veículo da frente (diferença no tempo entre o momento em que um veículo passa por um determinado ponto na via e o momento em que o veículo seguinte passa pelo mesmo ponto);
- b : desaceleração de freada confortável.

2.2.1.1 Propriedades Dinâmicas

A aceleração do veículo, conforme mostrada na Equação 2.5, pode ser interpretada como sendo constituída de dois termos distintos: um termo que representa o deslocamento em uma via livre (termo que proporciona as acelerações, $s_\alpha \rightarrow \infty$)

$$v_\alpha^{livre} = a \left(1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta \right), \quad (2.7)$$

e outro termo que representa a interação com o veículo da frente (termo que proporciona as desacelerações)

$$v_\alpha^{interacao} = -a \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2. \quad (2.8)$$

Em uma via livre, a distância para o veículo da frente é grande ($s_\alpha \rightarrow \infty$) e a aceleração do veículo é dominada pelo termo v_α^{livre} (Equação 2.7), que é aproximadamente igual a a para velocidades baixas, e desaparece quando v_α se torna igual a v_0 (o veículo atingiu a velocidade desejada). Com isso, um veículo em uma via livre, irá assintoticamente alcançar a velocidade desejada v_0 .

O termo que representa a interação com o veículo da frente (Equação 2.8), é baseado na comparação entre a distância dinâmica desejada s^* e a distância atual s para o veículo da frente. Uma situação que pode ser exemplificada é quando a distância atual for aproximadamente igual a s^* e para uma situação de tráfego homogêneo e congestionado, o termo de interação compensa o termo de via livre e a aceleração resultante é aproximadamente zero. De maneira geral, pode-se dizer que s^* aumenta dinamicamente quando se aproxima de veículos mais lentos e diminui quando o veículo da frente for mais rápido.

Como consequência, a desaceleração imposta aumenta com:

- a diminuição da distância para o veículo da frente (o veículo quer manter uma certa “distância de segurança”);
- o aumento da própria velocidade (a distância de segurança aumenta);
- uma grande diferença de velocidade para o veículo da frente.

2.2.1.2 Modelando Veículos e Perfis de Motoristas Distintos

Ao se variar os parâmetros do *Intelligent Driver Model*, diferentes tipos de veículos (carros, caminhões, etc) e perfis de motoristas distintos (cautelosos, agressivos, etc) podem ser simulados [27]. Na Tabela 2.1 pode-se ver os parâmetros típicos para um carro padrão [28].

Tabela 2.1: Valores típicos dos parâmetros do *Intelligent Driver Model* para um carro padrão.

Parâmetro	Valor Típico
Velocidade desejada v_0	120 km/h
Intervalo de tempo de segurança T	1.6 s
Aceleração máxima a	0.73 m/s ²
Desaceleração desejada b	1.67 m/s ²
Expoente de aceleração δ	4
Distância Mínima s_0	2 m
Comprimento do Veículo l	5 m

Caso queira-se modelar um caminhão, por exemplo, basta fornecer valores mais baixos para os parâmetros v_0 , a e b e aumentar o comprimento do veículo l (por exemplo, $v_0 = 80$ km/h , $a = 0.53$ m/s², $b = 1.37$ m/s² e $l = 15$ m). Motoristas mais cautelosos dirigem com um valor do tempo de segurança do veículo da frente T mais alto (por exemplo, $T = 2.5$ s). Motoristas agressivos são caracterizados por

um valor pequeno para T e valores altos para v_0 , a e b (e.g., $T = 1$ s, $v_0 = 150$ km/h, $a = 0.93$ m/s² e $b = 1.87$ m/s²).

2.3 O Escalonamento por Reversão de Arestas

2.3.1 Conceitos

O Escalonamento por Reversão de Arestas (*Scheduling by Edge Reversal - SER*) é um mecanismo de escalonamento totalmente distribuído, baseado na manipulação de orientações acíclicas de um grafo orientado $G = (N, E)$, onde N é o conjunto de nós (cada nó representa um processo), e E é o conjunto de arestas direcionadas do grafo [5]. Sabe-se que dois nós do grafo são conectados por uma aresta se, e somente se, os processos compartilham ao menos um recurso. A direção da aresta representa a prioridade da utilização dos recursos compartilhados. Os nós que possuem todas as suas arestas direcionadas para si próprios, chamados **sumidouros**, representam os processos habilitados a operar sobre os recursos.

A utilização típica do *SER* é em sistemas que operam em **alta carga**, onde se deve garantir **exclusão mútua** ao acesso dos processos aos recursos compartilhados. A alta carga está relacionada ao fato de que, nesse tipo de sistema, os processos estão continuamente exigindo acesso a um subconjunto de recursos para poder operar. A exclusão mútua está relacionada ao fato de que um recurso só pode ser usado por um único processo por vez.

Pode-se descrever o modo de operação do *SER* da seguinte maneira:

1. Inicialmente, deve-se orientar aciclicamente o grafo;
2. Somente os nós que são sumidouros podem operar sobre os recursos compartilhados enquanto os outros nós permanecem em espera;

3. Depois de operar sobre os recursos compartilhados, os sumidouros reverterem suas arestas, dando prioridade aos vizinhos operarem sobre eles.

Nesse tipo de sistema, **concorrência**, **bloqueio perpétuo** e **fome** são as principais preocupações ao se criar estratégias de escalonamento. Na grande maioria dos casos, deve-se tentar maximizar a concorrência, enquanto se deve evitar a existência de bloqueio perpétuo e fome.

O *SER* apresenta várias propriedades interessantes e algumas delas garantem, justamente, a ausência de bloqueio perpétuo e fome. Serão apresentadas aqui algumas das propriedades do *SER* que são as mais relevantes para o presente trabalho (para uma lista completa das propriedades, bem como suas respectivas provas, consultar o trabalho original de Barbosa [5]):

- **Propriedade 1:** a operação de reversão de arestas, a partir de uma orientação acíclica inicial, produz, necessariamente, uma outra orientação acíclica;
- **Propriedade 2:** supondo um grafo G finito, é intuitivo dizer que, eventualmente, um conjunto de orientações acíclicas irá se repetir definindo um **período** de comprimento p ;
- **Propriedade 3:** o número de vezes que um nó é sumidouro (m) em um período (p) é a mesma para todos os nós.

Esta dinâmica simples garante que nenhum bloqueio perpétuo ou fome irão ocorrer pois, em cada orientação acíclica existirá ao menos um sumidouro e, todos os nós operam nesta dinâmica.

Por fim, na Figura 2.3, pode-se ver um exemplo da dinâmica de reversão de arestas do *SER*. Note que, para este caso, a orientação acíclica inicial adotada não faz parte do período e que cada nó é sumidouro exatamente duas vezes ($m = 2$) em um período de cinco orientações ($p = 5$).

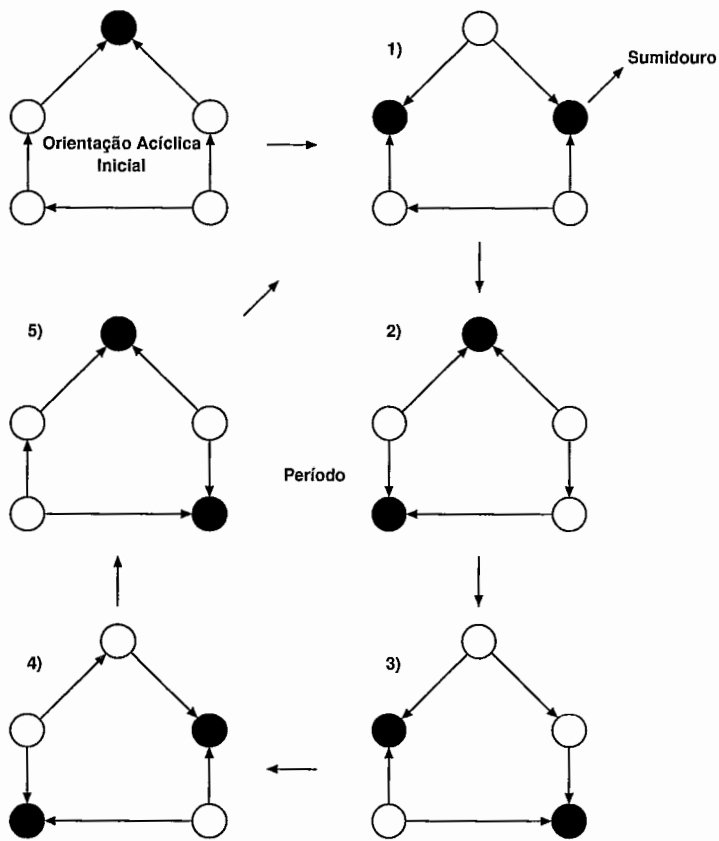


Figura 2.3: Exemplo da dinâmica do *SER* ($m = 2$, $p = 5$).

2.3.2 Generalizações do *SER*

Será apresentada aqui uma breve introdução sobre duas generalizações do *SER*. A primeira a ser apresentada é o Escalonamento por Reversão de Arestas Múltiplas (*Scheduling by Multiple Edge Reversal - SMER*) [7] que é uma generalização do *SER* para execuções em alta carga com a condição que os processos acessam os recursos com frequências relativas pré-determinadas. A segunda é o Escalonamento por Reversão de Arestas com Hibernação (*Scheduling by Edge Reversal with Hibernation - SER^H*) [11] [8] que combina o comportamento do *SER* para execuções em alta carga com a possibilidade que um nó se desligue do sistema (estado de hibernação), até que um outro nó, que ainda esteja operando, acorde para re-entrar no modo de operação em alta carga.

2.3.2.1 Escalonamento por Reversão de Arestas Múltiplas

No *SMER*, associado a cada processo P_i existe um número inteiro $r_i > 0$ usado para controlar a evolução da dinâmica das prioridades do grafo G . Esse número deve ser designado de uma maneira tal que, a medida que a computação progrida, para dois quaisquer vizinhos P_i e P_j em G , a razão entre o número de vezes que P_i tem prioridade sobre P_j e o número de vezes que P_j tem prioridade sobre P_i convirja para r_j/r_i . O *SER* é um caso particular do *SMER* onde todos os processos possuem um mesmo valor para r_i , de modo que a razão r_j/r_i será sempre 1, com isso nenhum processo terá prioridade sobre o outro.

Esse tipo de computação com esse controle generalizado de prioridades pode ser chamada de *computação por reversão de fichas* [4], essa denominação vem de uma interpretação das arestas de G como sendo bastões onde fichas podem se mover pra frente e pra trás, como em um ábaco. Para que P_i tenha prioridade sobre P_j , devem existir ao menos r_i fichas no lado de P_i e uma quantidade menor que r_j fichas no lado de P_j . Quando isso acontece, a mudança de prioridade é realizada movendo r_i

fichas de P_i em direção a P_j .

Em uma computação por reversão de fichas, a regra de funcionamento para o processo P_i é a seguinte: uma vez terminado de usar os recursos compartilhados, enviar r_i fichas para o outro lado de todas as arestas associadas a P_i (para um nó operar sabe-se que ele deve ter prioridade sobre todos os seus vizinhos).

Pode-se, também, criar uma orientação para as arestas do grafo G da seguinte forma: uma aresta está orientada para P_i , se e somente se, existirem r_i fichas no lado de P_i da aresta. Para satisfazer as restrições de que uma aresta possa estar orientada para qualquer uma das direções e que só possa estar orientada para exatamente uma direção por vez, a restrição $\max\{r_i, r_j\} \leq e_{ij} \leq r_i + r_j - 1$ deve ser satisfeita (e_{ij} é o número de fichas na aresta que liga P_i a P_j).

A Figura 2.4 mostra um exemplo de execução para o *SMER* (são mostradas apenas algumas orientações iniciais). Para o exemplo em questão, tem-se: $r_1 = 1$, $r_2 = 2$ e $r_3 = 3$.

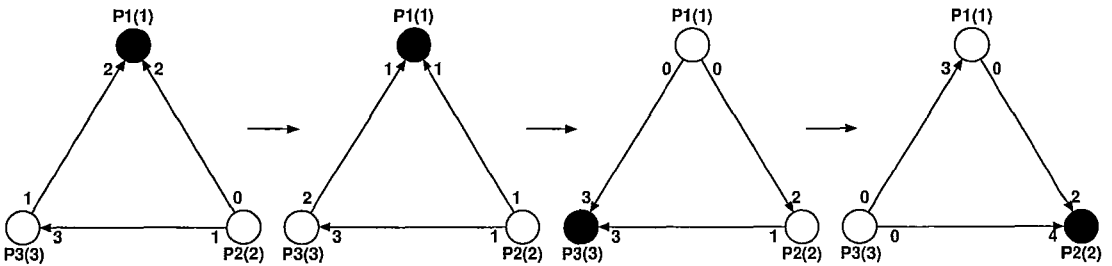


Figura 2.4: Exemplo da dinâmica do *SMER*.

Outros detalhes do funcionamento do *SMER*, bem como sua descrição formal, podem ser vistos em [15].

2.3.2.2 Escalonamento por Reversão de Arestas com Hibernação

No SER^H , analogamente ao SER , a existência de um canal de comunicação entre dois processos implica no compartilhamento de ao menos um recurso entre eles. Diferentemente do SER , no funcionamento do SER^H cada canal de comunicação é controlado por um par de permissões, denominadas \bullet e \circ . Mais uma vez, como no SER , os pares devem estar distribuídos de maneira a se criar uma orientação acíclica inicial no grafo, conforme pode ser visto na Figura 2.5 (a).

No SER^H , um nó sumidouro é aquele que possui todas as permissões \bullet (denominado de \bullet -sumidouro). Adicionalmente, a reversão das permissões \bullet através de uma aresta só ocorre se o nó possuir as permissões \circ para a mesma aresta. Esse comportamento distinto foi introduzido para implementar o estado de **hibernação**.

Na Figura 2.5 (b), uma vez que alguns dos nós sumidouros terminaram de operar sobre os recursos compartilhados, eles revertem suas arestas (na transição de (a) para (b) apenas os nós a , b e e terminaram de operar sobre os recursos compartilhados; os nós k , l e h continuam operando, por isso, não reverteram ainda suas arestas).

Na Figura 2.5 (c), o nó f decide entrar no estado de hibernação; neste caso, ele reverte apenas as permissões \bullet para os seus vizinhos, mantendo as permissões \circ . Os nós c , d , e , h , k e l são \bullet -sumidouros e podem operar sobre os recursos compartilhados.

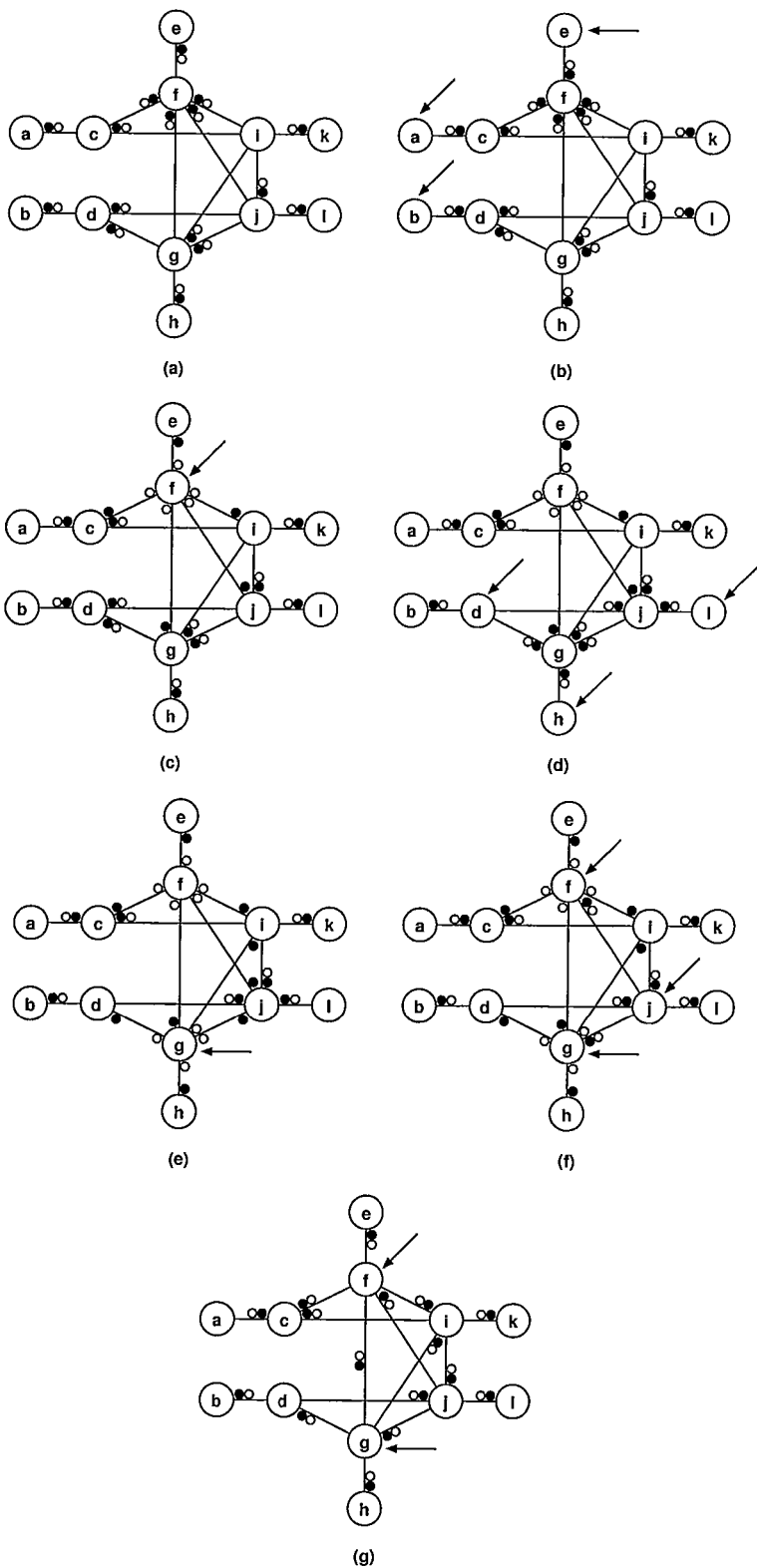
Na Figura 2.5 (d), os nós d , h e l terminaram de operar sobre os recursos compartilhados e reverteram suas permissões.

Na Figura 2.5 (e), o nó g , ao terminar de operar sobre os recursos compartilhados, decide entrar em estado de hibernação, revertendo todas as suas permissões \bullet para os nós vizinhos. Ele apenas não reverte para o nó f porque não possui a correspondente permissão \circ para essa aresta (o nó f está hibernando, e, com isso, não está exigindo acesso aos recursos compartilhados).

Na Figura 2.5 (f), o nó j decide acordar os nós f e g que estavam hibernando (quando um \bullet -sumidouro decide acordar um vizinho, reverte todas as permissões \bullet para o vizinho hibernando).

Na Figura 2.5 (g), os nós f e g ao serem acordados revertem todas as permissões \circ para seus vizinhos, com excessão de j .

Outros detalhes do funcionamento do SER^H (por exemplo, a situação mostrada na Figura 2.5 (g) onde as permissões se movem em sentidos opostos ao longo da aresta que liga f e g) bem como descrição formal do SER^H podem ser vistos no trabalho original de Carvalho [11].



34
 Figura 2.5: Exemplo da dinâmica do SER^H .

2.3.3 Modelagem Usando *SER*: um *Pipeline* de Cinco Estágios em Arquitetura de Computadores

Será mostrado aqui como o *SER* pode ser utilizado para modelar um *pipeline* simples de cinco estágios. A justificativa de se utilizar um exemplo na área de Arquitetura de Computadores, aparentemente tão diversa da área de Sistemas Inteligentes de Transporte, foco da presente dissertação, deve-se primordialmente por dois fatores: (i) mostrar a potencialidade do *SER* ao modelar sistemas em diversas campos do conhecimento e (ii) pelo fato de que essa modelagem inspirou a criação do sistema que controla o deslocamento de veículos em linha reta em uma via, mostrada na Seção 3.3.

Descrição

Em Arquitetura de Computadores, o *pipeline* [21] [12] é uma técnica que permite que múltiplas instruções tenham suas execuções sobrepostas, acelerando o processamento total. Em um *pipeline*, um conjunto de elementos de processamento de dados (estágios) estão conectados em série (a saída de um elemento é a entrada do próximo) e, entre esses estágios, existem registradores (*buffers*) de modo que o resultado do processamento de um estágio esteja disponível para o estágio seguinte como entrada para realizar suas computações.

Na Figura 2.6 pode-se ver a representação de um *pipeline* simples de cinco estágios: *MEM1*, *REG1*, *ULA*, *MEM2* e *REG2*; e cinco registradores: *IF/ID*, *ID/EX*, *EX/MEM*, *MEM/WB*.

De um maneira bem genérica, pode-se dividir o comportamento de cada estágio (com exceção do primeiro e último estágios) em duas etapas bem distintas e realizadas sequencialmente:

1. Ler um valor do registrador anterior ao estágio e realizar computação utilizando esse valor;

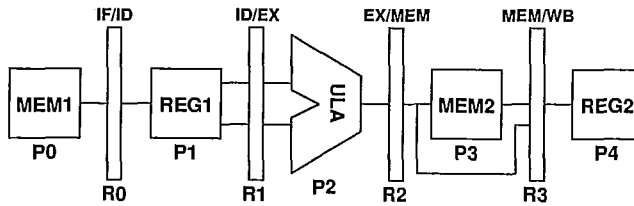


Figura 2.6: *Pipeline* simples de cinco estágios em arquitetura de computadores.

2. Gravar o resultado da computação no registrador seguinte.

Duas restrições adicionais devem ser satisfeitas em relação ao funcionamento do *pipeline*, que são:

- **Restrição 1:** um estágio não pode estar lendo e escrevendo nos seus dois registradores vizinhos simultaneamente;
- **Restrição 2:** um estágio só pode escrever o resultado de sua computação no registrador seguinte, apenas quando o próximo estágio já tenha escrito o seu valor.

Modelo *SER*

O primeiro passo a ser realizado para se obter o modelo *SER* para o *pipeline* é identificar e definir quais são os processos e os recursos compartilhados:

- **Processos:** é o englobamento de todas as etapas realizadas por cada estágio. Tem-se, então, para o exemplo em questão, cinco processos, nomeados: **P0** (relacionado ao estágio *MEM1*), **P1** (relacionado ao estágio *REG1*), **P2** (relacionado ao estágio *ULA*), **P3** (relacionado ao estágio *MEM2*) e **P4** (relacionado ao estágio *REG2*);
- **Recursos:** são os registradores localizados entre os estágios. Tem-se, então, para o exemplo em questão, quatro recursos, nomeados: **R0** (relacionado ao

registrador *IF/ID*), **R1** (relacionado ao registrador *ID/EX*), **R2** (relacionado ao registrador *EX/MEM*) e **R3** (relacionado ao registrador *MEM/WB*).

Reparar que o sistema descrito acima se adequa perfeitamente a categoria de sistemas que em que se justifica realizar uma modelagem usando o *SER*, pois, apresenta as seguintes características:

- **Opera em alta carga:** uma vez o *pipeline* estando cheio, os estágios estão continuamente realizando as tarefas relacionadas ao seu funcionamento;
- **Garantia de exclusão mútua:** dois estágios não podem estar escrevendo e lendo um dado de um mesmo registrador simultaneamente.

Cada processo não pode executar simultaneamente as duas etapas relativas ao seu funcionamento. Com essa restrição, obtém-se um comportamento para os processos semelhante ao da função booleana OU-EXCLUSIVO, onde cada componente da expressão booleana delimitado por um “ou” lógico (+) é chamado de **mintermo**. Utilizando essa análise, podem ser derivadas equações booleanas que descrevem o comportamento dos processos:

$$P_0 = R_0,$$

$$P_1 = R_0 \oplus R_1 = R_0\overline{R_1} + \overline{R_0}R_1,$$

$$P_2 = R_1 \oplus R_2 = R_1\overline{R_2} + \overline{R_1}R_2,$$

$$P_3 = R_2 \oplus R_3 = R_2\overline{R_3} + \overline{R_2}R_3,$$

$$P_4 = R_3$$

Nas equações booleanas mostradas acima, o processo P_0 possui apenas o mintermo R_0 ; o processo P_1 possui os mintermos $R_0\overline{R_1}$ e $\overline{R_0}R_1$; o processo P_2 possui os mintermos $R_1\overline{R_2}$ e $\overline{R_1}R_2$; o processo P_3 possui os mintermos $R_2\overline{R_3}$ e $\overline{R_2}R_3$ e finalmente o processo P_4 possui apenas o mintermo R_3 .

Posteriormente, deve-se atribuir uma orientação acíclica inicial para o grafo. Uma boa abordagem para esse caso seria adotar uma orientação de modo que o grafo estivesse “esperando” para a primeira instrução entrar no *pipeline* através de P_1 . O grafo com essa orientação acíclica pode ser vista na Figura 2.7. As arestas marcadas com * existem para que a Restrição 2 seja satisfeita.

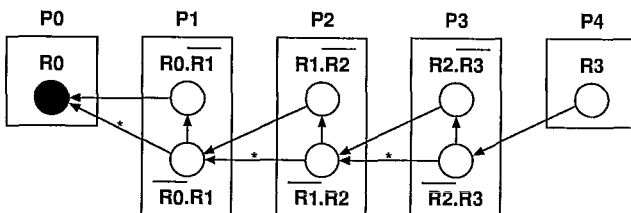


Figura 2.7: Grafo de restrições para um *pipeline* de cinco estágios.

Capítulo 3

Controle Distribuído e o *SER* em Sistemas Inteligentes de Transportes

*Esse capítulo mostra como o *SER* foi utilizado para se modelar três cenários distintos em Sistemas Inteligentes de Transporte. Na **Seção 3.1**, é apresentado como ele pode ser utilizado para a criação de um mecanismo de sinalização de interseções. Na **Seção 3.2**, mostra-se como o conceito apresentado na seção anterior pode ser estendido para sincronizar o funcionamento de dois ou mais sinais de trânsito, generalizando o conhecido paradigma da onda verde. Na **Seção 3.3**, mostra-se como o deslocamento de veículos em linha reta pode ser modelado como um pipeline assíncrono.*

3.1 Sinalização de Interseções como Compartilhamento de Recursos

Nessa seção será apresentado como o *SER* pode ser utilizado na criação de um mecanismo para a sinalização de interseções, permitindo o tráfego concorrente de

veículos pelas diversas regiões que constituem a interseção. Para tal, serão apresentados três cenários distintos: no primeiro, será apresentada uma interseção mais simples conectada a vias de uma faixa; em seguida, será apresentada uma interseção mais complexa conectada a vias de duas faixas; por fim, será mostrado como o mesmo raciocínio pode ser expandido, para levar em consideração o tráfego de veículos e pedestres e diferentes geometrias.

Para cada caso, será apresentado inicialmente um diagrama esquemático mostrando a interseção e suas vias conectadas. No diagrama, as setas ao lado das vias representam o sentido permitido do tráfego de veículos na via e os termos nomeados (a), (b), (c) e (d) foram utilizados como acessórios para descrever a movimentação permitida dos veículos. E, em seguida, as seguintes propriedades relativas às interseções serão detalhadas:

- **Fluxos de Entrada-Saída (FES_i):** indicam algumas possíveis rotas que um veículo poderá seguir ao cruzar uma interseção;
- **Compartilhamento:** indica como diferentes fluxos de entrada-saída compartilham diferentes regiões da interseção. A notação a ser utilizada será a seguinte: o conjunto de fluxos de entrada-saída será denominado $F = \{FES_0, \dots, FES_n\}$ e o conjunto de regiões será denominado $\Gamma = \{I_0, \dots, I_m\}$. Para cada $FES_i \in F$, $\Gamma_i \subseteq \Gamma$ é o conjunto de regiões das quais um FES_i necessita para poder operar. Similarmente, para $I_p \subseteq \Gamma$, $F_p \subseteq F$ é o conjunto de fluxos de entrada-saída que pode exigir acesso a I_p . Pode-se denominar, também, $\Gamma_{ij} = \Gamma_i \cap \Gamma_j$ para $1 \leq i, j \leq n$, e $F_{pq} = F_p \cap F_q$ para $1 \leq p, q \leq m$.

Nas situações que serão apresentadas, diferentes fluxos de entrada-saída podem competir entre si por uma ou mais regiões que constituem a interseção. Esse cenário força que, em situações em que haja conflito, sejam adotadas políticas de escalonamento dos recursos compartilhados, no caso, utilizando o *SER*. Para isso, cada fluxo

de entrada-saída FES_i estará associado a um processo P_i , e as diferentes regiões I_i que constituem as interseções (consideradas individualmente ou agrupadas) estarão associadas aos recursos, como segue:

- R_i : situação em que um recurso está associado a uma única região;
- R'_i : um recurso é o resultado do agrupamento de diferentes regiões ¹.

A dinâmica de compartilhamento dos recursos pelos processos será mais uma vez representada por um conjunto de expressões booleanas, e por um grafo de restrições G , onde, estará presente para cada processo, os mintermos presentes nas expressões booleanas. Dois mintermos, pertencentes a dois processos distintos, estarão conectados por uma aresta sempre que compartilham uma ou mais regiões, ou seja, $\Gamma_{ij} \neq \emptyset$. Ao final de cada cenário será mostrado um exemplo de algumas possíveis situações para a evolução da dinâmica do grafo de restrições, explicitando, de acordo com a orientação corrente deste grafo, quais FES_i , total ou parcialmente, estarão ativos naquele momento. A dinâmica mostrada é apenas um possível exemplo de como o sistema pode evoluir. O seu comportamento pode variar de acordo com a orientação acíclica inicial para o grafo de restrições e o tempo de sumidouro associado a cada mintermo.

A descrição da dinâmica de G e de como ela pode ser utilizada, para se criar um mecanismo para a sinalização das interseções, pode ser descrita em linhas gerais da seguinte forma: cada mintermo presente no grafo de restrições está associado ao funcionamento de um sinal de trânsito, que, por sua vez, irá sinalizar a permissão do tráfego de veículos ou pedestres pelas regiões associadas a este mintermo. Um mintermo sumidouro (podendo ficar neste estado quanto tempo considerar necessário) indica que o sinal associado a ele tem a permissão de uso das suas regiões. Essa

¹Em algumas situações, como na Interseção Complexa 3.1.2, caso tenha sido definido apenas que cada recurso esteja associado a uma única região, levaria a simplificações da expressão booleana que gerariam falsas interpretações da dinâmica do sistema.

permissão de uso pode ser dividida em fases que indicarão o funcionamento do sinal. No instante em que um mintermo se tornar sumidouro, o sinal verde será ativado, permitindo o tráfego de veículos pelas regiões referentes àquele mintermo. Depois de decorrido o tempo referente ao sinal verde, será ativado o sinal amarelo. Posteriormente, ao final do sinal amarelo, o sinal ficará vermelho. Porém, o mintermo apenas irá reverter suas arestas, dando prioridade aos mintermos vizinhos, depois que o último veículo tenha cruzado completamente a interseção. A reversão das arestas pode ser interpretada como mensagens enviadas entre os diferentes componentes do sistema, dando a prioridade para a utilização dos recursos compartilhados e o conseqüente início de sua operação.

3.1.1 Interseção Simples

A Figura 3.1 mostra uma interseção simples conectada a quatro vias de uma faixa. Essa interseção foi considerada como sendo constituída apenas por uma região (I_0) e dois fluxos de entrada e saída distintos (FES_0 e FES_1) que compartilham I_0 :

- FES_0 : os veículos provenientes de (a) podem seguir em frente, em direção a (c), ou virar a direita, seguindo em direção a (d);
- FES_1 : os veículos provenientes de (b) podem seguir em frente, em direção a (d), ou virar a esquerda, seguindo em direção a (c).

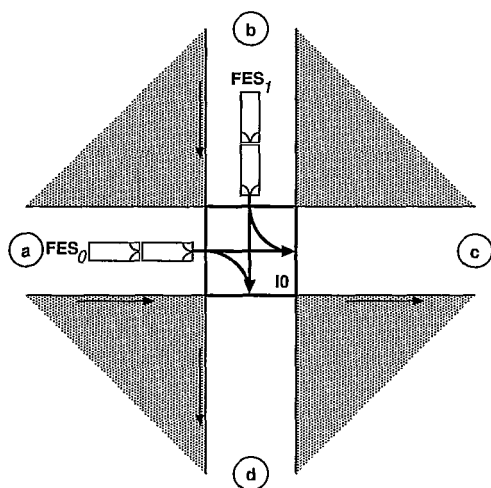


Figura 3.1: Interseção simples.

Tabela 3.1: Compartilhamento da interseção simples.

$F = \{FES_0, FES_1\}$	$I = \{I_0\}$
$F_0 = \{FES_0, FES_1\}$	$\Gamma_0 = \{I_0\}$
	$\Gamma_1 = \{I_0\}$
	$\Gamma_{01} = \{I_0\}$

3.1.1.1 Modelo *SER*

Designação de Processos e Recursos

$$P_0 = FES_0 \quad R_0 = I_0$$

$$P_1 = FES_1$$

Expressões Booleanas

$$P_0 = R_0$$

$$P_1 = R_0$$

Grafo de Restrições

O grafo de restrições para essa situação, com uma determinada orientação acíclica inicial, pode ser visto na Figura 3.2.

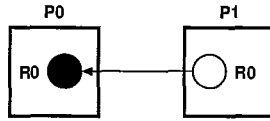


Figura 3.2: Grafo de restrições da interseção simples.

3.1.1.2 Dinâmica

Situação 1: O mintermo R_0 de P_0 é sumidouro, de modo que FES_0 pode estar ativo. Uma vez terminado o tempo de sumidouro associado ao mintermo R_0 e, depois que todos os veículos tiverem deixado a interseção, esse mintermo irá reverter sua aresta. Essa situação está apresentada na Figura 3.3.

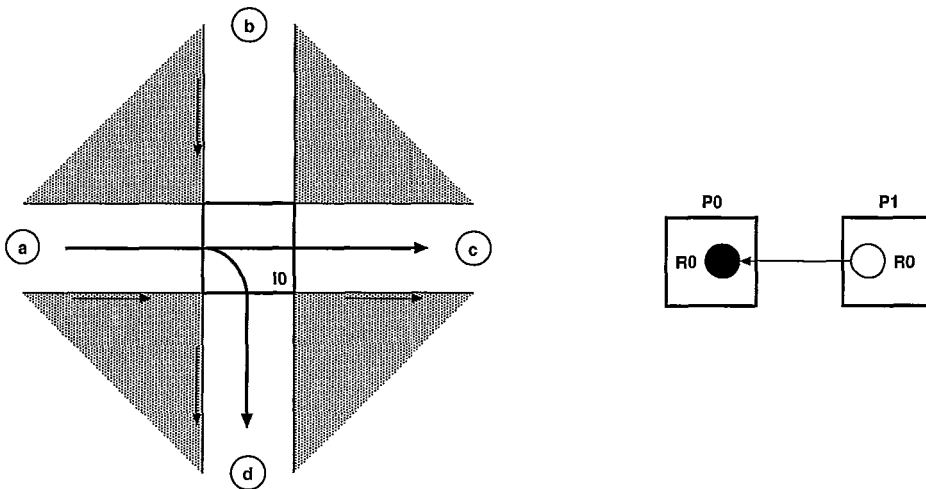


Figura 3.3: Situação 1 da dinâmica *SER* da interseção simples.

Situação 2: Agora o mintermo R_0 de P_1 é sumidouro, de modo que FES_1 pode estar ativo. Quando este mintermo reverter sua aresta, voltar-se-á para a primeira

situação, repetindo o ciclo. Essa situação está apresentada na Figura 3.4.

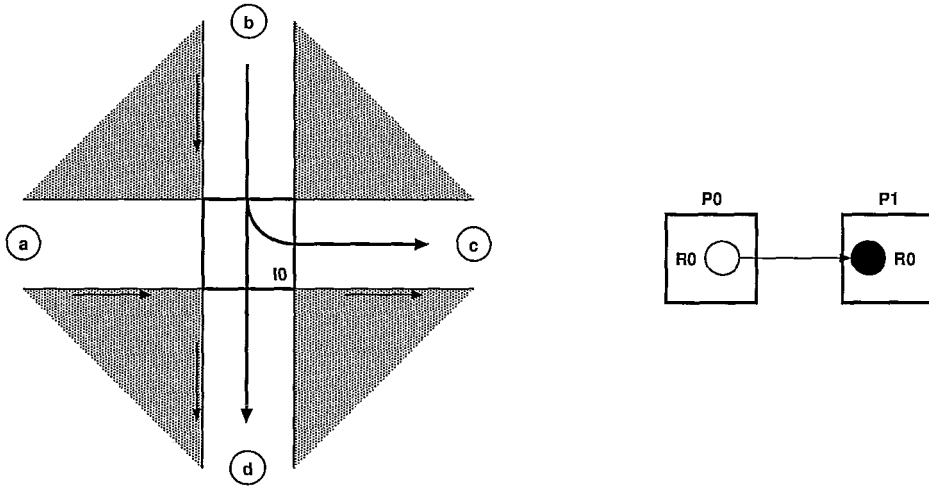


Figura 3.4: Situação 2 da dinâmica *SER* da interseção simples.

3.1.2 Interseção Complexa

A Figura 3.5 mostra uma interseção conectada a vias de duas faixas. Essa interseção possui quatro regiões (I_0 , I_1 , I_2 e I_3) e quatro fluxos de entrada-saída distintos (FES_0 , FES_1 , FES_2 e FES_3)²:

- FES_0 : um veículo proveniente de (a) pode virar a direita, seguindo em direção a (d), (cruzando a região I_2) ou pode seguir em frente, em direção a (c) (cruzamento seqüencialmente as regiões I_2 e I_3);
- FES_1 : um veículo proveniente de (b) pode virar a direita, seguindo em direção a (a), (cruzando a região I_0) ou pode seguir em frente, em direção a (d) (cruzando seqüencialmente as regiões I_0 e I_2);

²Poderiam ter sido definidas outras possibilidades de destino para os fluxos de entrada-saída, ainda obedecendo o sentido permitido para o tráfego nas vias, por exemplo, FES_0 poderia virar a esquerda seguindo em direção a (b), cruzando seqüencialmente as regiões I_2 , I_3 e I_1 .

- **FES₂**: um veículo proveniente de (c) pode virar a direita, seguindo em direção a (b), (cruzando a região I_1) ou pode seguir em frente, em direção a (a) (cruzamento seqüencialmente as regiões I_1 e I_0).
- **FES₃**: um veículo proveniente de (d) pode virar a direita, seguindo em direção a (c), (cruzando a região I_3) ou pode seguir em frente, em direção a (b) (cruzamento seqüencialmente as regiões I_3 e I_1).

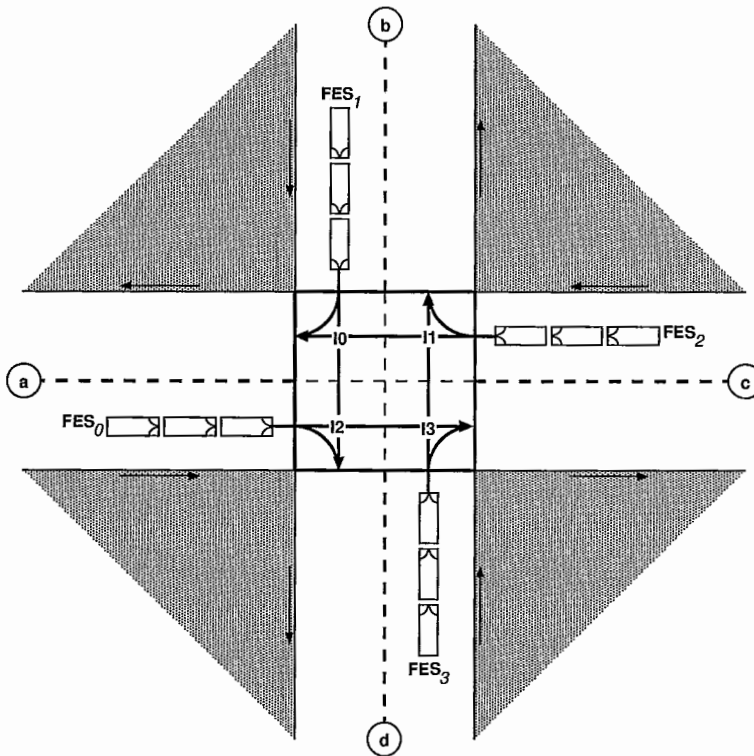


Figura 3.5: Interseção complexa.

Tabela 3.2: Compartilhamento da interseção complexa.

$F = \{FES_0, FES_1, FES_2, FES_3\}$	$I = \{I_0, I_1, I_2, I_3\}$
$F_0 = \{FES_1, FES_2\}$	$\Gamma_0 = \{I_2, I_3\}$
$F_1 = \{FES_2, FES_3\}$	$\Gamma_1 = \{I_0, I_2\}$
$F_2 = \{FES_0, FES_1\}$	$\Gamma_2 = \{I_0, I_1\}$
$F_3 = \{FES_0, FES_3\}$	$\Gamma_3 = \{I_1, I_3\}$
$F_{01} = \{FES_2\}$	$\Gamma_{01} = \{I_2\}$
$F_{02} = \{FES_1\}$	$\Gamma_{03} = \{I_3\}$
$F_{13} = \{FES_3\}$	$\Gamma_{12} = \{I_0\}$
$F_{23} = \{FES_0\}$	$\Gamma_{23} = \{I_1\}$

3.1.2.1 Modelo *SER*

Designação de Processos e Recursos

$$P_0 = FES_0 \quad R_0 = I_0$$

$$P_1 = FES_1 \quad R_1 = I_1$$

$$P_2 = FES_2 \quad R_2 = I_2$$

$$P_3 = FES_3 \quad R_3 = I_3$$

$$R'_0 = I_2.I_3$$

$$R'_1 = I_0.I_2$$

$$R'_2 = I_1.I_0$$

$$R'_3 = I_3.I_1$$

Expressões Booleanas

$$P_0 = R_2 + R'_0$$

$$P_1 = R_0 + R'_1$$

$$P_2 = R_1 + R'_2$$

$$P_3 = R_3 + R'_3$$

Grafo de Restrições

O grafo de restrições para essa situação, com uma determinada orientação acíclica inicial, pode ser visto na Figura 3.6.

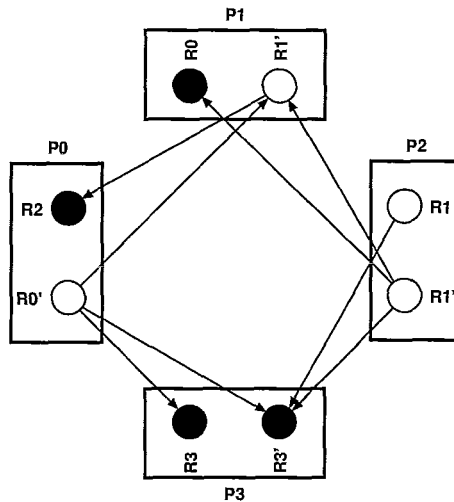


Figura 3.6: Grafo de restrições da interseção complexa.

3.1.2.2 Dinâmica

Situação 1: Inicialmente, apenas o mintermo R_0 de P_1 é sumidouro, de modo que todos os veículos de FES_1 devem obrigatoriamente virar a direita, seguindo em direção a **(a)**. Similarmente, apenas o mintermo R_2 de P_0 é sumidouro de modo que todos os veículos de FES_0 devem obrigatoriamente virar a direita, seguindo em direção a **(d)**. Para P_3 , seus dois mintermos R_3 e R_3' são sumidouros, de modo que FES_3 está ativo em sua completude. Essa situação está apresentada na Figura 3.7.

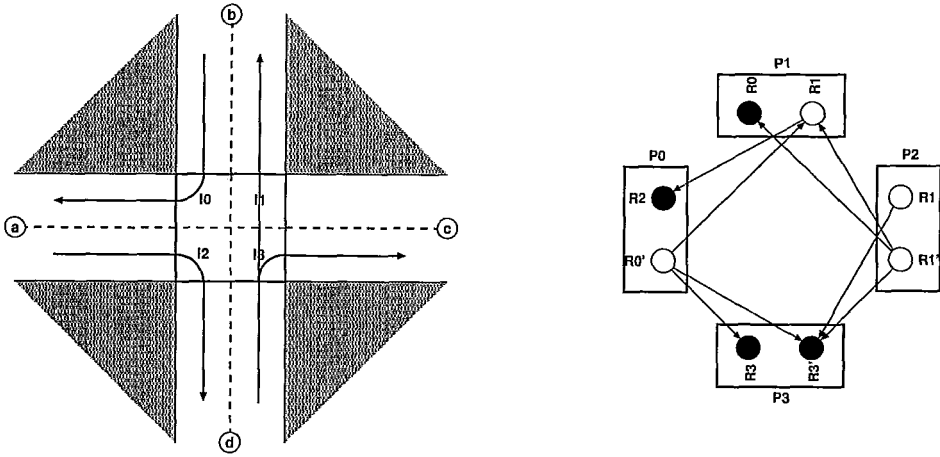


Figura 3.7: Situação 1 da dinâmica *SER* da interseção complexa.

Situação 2: O mintermo R_2 de P_0 reverteu sua aresta. Agora FES_1 e FES_3 estão ativos em sua completude. Essa situação está apresentada na Figura 3.8.

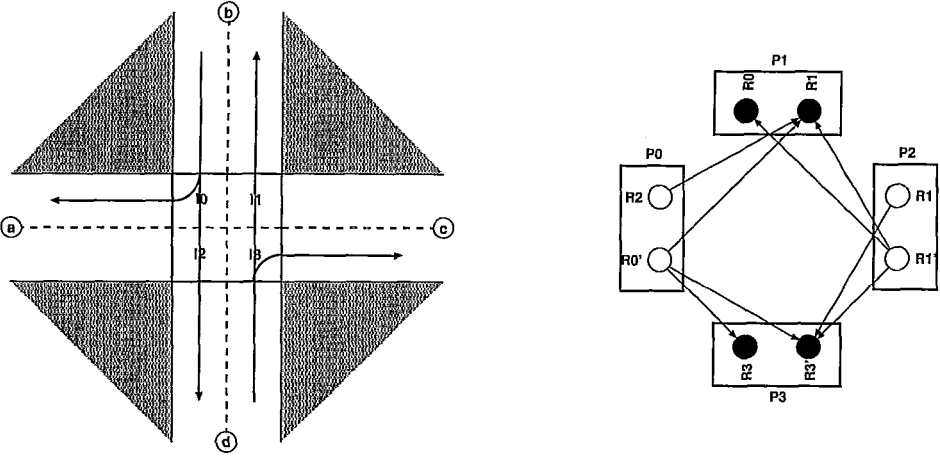


Figura 3.8: Situação 2 da dinâmica *SER* da interseção complexa.

Situação 3: Os dois mintermos R_0 e R'_1 de P_1 reverteram suas arestas. Tornando-se sumidouro agora os mintermos R_2 de P_0 , R_3 de P_3 e FES_2 está ativo em sua completude. Essa situação está apresentada na Figura 3.9.

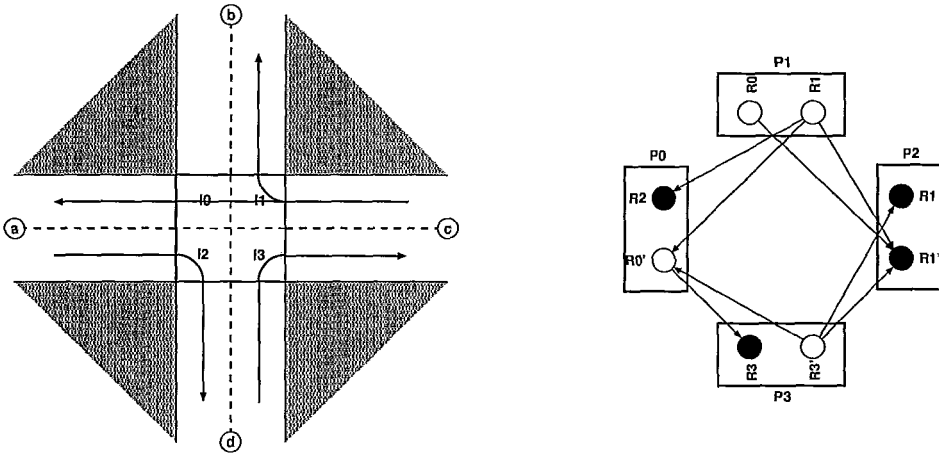


Figura 3.9: Situação 3 da dinâmica *SER* da interseção complexa.

3.1.3 Interseção Complexa Combinando o Tráfego de Veículos e Pedestres

A Figura 3.10 mostra uma interseção conectada a vias de duas faixas onde foi combinado o tráfego de veículos e pedestres. Essa interseção possui regiões com geometrias variadas: sendo três regiões retangulares, correspondentes às faixas de pedestres (I_0 , I_1 e I_2), e duas regiões triangulares, correspondentes à partes da interseção (I_3 e I_4). Os fluxos de entrada-saída agora combinam o tráfego de veículos e pedestres:

- FES_0 : um veículo proveniente de (a) pode virar a direita, seguindo em direção a (d), (cruzando seqüencialmente as regiões I_0 e I_3) ou pode seguir em frente, em direção a (c) (cruzamento seqüencialmente as regiões I_0 , I_3 , I_1 e I_4);
- FES_1 : os pedestres podem cruzar a faixa delimitada pela região I_0 ;
- FES_2 : os pedestres podem cruzar a faixa delimitada pela região I_1 ;
- FES_3 : os pedestres podem cruzar a faixa delimitada pela região I_2 ;

- **FES₄**: um veículo proveniente de (b) pode virar a esquerda, seguindo em direção a (c), (cruzando seqüencialmente as regiões I_2 e I_4) ou pode seguir em frente, em direção a (c) (cruzamento seqüencialmente as regiões I_2 , I_4 , I_1 e I_3).

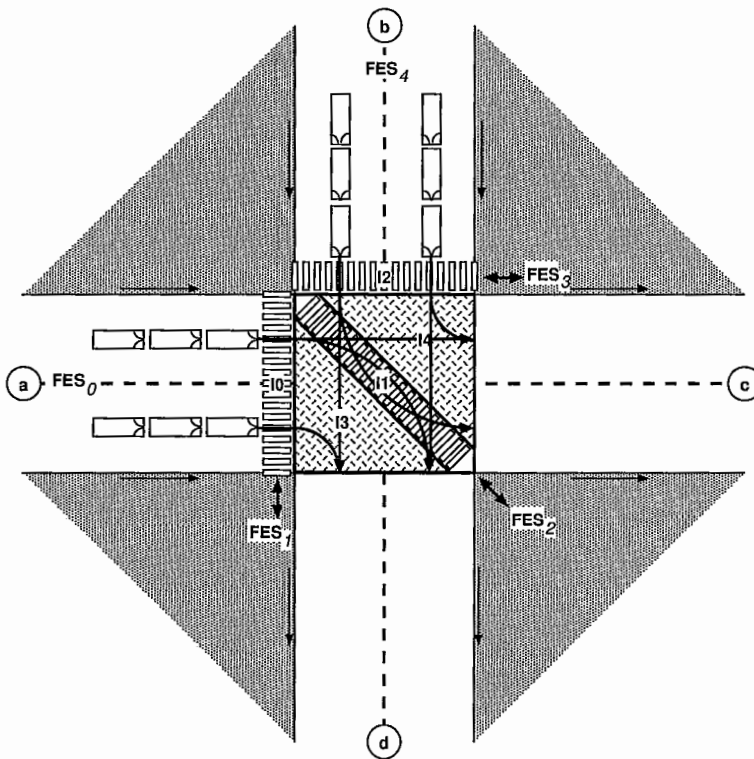


Figura 3.10: Interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

Tabela 3.3: Compartilhamento da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

$F = \{FES_0, FES_1, FES_2, FES_3, FES_4\}$	$I = \{I_0, I_1, I_2, I_3, I_4\}$
$F_0 = \{FES_0, FES_1\}$	$\Gamma_0 = \{I_0, I_1, I_3, I_4\}$
$F_1 = \{FES_0, FES_2, FES_4\}$	$\Gamma_1 = \{I_0\}$
$F_2 = \{FES_3, FES_4\}$	$\Gamma_2 = \{I_1\}$
$F_3 = \{FES_0, FES_4\}$	$\Gamma_3 = \{I_2\}$
$F_4 = \{FES_0, FES_4\}$	$\Gamma_4 = \{I_1, I_2, I_3, I_4\}$
$F_{01} = \{FES_0\}$	$\Gamma_{01} = \{I_0\}$
$F_{03} = \{FES_0\}$	$\Gamma_{02} = \{I_1\}$
$F_{04} = \{FES_0\}$	$\Gamma_{04} = \{I_1, I_3, I_4\}$
$F_{12} = \{FES_4\}$	$\Gamma_{24} = \{I_1\}$
$F_{13} = \{FES_0, FES_4\}$	$\Gamma_{34} = \{I_2\}$
$F_{14} = \{FES_0, FES_4\}$	

3.1.3.1 Modelo *SER*

Designação de Processos e Recursos

$$P_0 = FES_0 \quad R_0 = I_0$$

$$P_1 = FES_1 \quad R_1 = I_1$$

$$P_2 = FES_2 \quad R_2 = I_2$$

$$P_3 = FES_3 \quad R'_0 = I_0.I_3$$

$$P_4 = FES_4 \quad R'_1 = I_0.I_3.I_1.I_4$$

$$R'_2 = I_2.I_4$$

$$R'_3 = I_2.I_4.I_1.I_3$$

Expressões Booleanas

$$P_0 = R'_0 + R'_1$$

$$P_1 = R_0$$

$$P_2 = R_1$$

$$P_3 = R_2$$

$$P_4 = R'_2 + R'_3$$

Grafo de Restrições

O grafo de restrições para essa situação, com uma determinada orientação acíclica inicial, pode ser visto na Figura 3.6.

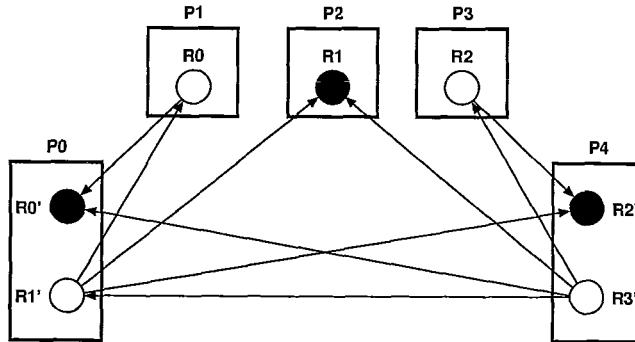


Figura 3.11: Grafo de restrições da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

3.1.3.2 Dinâmica

Situação 1: Inicialmente, apenas o minitermo R'_0 de P_0 é sumidouro, de modo que todos os veículos de FES_0 devem obrigatoriamente virar a direita, seguindo em direção a (d). Similarmente, apenas o minitermo R'_2 de P_4 é sumidouro, de modo que todos os veículos de FES_4 devem obrigatoriamente virar a esquerda, seguindo em direção a (c). O minitermo R_1 de P_2 também é sumidouro, permitindo o tráfego de pedestres por I_1 . Essa situação está apresentada na Figura 3.12.

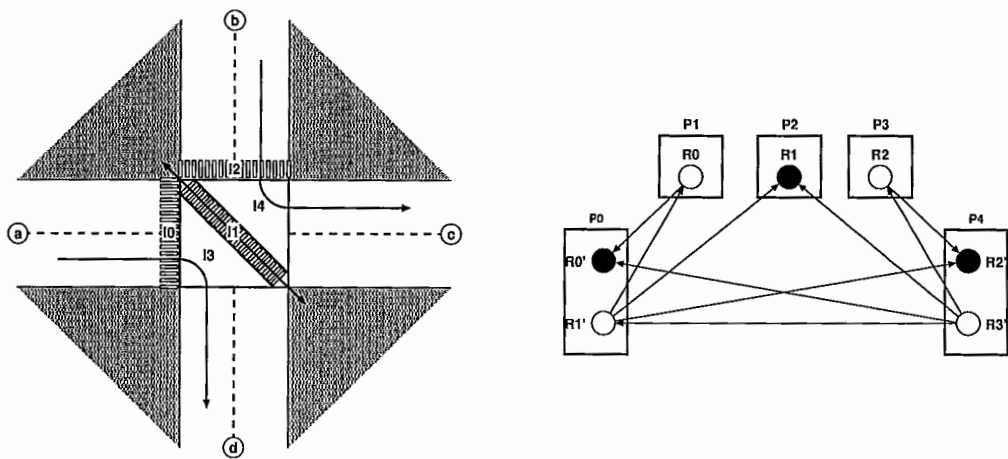


Figura 3.12: Situação 1 da dinâmica *SER* da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

Situação 2: Os mintermos R'_0 de P_0 e R'_2 de P_4 reverteram suas arestas, tornando-se sumidouros agora os mintermos R_0 de P_1 , R_1 de P_2 e R_2 de P_3 , permitindo o tráfego de pedestres por I_0 , I_1 e I_2 respectivamente. Essa situação está apresentada na Figura 3.13.

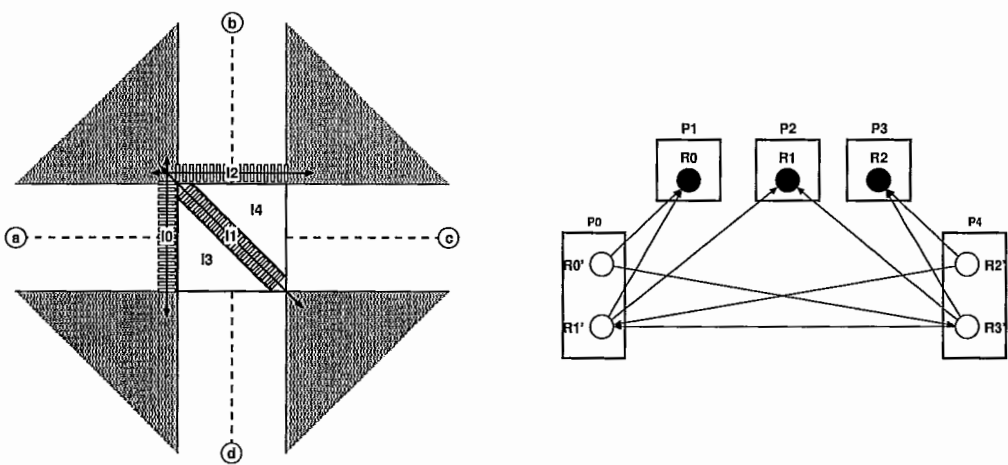


Figura 3.13: Situação 2 da dinâmica *SER* da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

Situação 3: Os mintermos R_0 de P_1 e R_1 de P_2 reverteram suas arestas, tornando-

se mintermo agora o mintermo R'_1 de P_0 , o que faz com que \mathbf{FES}_0 se torne ativo. Como R_2 de P_3 permanece como sumidouro, continua o tráfego de pedestres por I_2 . Essa situação está apresentada na Figura 3.14.

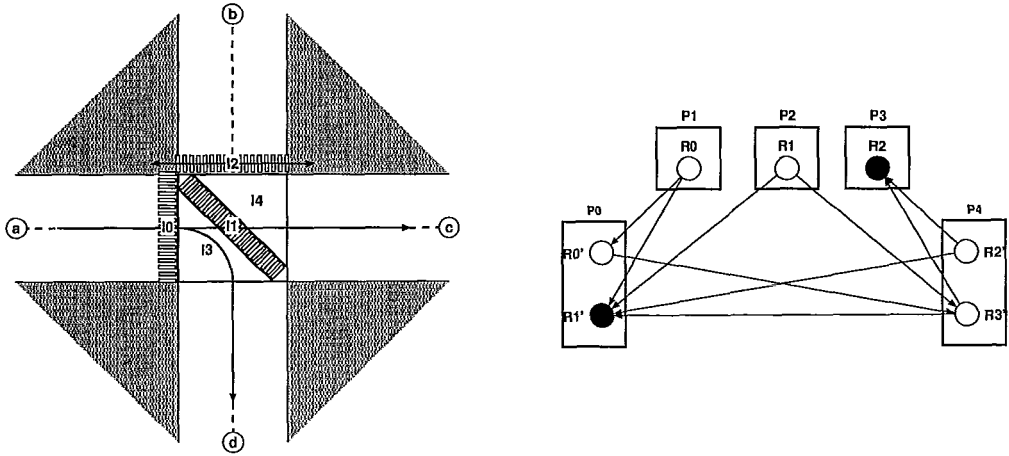


Figura 3.14: Situação 3 da dinâmica *SER* da interseção complexa combinando o tráfego de veículos e pedestres.

3.1.4 Comentários

Pelos exemplos abordados, nota-se que existe uma certa liberdade na definição das regiões que irão compor a interseção, contanto que seja respeitada a restrição que um veículo, ao cruzar a interseção, caiba inteiramente dentro das regiões necessárias para sua movimentação. Na interseção complexa, poder-se-ia tê-la definido como sendo constituída de uma única grande região que englobasse toda a interseção. Todavia, essa abordagem reduziria a concorrência do sistema no tocante a quantidade de fluxos de entrada-saída, total ou parcialmente, que poderiam estar cruzando a interseção simultaneamente. Paralelamente, caso as dimensões da interseção permitam, pode-se tentar aumentar a granularidade da subdivisão da interseção, aumentando a quantidade de regiões, de modo que uma maior quantidade de fluxos de entrada-saída possam coexistir. Como foi visto, também, no exemplo da combinação do tráfego de veículos e pedestres, tem-se total liberdade para se

variar a geometria das regiões de modo a modelar outros tipos de cenários.

A utilização do *SER* para se realizar uma estratégia de sinalização de interseções apresenta diversas vantagens. Primeiramente, é um mecanismo seguro, onde só será dada permissão a um determinado fluxo de veículos ou pedestres poder trafegar pela interseção, quando o mintermo associado for sumidouro, o que implica na não existência de nenhum outro fluxo conflitante trafegando pelas mesmas regiões. É justo, pois, eventualmente, a medida que a dinâmica do grafo de restrições for evoluindo, todos os mintermos terão a possibilidade de se tornarem sumidouros em tempo finito, permitindo que o fluxo de veículos ou pedestres associado possa cruzar a interseção. E, finalmente, o que talvez seja o fator de maior magnitude para a utilização do *SER* com essa finalidade, é o fato de que ele possibilita a utilização de qualquer política para a determinação dos tempos de sumidouro dos mintermos, como [2] [13], sem que haja qualquer risco de perda da corretude do modelo.

3.2 A Onda Verde Generalizada: Os Tapetes Verdes

A onda verde generalizada é um mecanismo criado para se tentar sincronizar o funcionamento de dois ou mais sinais de trânsito situados em uma mesma linha reta e sugerir aos veículos uma certa velocidade de deslocamento calculada dinamicamente. Sendo possível aceitar a sugestão de velocidade proposta, aumentar-se-á a probabilidade de que esse veículo encontre os sinais subseqüentes presentes nessa linha reta abertos, reduzindo, conseqüentemente, o tempo médio de espera dos veículos. O termo “generalizada” decorre do fato que, ao contrário do que acontece habitualmente, onde tenta-se aplicar um conceito semelhante, porém que favorece uma via de maior tráfego em detrimento das vias que a interceptam; tentou-se criar um mecanismo que generalizasse esse efeito para todas as vias de uma determinada região.

A Figura 3.15 mostra uma rede Manhattan **3x3** (três quarteirões por três quarteirões) **simétrica** (as dimensões dos quarteirões são as mesmas), constituída por nove interseções simples ($I_0, I_1, I_2 \dots I_8$) conectadas por vias de uma faixa. O conflito em cada cruzamento é resolvido semelhantemente à estratégia descrita na Seção 3.1.1, onde cada interseção é controlada por um par de mintermos: a interseção I_0 é controlada pelos mintermos **0** e **1**; a interseção I_1 é controlada pelos mintermos **2** e **3**; a interseção I_2 é controlada pelos mintermos **4** e **5**; e assim sucessivamente.

Inicialmente, será explicado como calcular os parâmetros para o mecanismo proposto: o **tempo de deslocamento** T_{ov} , a **velocidade de deslocamento** V_{ov} e o **comprimento da onda verde** C_{ov} . Para isso, será utilizado como cenário o caso do deslocamento de um veículo em linha reta cruzando as interseções I_0 e I_1 e os sinais associados aos mintermos **0** e **2**. Todavia, a forma como os parâmetros são calculados é válida para todos os pares de interseções as quais deseja-se aplicar o mecanismo de sincronização. Para o cenário proposto, foram realizadas 12 sincronizações para os seguintes pares de interseções: I_0 e I_1 ; I_0 e I_3 ; I_1 e I_2 ; I_1 e I_4 ; I_2 e I_5 ; I_3 e I_4 ; I_3 e I_6 ; I_4 e I_5 ; I_4 e I_7 ; I_5 e I_8 ; I_6 e I_7 ; I_7 e I_8 . Posteriormente, serão abordados alguns aspectos da dinâmica de funcionamento do mecanismo proposto.

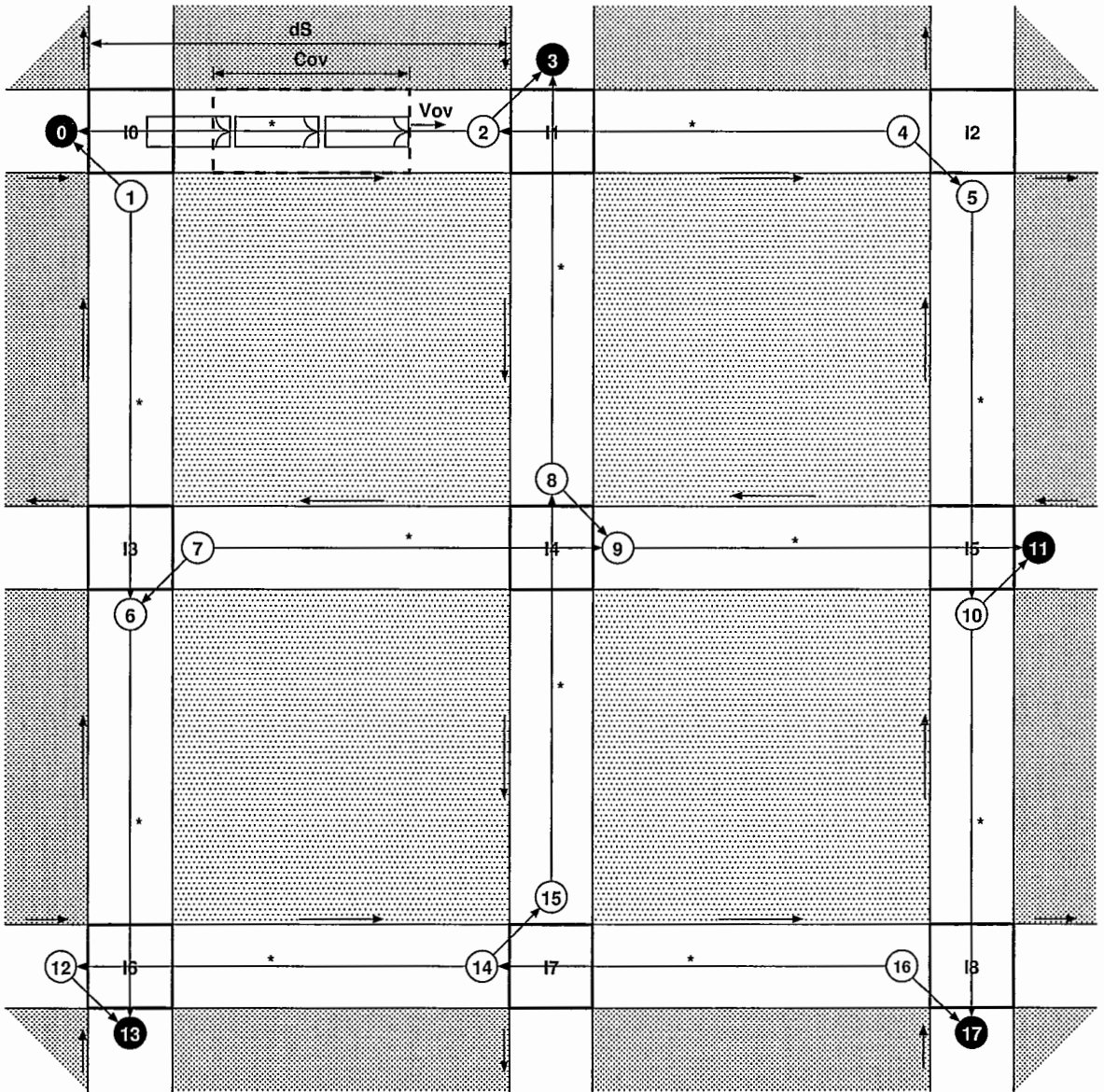


Figura 3.15: Rede Manhattan 3x3 simétrica onde foi implementado o mecanismo da onda verde generalizada.

3.2.1 Cálculo dos Parâmetros da Onda Verde

3.2.1.1 Tempo de Deslocamento T_{ov}

Os mintermos **0** e **2** foram conectados por uma aresta que proporciona a sincronização entre esses dois sinais (todas as arestas marcadas com * na Figura 3.15 foram utilizadas para gerar a sincronização entre os sinais, contabilizando 12 arestas no total). No instante em que o mintermo **0** se torna sumidouro, e, conseqüentemente, o seu sinal associado se torna verde, calcula-se quanto tempo falta para que o mintermo **2** também se torne sumidouro, denominado de **tempo de deslocamento da onda verde** T_{ov} . Esse é o tempo que um veículo, deslocando-se a uma velocidade constante V_{ov} , e iniciando seu movimento no sinal associado ao mintermo **0** deve levar para percorrer a distância entre os dois sinais dS , encontrando, desta forma, o sinal associado ao mintermo **2** aberto. Este tempo é dado pelo maior somatório de tempos de caminhos direcionados T_s do mintermo **2** até um mintermo sumidouro [3], mais o tempo restante para que este mintermo complete o seu ciclo verde+amarelo T_{va} , adicionado ainda ao somatório dos intervalos de tempos restantes T_{ra} , para que todos os mintermos presentes no maior caminho direcionado até o próximo mintermo sumidouro, incluindo este próprio, uma vez terminado o ciclo verde+amarelo, revertam suas arestas. Este intervalo de tempo é dado pela diferença entre o instante em que o último veículo cruza completamente a interseção e o instante em que o ciclo verde+amarelo se completa. Logo,

$$T_{ov} = T_s + T_{va} + T_{ra}. \quad (3.1)$$

Aplicando a restrição que, quando o sinal amarelo se tornar ativo, nenhum veículo poderá mais entrar na região da interseção e, supondo que o tempo do sinal amarelo seja grande o suficiente, que permita o completo cruzamento da interseção pelo último veículo, pode-se considerar que, uma vez terminado o ciclo verde+amarelo,

todos os veículos já terão cruzado completamente a interseção. Logo, $T_{ra} = 0$ na Equação 3.1, resultando na seguinte equação para o cálculo do tempo de deslocamento da onda verde

$$T_{ov} = T_s + T_{va}. \quad (3.2)$$

3.2.1.2 Velocidade de Deslocamento V_{ov}

O cálculo da velocidade de deslocamento da onda verde V_{ov} é tarefa relativamente simples, para isso basta dividir a distância entre os dois sinais dS pelo tempo de deslocamento da onda verde T_{ov}

$$V_{ov} = \frac{dS}{T_{ov}} = \frac{dS}{T_s + T_{va}}. \quad (3.3)$$

3.2.1.3 Comprimento C_{ov}

No instante em que o sinal associado ao mintermo **0** se tornar verde, considera-se que começa a ser criada uma região retangular de comprimento limitado, que irá se deslocar com velocidade V_{ov} em direção a I_1 , e, todos os veículos que estejam contidos dentro dessa região, encontrarão o sinal associado ao mintermo **2** aberto. Pode-se fazer uma analogia dessa região como sendo um **tapete verde** deslocando-se e levando os veículos estacionários em cima dele. O comprimento dessa região, C_{ov} , tem seu valor calculado em função dos tempos de sinal verdes associados aos mintermos **0** T_{v0} e **2** T_{v2} :

- o intervalo de tempo T_{v0} limita a quantidade de veículos que irão passar para a interseção I_0 , entrando na região do tapete verde;

- o intervalo de tempo T_{v2} limita a quantidade de veículos que irão encontrar o sinal associado ao mintermo **2** aberto.

Desta forma, conclui-se facilmente que C_{ov} deve ser limitado pelo menor valor entre T_{v0} e T_{v2} :

$$C_{ov} = V_{ov} \times \text{Min}\{T_{v0}, T_{v2}\}. \quad (3.4)$$

3.2.2 Comentários

Uma primeira situação que pode ser analisada, leva em consideração, por exemplo, a onda verde que se desloca entre as interseções I_0 e I_1 , denominada de OV_0 , e a onda verde subsequente que se desloca entre as interseções I_1 e I_2 , denominada de OV_1 . Sabe-se que, uma vez que OV_0 tenha sido criada na interseção I_0 e uma certa quantidade de veículos que aceitaram a sugestão de OV_0 tenham preenchido seu interior, caso OV_0 não encontre um veículo a frente que esteja se deslocando a uma velocidade mais baixa que a sua própria, todos esses veículos encontrarão o sinal associado ao mintermo **2** verde. Todavia, no instante em que este mintermo se tornar sumidouro, uma nova onda verde OV_1 será criada com novos parâmetros, e, não necessariamente, esses novos parâmetros serão os mesmos calculados para OV_0 (depende de como está a orientação e os tempos de sumidouro do grafo e as distâncias entre as interseções, que não necessariamente são as mesmas). Caso haja uma redução no comprimento de OV_1 em relação a OV_0 , nem todos os veículos que estavam em OV_0 encontrarão espaço disponível em OV_1 . Caso haja um aumento no comprimento de OV_1 em relação a OV_0 , poderá existir um espaço adicional na parte final de OV_1 , de modo que, veículos que estejam vindo de outras direções e entrem na via que conecta I_1 a I_2 poderão se juntar a OV_1 .

Uma segunda observação está relacionada a velocidade de deslocamento da onda

verde V_{ov} , mostrada na Equação 3.3. Quando $T_{ra} > 0$, o valor de V_{ov} calculado pelo algoritmo será maior do que o valor real necessário para encontrar o sinal seguinte aberto, fazendo com que os veículos que aceitam a sugestão da onda verde cheguem antes de o sinal seguinte abrir, ocasionando paradas.

Finalmente, ao se tentar criar esse efeito generalizado, que depende dos tempos dos sinais, da dinâmica de evolução do grafo e das dimensões dos quarteirões da região considerada, algumas situações não-realistas e/ou não-ideais podem acontecer:

- o comprimento da onda verde C_{ov} calculado pode ser pequeno, não cabendo muitos veículos no seu interior;
- a velocidade de deslocamento da onda verde V_{ov} pode ser muito baixa ou excessivamente alta, fazendo com que os veículos venham a ignorar a sugestão fornecida.

3.3 Pelotão de Veículos Modelado como um *Pipeline* Assíncrono

Nessa seção é apresentado como o deslocamento de veículos em linha reta em um pelotão pode ser modelado como um *pipeline* assíncrono. A Figura 3.16 mostra a representação de uma via com apenas uma faixa, onde os veículos podem se deslocar de (a) em direção a (b), dividida em regiões de iguais tamanhos e cujas fronteiras são delimitadas por F_0, F_1, F_2, F_3, F_4 e F_5 . O comprimento dessas regiões, para manter a corretude do modelo, deve ser maior ou igual do que a adição do comprimento do veículo mais longo que possa trafegar por essa via com uma distância de segurança, grande o suficiente, que permita que um veículo pare completamente em uma situação de freada brusca.

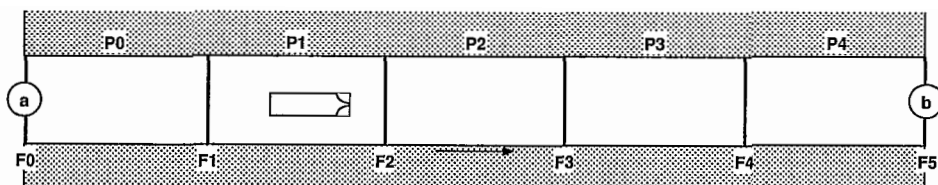


Figura 3.16: Representação de uma via dividida em regiões para o deslocamento de um pelotão de veículos modelado como um *pipeline* assíncrono.

3.3.1 Modelo *SER*

Na situação apresentada, os processos P_i estão associados à movimentação de veículos nas regiões entre as fronteiras e os recursos R_i estão associados à permissão de um veículo para cruzar a fronteira delimitada por F_i , estando cada recurso, desta forma, associado a uma fronteira. Esse modelo possui um comportamento muito semelhante ao de um *pipeline* em arquitetura de computadores, descrito na Seção 2.3.3. Basta imaginar o deslocamento dos veículos como sendo instruções que trafegam entre os diferentes registradores, representados aqui pelas fronteiras; e o processamento de cada estágio é representado pelo deslocamento do veículo pela região delimitada por P_i .

Sabe-se que cada veículo não pode cruzar simultaneamente as duas fronteiras que delimitam uma região P_i . Com essa restrição, obtém-se um comportamento para os processos semelhante ao da função booleana OU-EXCLUSIVO. Utilizando essa análise, podem ser derivadas equações booleanas que descrevem o comportamento dos processos:

$$P_0 = R_0 \oplus R_1 = R_0 \overline{R_1} + \overline{R_0} R_1,$$

$$P_1 = R_1 \oplus R_2 = R_1 \overline{R_2} + \overline{R_1} R_2,$$

$$P_2 = R_2 \oplus R_3 = R_2 \overline{R_3} + \overline{R_2} R_3,$$

$$P_3 = R_3 \oplus R_4 = R_3 \overline{R_4} + \overline{R_3} R_4,$$

$$P_4 = R_4 \oplus R_5 = R_4 \overline{R_5} + \overline{R_4} R_5,$$

Posteriormente, deve-se atribuir uma orientação acíclica inicial para o grafo de restrições. Uma boa abordagem para esse caso seria adotar uma orientação de modo que o grafo estivesse “esperando” para que o primeiro veículo entre na via. O grafo com essa orientação acíclica pode ser vista na Figura 3.17. As arestas marcadas com * existem para que só seja possível que um veículo entre em uma região quando o veículo seguinte já a tenha deixado.

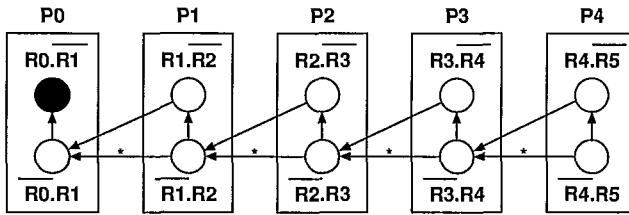


Figura 3.17: Grafo de restrições do pelotão de veículos modelado como um *pipeline* assíncrono.

Pode-se criar uma interpretação para a função que os mintermos irão executar ao se tornarem sumidouros. O mintermo $R_0 \overline{R_1}$ de P_0 sumidouro, indica que existe um veículo completamente contido e trafegando entre as fronteiras delimitadas por F_0 e F_1 . Posteriormente, após o final do tempo de sumidouro associado a esse mintermo, ele irá reverter sua aresta, tornando-se sumidouro agora o mintermo $\overline{R_0} R_1$, que irá enviar uma mensagem ao veículo dizendo que ele pode atravessar completamente a fronteira delimitada por F_1 . O veículo, ao completar essa travessia, irá enviar uma mensagem de volta a $\overline{R_0} R_1$, confirmando sua passagem por aquela fronteira. Este mintermo, ao receber essa confirmação do veículo, irá reverter suas arestas. Quem será sumidouro agora será o mintermo $R_1 \overline{R_2}$ de P_1 , repetindo o comportamento já descrito para os mintermos de P_0 . Um exemplo de uma “fotografia” retirada do *pipeline* no decorrer do deslocamento dos veículos pode ser visto na Figura 3.18.

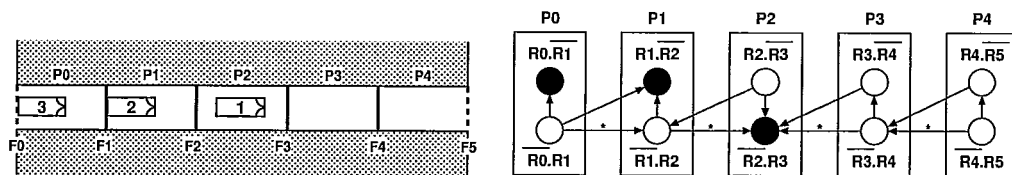


Figura 3.18: Fotografia do deslocamento de um pelotão de veículos modelado como um *pipeline* assíncrono.

3.3.2 Comentários

Esse modelo poderá evitar a ocorrência de colisões da seguinte forma: suponha que, ao final da situação apresentada na Figura 3.18, o veículo **1** tenha parado, tornando-se sumidouro permanentemente o mintermo $\overline{R_2 R_3}$ de P_3 . Posteriormente, para a movimentação do veículo **2**, o mintermo $\overline{R_1 R_2}$ de P_1 irá reverter suas arestas. Porém, o mintermo $\overline{R_1 R_2}$ não será sumidouro, de modo que nenhuma mensagem será enviada ao veículo **2**. Este veículo, depois de um certo intervalo de tempo sem receber mensagem proveniente de $\overline{R_1 R_2}$, irá iniciar um procedimento de freada, parando, em pior caso, na fronteira delimitada por F_2 , evitando uma colisão.

Finalmente, esse modelo também obriga que os veículos tenham uma dimensão menor do que a dimensão de uma região. Caso queira-se permitir que veículos com diferentes comprimentos trafeguem por essa via, para manter a corretude do modelo, o tamanho das regiões deve ser dado em função do maior comprimento de veículo possível, o que claramente irá reduzir a densidade de veículos. Por exemplo, caso o comprimento do maior veículo que possa trafegar por ela seja aproximadamente duas vezes o tamanho de um veículo mediano, em uma região que, teoricamente poderia conter dois veículos medianos, conterá apenas um.

Capítulo 4

Análise Quantitativa Restrita da Onda Verde Generalizada

Esse capítulo apresenta uma análise quantitativa restrita do impacto da utilização do mecanismo da onda verde generalizada no tráfego de veículos. Vale frisar que essa análise foi restringida a um certo conjunto de situações bem específicas, de um oceano de situações que poderiam ter sido simuladas e analisadas. Na Seção 4.1, descrevem-se as funcionalidades do simulador desenvolvido. Em seguida, na Seção 4.2, descrevem-se as principais métricas, encontradas na literatura, para se realizar o estudo do impacto de mecanismos de sinalização de trânsito no tráfego de veículos, e a métrica escolhida para realizar as análises e como foi auferida as medições. Na Seção 4.3, são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas para três cenários distintos (avenida, grade Manhattan 5x5 simétrica, grade Manhattan 2x2 assimétrica), bem como alguns comentários do porquê dos resultados obtidos.

4.1 Ambiente de Simulação

Para se realizar as análises, foi-se desenvolvido um simulador [23] que permite criar uma rede de vias sinalizadas dispostas de maneira a formar uma grade do tipo

Manhattan (*Manhattan Grid Neighborhood*), semelhantemente à grade mostrada na Figura 3.15.

Associado a cada minitermo, que possui um determinado tempo de sumidouro, existe um sinal de trânsito apresentando as fases vermelha, amarela e verde (o tempo de sumidouro é repartido entre as fases verde e amarela). A política de reversão das arestas, bem como a forma como se processa o tráfego de veículos pela interseção é similar ao já descrito na Seção 3.1. É possível criar qualquer estrutura de arestas para gerar a sincronização dos sinais, como, por exemplo, a apresentada na Figura 3.15.

Veículos são injetados na rede, com uma taxa que pode variar de 0 a $4000v/h$, a partir de fontes localizadas no início das vias de acesso (a mesma taxa é utilizada para todas as fontes). Para o caso da Figura 3.15, são injetados veículos nas seguintes vias: na via associada ao minitermo **0** da interseção I_0 , na via associada ao minitermo **3** da interseção I_1 , na via associada ao minitermo **11** da interseção I_5 , nas vias associadas aos minitermos **12** e **13** da interseção I_6 e na via associada ao minitermo **17** da interseção I_8 . Um veículo, ao alcançar uma interseção, irá decidir, com uma certa probabilidade, se seguirá em frente ou efetuará uma curva (a direção da curva dependerá dos sentidos permitidos do tráfego nas vias subsequentes). Ao alcançar uma das fronteiras de saída da rede, o veículo é retirado da simulação (por exemplo, ao alcançar a fronteira da via localizada ao norte da interseção I_2). O comportamento dos veículos ao trafegar pela rede é definido pelo modelo de perseguição veicular *Intelligent Driver Model* descrito na Seção 2.2.1, utilizando os valores padrões para os parâmetros apresentados na Tabela 2.1.

Existem dois tipos de veículos distintos que podem trafegar pela rede: os **verdes** e os **não-verdes**. Os veículos verdes são aqueles que sempre aceitam a sugestão do tapete verde que está se deslocando (aceitar a sugestão significa trafegar dentro e com a velocidade do tapete). Caso um veículo verde entre em uma via beneficiada pela

existência de uma onda verde, e não esteja contido dentro de um tapete verde, foi-se utilizado um mecanismo *ad hoc* que reduzirá sua velocidade para 1/8 da velocidade máxima permitida, tentando esperar pelo tapete verde que virá em seguida (essa técnica não é uma garantia de que o veículo irá sempre encontrar um tapete verde). Os veículos não-verdes são aqueles que sempre ignoram a sugestão do tapete verde. Pode-se variar a porcentagem de veículos verdes que são injetados no sistema.

A Figura 4.1 mostra a simulação da rede Manhathan 4x4 simétrica apresentada na Figura 3.15. Nela pode-se verificar os diferentes tapetes verdes e veículos trafegando pelas vias e os sinais associados a cada minitermo.

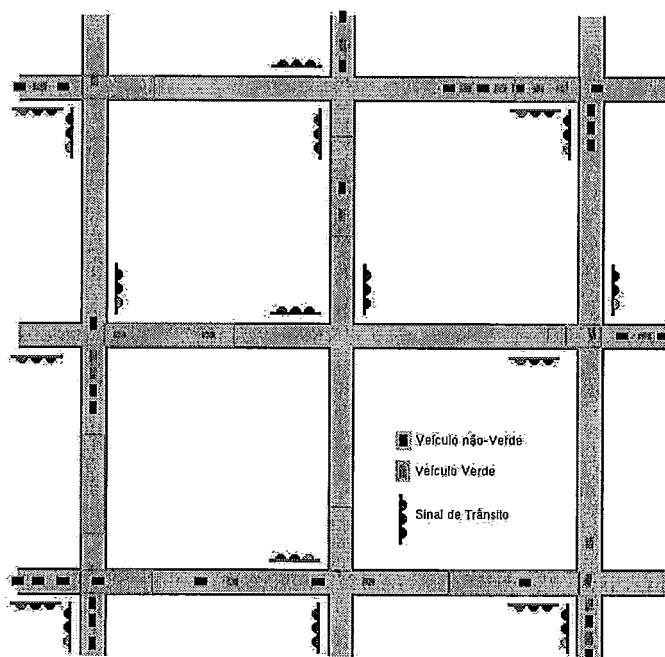


Figura 4.1: Simulação da rede Manhathan 2x2 simétrica da Figura 3.15.

4.2 Métrica

As métricas mais comumente utilizadas, encontradas na literatura, para se avaliar o impacto da presença dos sinais de trânsito no tráfego são [2]:

- o **tempo de espera**, dado pelo somatório dos tempos que os veículos permanecem parados nas interseções esperando pela abertura dos sinais; pode-se calcular também o tempo de espera médio, considerando a razão do somatório dos tempos, descrito anteriormente, pelo número de veículos que atravessaram as interseções;
- o **atraso**, dado pela diferença entre o tempo real de viagem e o menor tempo de viagem possível;
- a **porcentagem de veículos parados**, dado pela razão entre a quantidade de veículos que precisaram parar na interseção pela quantidade total de veículos que cruzaram a mesma;
- a **densidade** de veículos (ver 2.1);
- o **fluxo global**, dado pela multiplicação da densidade global pela velocidade média (ver 2.1).

A métrica escolhida para se realizar a análise apresentada nesse capítulo foi o tempo médio de espera dos veículos nas interseções e no sentido do tráfego que podem ser beneficiados pelas ondas verdes. Para exemplificar como esse tempo médio de espera é calculado, utiliza-se o cenário mostrado na Figura 4.2. Considera-se apenas o tempo de espera para os veículos que se deslocam nas vias que são beneficiadas pela presença de uma onda verde, no exemplo em questão: as vias horizontais entre as interseções I_0 e I_1 , I_1 e I_2 , I_2 e I_3 . O tempo de espera para cada veículo é incrementado toda vez que a velocidade de deslocamento do veículo atingir zero em

alguma dessas vias. Por exemplo, um veículo que esteja esperando no sinal associado ao minitermo 3 da interseção I_1 , e que deseja seguir em frente, não terá seu tempo de espera contabilizado; caso esse veículo decida entrar à direita, o tempo de espera, no deslocamento entre I_1 e I_2 , será considerado, e esse veículo será contabilizado ao cruzar a interseção I_2 .

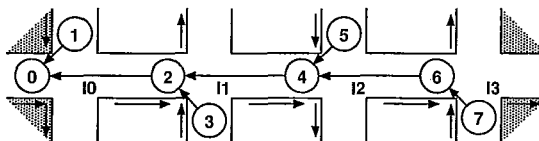


Figura 4.2: Quatro interseções em linha reta.

Mediu-se o tempo médio de espera total dos veículos, como também o tempo médio de espera dos veículos verdes e não-verdes analisados separadamente.

4.3 Cenários e Resultados

Foram-se analisados três cenários distintos: o primeiro simula ondas verdes que englobam o percurso de uma grande avenida, o segundo simula um mecanismo da onda verde generalizada aplicada a uma rede Manhattan 5x5 simétrica e o terceiro simula o mecanismo de onda verde generalizada aplicado a uma rede Manhattan 2x2 assimétrica. Para se realizar esse estudo, foi-se analisado o comportamento do tempo médio de espera ao se variar individualmente cada uma das seguintes dimensões (mantendo as outras dimensões com um valor constante):

- o fluxo de entrada;
- a probabilidade de fazer uma curva;
- a porcentagem de veículos verdes inseridos no sistema.

Foi analisado também, para a rede Manhattan 5x5 simétrica, a influência dos seguintes fatores: o mecanismo *ad hoc* presente nos veículos verdes que os fazem reduzir sua velocidade para $1/8$ da velocidade máxima permitida, a mudança dos sentidos permitidos do tráfego nas vias e do tempo de sumidouro dos mintermos. Para todas as situações analisadas, foram-se efetuadas 50 medições, com uma duração de meia hora para cada simulação.

4.3.1 Cenário 1: Avenida

Este cenário simula o mecanismo da onda verde generalizada aplicado a uma avenida constituída por cinco interseções mostrada na Figura 4.3. As distâncias entre as interseções são todas $300m$ e foi adotado os seguintes tempos de sumidouro para os mintermos T_i : $T_0 = T_2 = T_4 = T_6 = T_8 = 20s$ (Verde: 16s, Amarelo: 4s), $T_1 = T_3 = T_5 = T_7 = T_9 = 10s$ (Verde: 8s, Amarelo: 2s). Utilizou-se um tempo maior para os mintermos que estão no sentido de deslocamento da avenida para dar preferência ao deslocamento dos veículos na avenida em detrimento das ruas arteriais que estão conectadas.

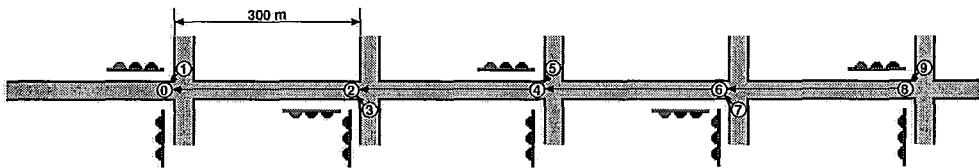


Figura 4.3: Cenário 1: Avenida.

4.3.1.1 Primeira situação: Variando o fluxo de entrada

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000.

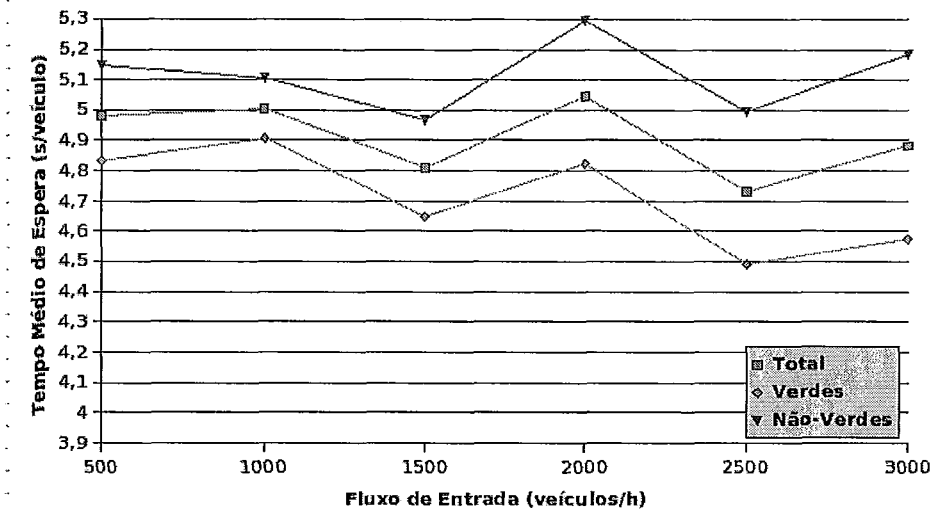


Figura 4.4: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função do fluxo de entrada.

4.3.1.2 Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

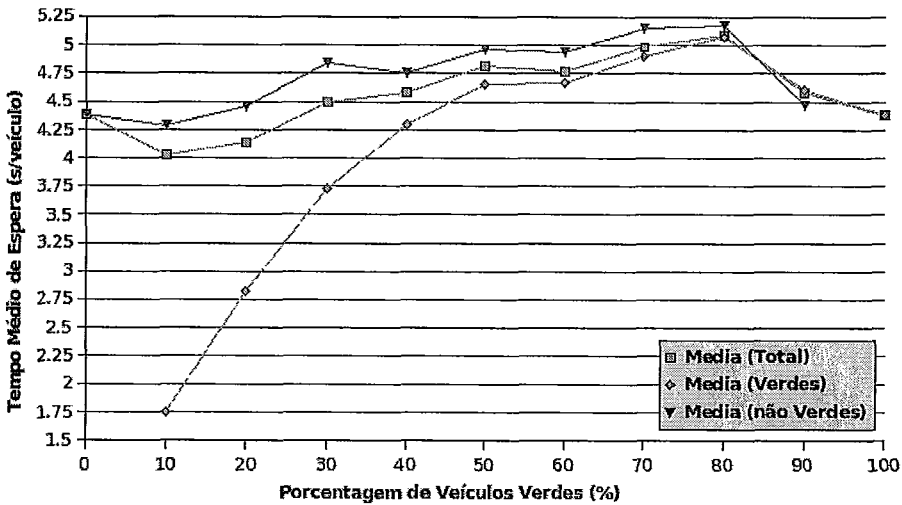


Figura 4.5: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função da porcentagem de veículos verdes.

4.3.1.3 Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

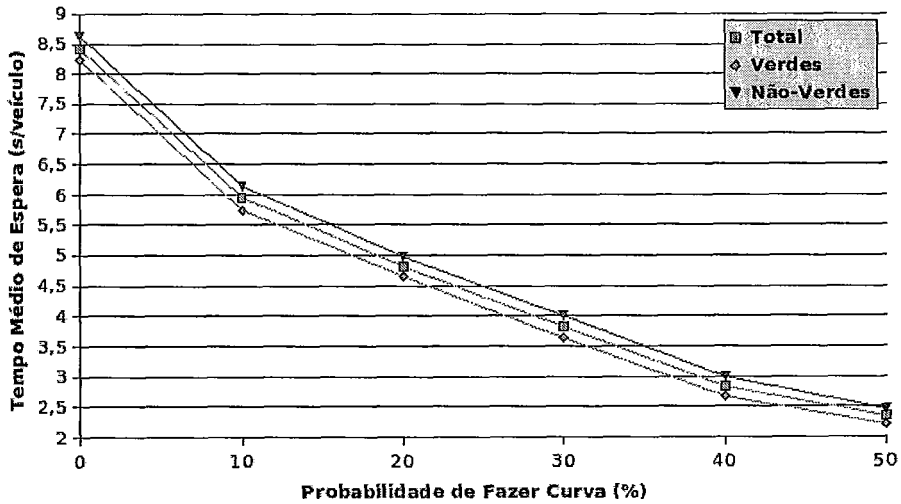


Figura 4.6: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a avenida em função da probabilidade de fazer uma curva.

4.3.1.4 Comentários

Para a primeira situação, mostrada na Figura 4.4, observou-se um leve comportamento oscilatório do tempo de espera médio dos veículos ao se aumentar o fluxo de entrada no sistema. Previamente, acreditava-se que ao se aumentar o fluxo de entrada, o tempo médio de espera aumentaria progressivamente, pois, ao se injetar mais veículos na rede, aumentam-se as chances de existirem mais veículos trafegando fora de um tapete verde. Uma provável explicação para esse fenômeno é que, como esse cenário é aberto, os veículos podem estar deixando a rede facilmente, de modo

que não se é visível o efeito do aumento do fluxo de veículos. Todavia, mais análises e experimentos são necessários para se obter uma explicação mais detalhada do porquê desse fenômeno.

Para a segunda situação, mostrada na Figura 4.5, nota-se que a partir de uma porcentagem de aproximadamente 50% veículos verdes há uma sensível diminuição da diferença do tempo médio de espera dos veículos verdes e não-verdes. A partir desse valor, os veículos verdes dominam o comportamento do sistema. Esse seria, portanto, o valor mínimo de veículos verdes que deve trafegar por esse cenário, para se obter ganhos relevantes pela utilização do mecanismo da onda verde generalizada.

Para a terceira situação, mostrada na Figura 4.6, nota-se uma diminuição no tempo médio de espera dos veículos, em função do aumento da probabilidade de fazer uma curva. Isso é decorrente do fato que, ao se aumentar essa probabilidade, veículos que estariam trafegando em linha reta seguindo a trajetória da avenida, possivelmente parando nos sinais e aumentando o valor do tempo médio de espera, estarão deixando a avenida pelas vias de acesso.

4.3.2 Cenário 2: Grade Manhattan 5x5 Simétrica

Este cenário simula o mecanismo da onda verde generalizada aplicado a uma grade Manhattan 5x5 com quarteirões simétricos. Nesse cenário, além de se analisar as situações apresentadas no Cenário 1, foi analisada também a influência dos seguintes fatores:

- **Caso 1:** o mecanismo *ad hoc* presente nos veículos verdes que os fazem reduzir sua velocidade para $1/8$ da velocidade máxima permitida. Nos gráficos apresentados a seguir, os tempos médios de espera com índice 1 são referentes à situação onde os veículos verdes apresentam tal mecanismo e os tempos médios de espera com índice 2, o contrário. Para ambos os casos, o sentido permitido

do tráfego nas vias é o apresentado na Figura 4.7 (sentidos alternados).

- **Caso 2:** a alteração dos sentidos permitidos para o tráfego nas vias da rede. Nos gráficos apresentados a seguir, os tempos médios de espera com índice 1 são referentes à rede mostrada na Figura 4.7 (sentidos alternados) e os tempos médios de espera com índice 2 são referentes à rede com os seguintes sentidos permitidos de tráfego nas vias: todas as vias horizontais apresentam sentido de deslocamento de oeste para o leste e todas as vias verticais apresentam sentido de deslocamento de norte para o sul.

As distâncias entre as interseções são todas $300m$. Como em uma grade Manhattan, a priori, não se deve priorizar uma via em detrimento das outras, adotou-se o mesmo tempo de simudouro para todos os mintermos: $T_0 = \dots = T_{71} = 20s$ (Verde: 16s, Amarelo: 4s).

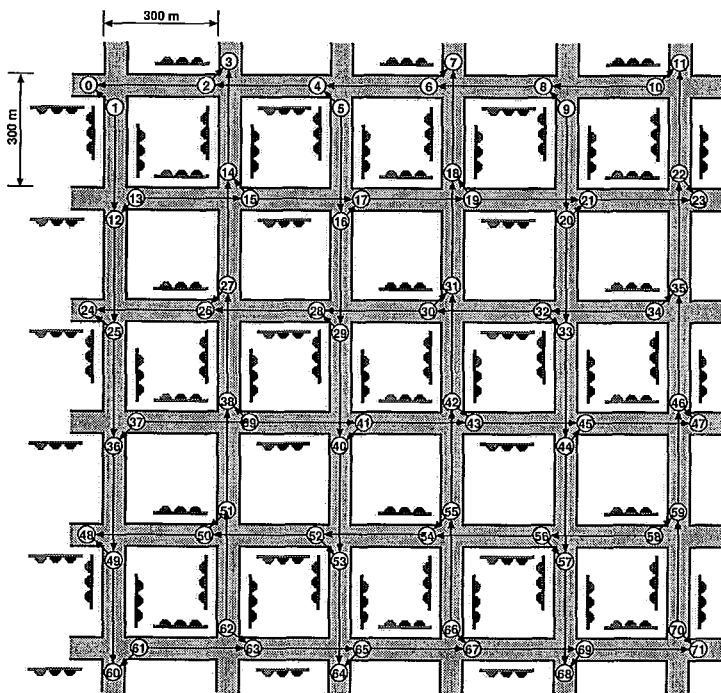


Figura 4.7: Cenário 2: Grade Manhattan 5x5 Simétrica.

4.3.2.1 Primeira situação: Variando o fluxo de entrada

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000.

Caso 1 - Mecanismo *ad hoc*.

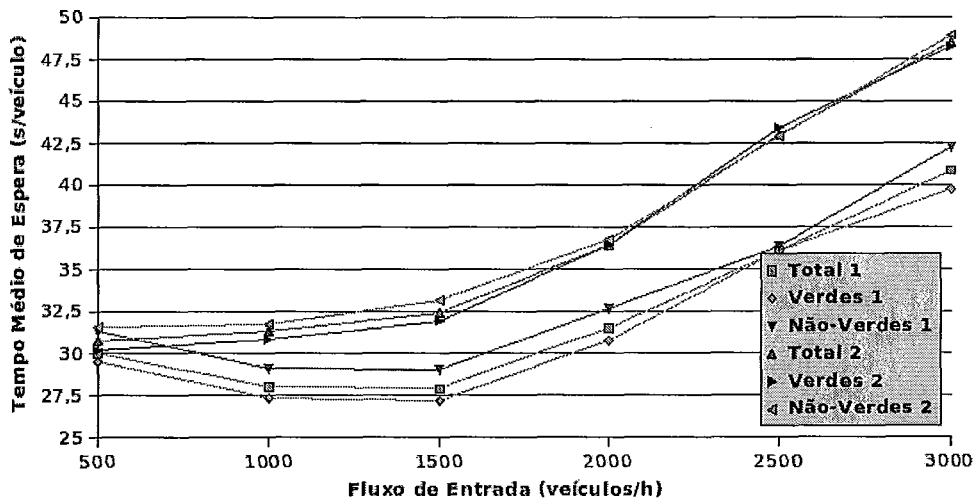


Figura 4.8: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função do fluxo de entrada - Caso 1.

Caso 2 - Sentido permitido do tráfego nas vias.

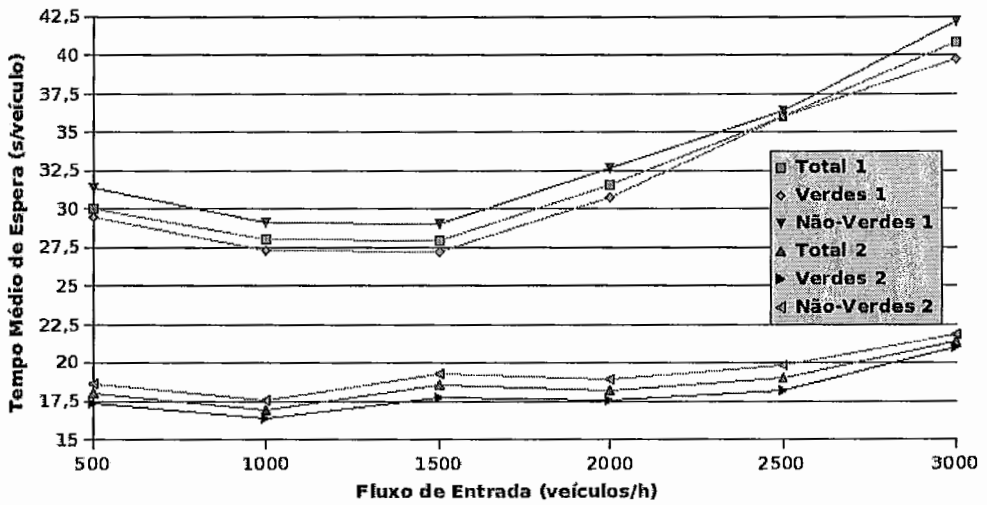


Figura 4.9: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função do fluxo de entrada - Caso 2.

4.3.2.2 Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes

Valores dos parâmetros:

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

Caso 1 - Mecanismo *ad hoc*.

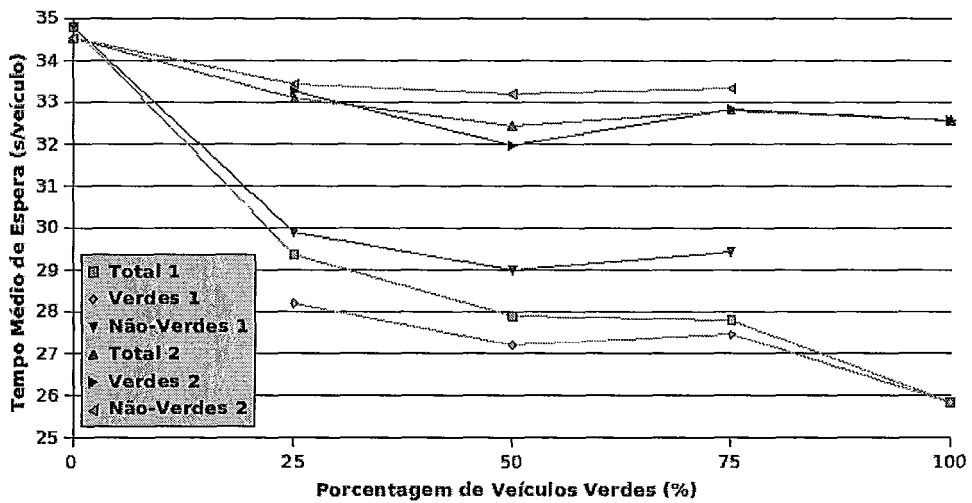


Figura 4.10: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da porcentagem de veículos verdes - Caso 1.

Caso 2 - Sentido permitido do tráfego nas vias.

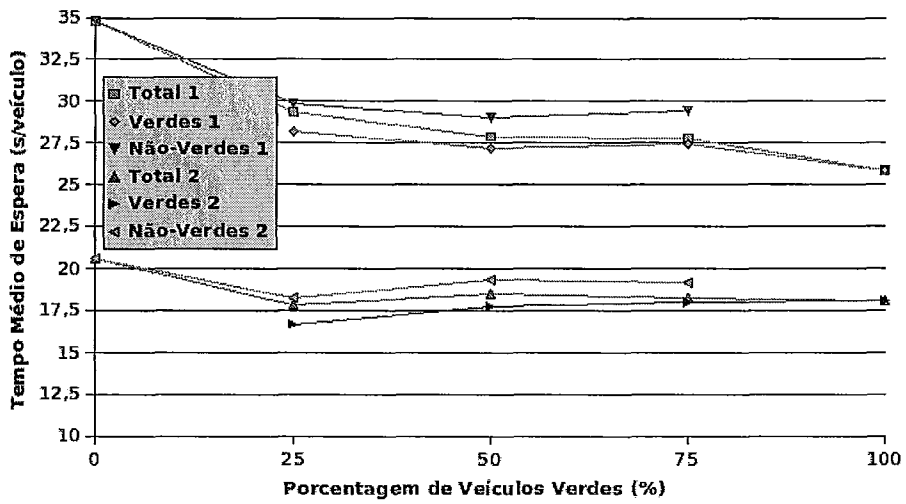


Figura 4.11: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da porcentagem de veículos verdes - Caso 2.

4.3.2.3 Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

Caso 1 - Mecanismo *ad hoc*.

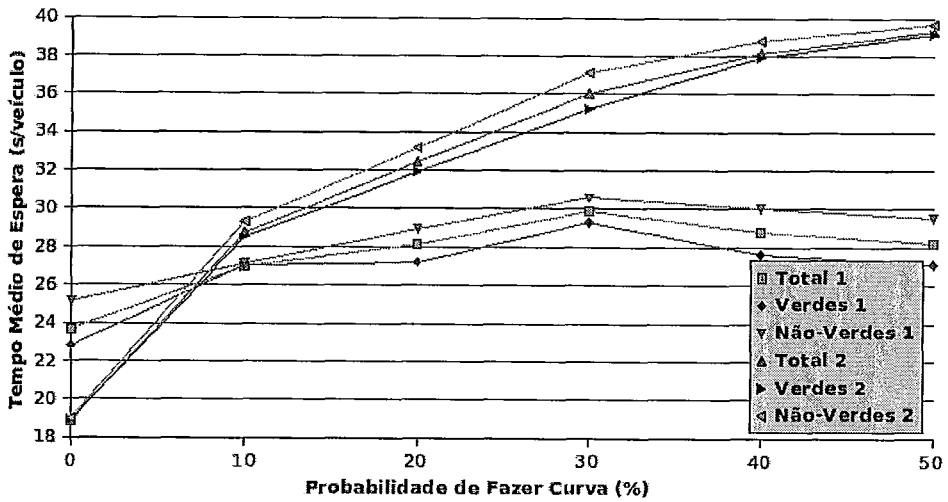


Figura 4.12: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da probabilidade de fazer uma curva - Caso 1.

Caso 2 - Sentido permitido do tráfego nas vias.

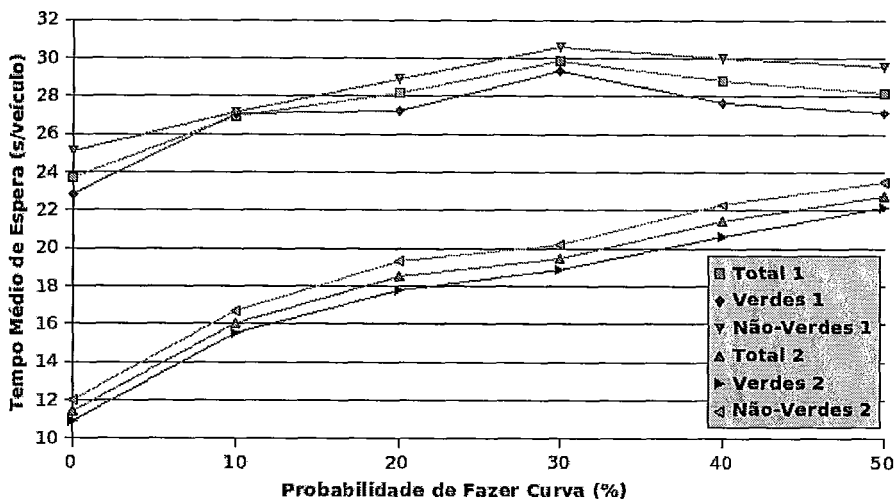


Figura 4.13: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 5x5 simétrica em função da probabilidade de fazer uma curva - Caso 2.

4.3.2.4 Comentários

Paras as situações mostradas nas figuras 4.8 e 4.9, onde foi-se analisado o efeito da variação do fluxo de entrada, observou-se um aumento no tempo médio de espera ao se aumentar a quantidade de veículos injetada no sistema. Isto acontece, pois, com mais veículos trafegando pela rede, alguns efeitos indesejáveis terão sua magnitude aumentada: existirá uma maior quantidade de veículos que não encontrarão espaços dentro de um tapete verde e de veículos não-verdes injetados no sistema, etc. Outro fator interessante observado para todas as situações, entre os fluxos injetados de 500 e $1500v/h$, apesar de se estar aumentado a quantidade de veículos no sistema, não se observa um aumento no tempo médio de espera, a justificativa para esse fato é que, para essa faixa de valores de fluxo de entrada e para essa geometria específica, não se está injetando uma quantidade de veículos suficiente que ocasione interações consideráveis entre eles, obtendo esse comportamento não-definido.

Para o caso 1 (análise do mecanismo *ad hoc*), observa-se um ganho (aproximadamente 19%) das simulações em que os veículos verdes apresentam o mecanismo *ad hoc* (índice 1) para aquelas em que eles não o apresentam (índice 2). Observa-se também que, para o caso onde os veículos verdes não apresentam tal mecanismo, o comportamento dos veículos verdes aproxima-se mais dos não-verdes. Para o caso 2 (análise do sentido do tráfego permitido nas vias), observa-se que o tempo médio de espera para a situação onde os sentidos permitidos para o tráfego nas vias são alternados (índice 1) é bem maior do que a outra situação (índice 2), isso acontece, pois, na situação onde os sentidos são alternados, tem-se uma aciclicidade máxima do tráfego dos veículos na rede, aumentando a quantidade de veículos que ficam trafegando por ela sem conseguir sair, enquanto na situação 2 a aciclicidade é mínima, os veículos conseguem sair “mais rapidamente” da rede.

Para as situações mostradas nas figuras 4.10 e 4.11, onde foi-se analisado o efeito da porcentagem de veículos verdes injetados no sistema, observa-se uma diminuição do tempo médio de espera ao se aumentar essa dimensão, isto é decorrente do fato que, mais veículos verdes inseridos no sistema implica em uma maior quantidade de veículos que estarão participando de um pelotão que acompanha um tapete verde, reduzindo as paradas nos sinais. Contudo, para esse fluxo de entrada de $1500v/h$, não foi-se verificado mais claramente um valor da porcentagem de veículos verdes a partir do qual eles dominam o comportamento do sistema, ao contrário do que aconteceu nos cenários 1 e 3. Acredita-se que isso tenha ocorrido pois o fluxo de entrada de $1500v/h$, para essa geometria, é relativamente baixo, não proporcionando grandes interações entre os veículos e reduzindo as chances dos veículos verdes dominarem o comportamento do sistema como um todo.

Para as situações mostradas nas Figuras 4.12 e 4.13, onde foi-se analisado o efeito da probabilidade de um veículo fazer uma curva, observa-se um aumento no tempo médio de espera dos veículos quando se aumenta essa probabilidade, isso faz com que veículos que estariam trafegando em linha reta, seguindo uma seqüência de

tapetes verdes, caso a probabilidade de se fazer uma curva seja baixa, irão entrar em vias, onde, possivelmente, não encontrarão tapetes verdes ativos ou com espaço e condições suficientes para que venham fazer parte dele.

4.3.3 Cenário 3: Grade Manhattan 2x2 Assimétrica

Este cenário simula o mecanismo da onda verde generalizada aplicado a uma grade Manhattan 2x2 com quarteirões assimétricos. Nesse cenário, foi-se analisada as mesmas situações apresentadas no Cenário 1. As dimensões dos quarteirões podem ser vistas na Figura 4.14. Mais uma vez, adotou-se o mesmo tempo de sumidouro para os mintermos: $T_0 = \dots = T_8 = 20s$ (Verde: 16s, Amarelo = 4s). Para esse cenário, a justificativa do comportamento do tempo médio de espera, ao se variar o fluxo de entrada (Figura 4.15) e a probabilidade de fazer uma curva (Figura 4.17) é semelhante ao já descrito no cenário 2, e ao se variar a porcentagem de veículos verdes (Figura 4.16) é semelhante ao já descrito no cenário 1, por isso, para esse cenário não será apresentada a Seção Comentários.

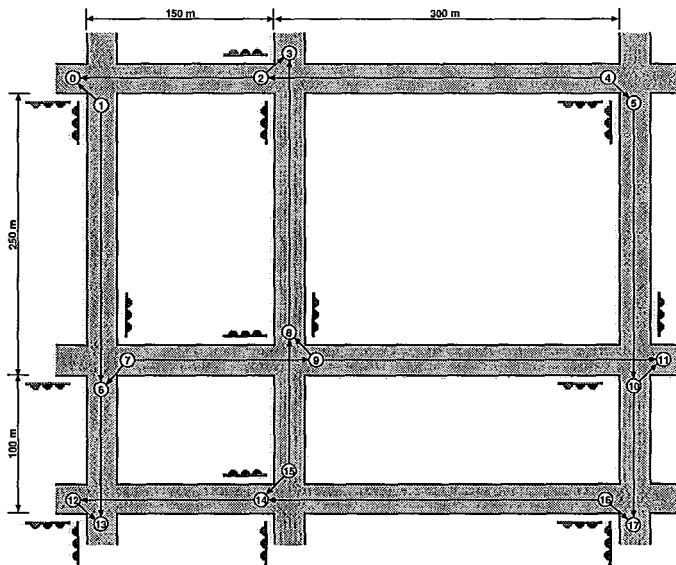


Figura 4.14: Cenário 3: Grade Manhattan 2x2 Assimétrica.

4.3.3.1 Primeira situação: Variando o fluxo de entrada

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000.

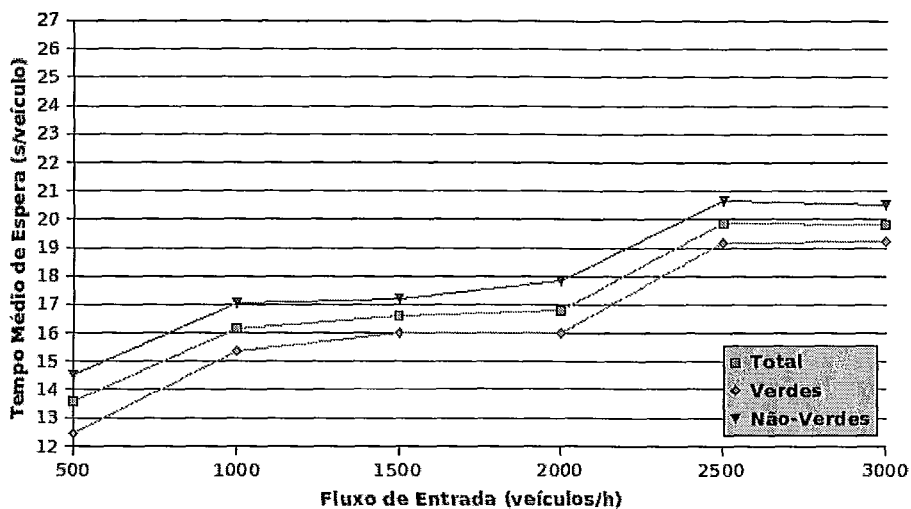


Figura 4.15: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função do fluxo de entrada.

4.3.3.2 Segunda situação: Variando a porcentagem de veículos verdes

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 20%.

Porcentagem de veículos verdes: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

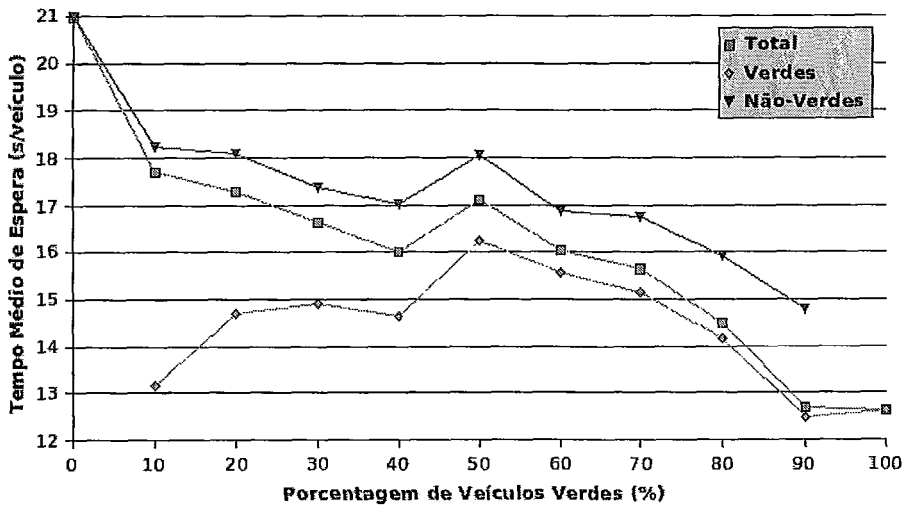


Figura 4.16: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função da porcentagem de veículos verdes.

4.3.3.3 Terceira Situação: Variando a probabilidade de fazer uma curva

Valores dos parâmetros

Probabilidade de fazer curva: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Porcentagem de veículos verdes: 50%.

Fluxos de entrada (veículos/h): 1500.

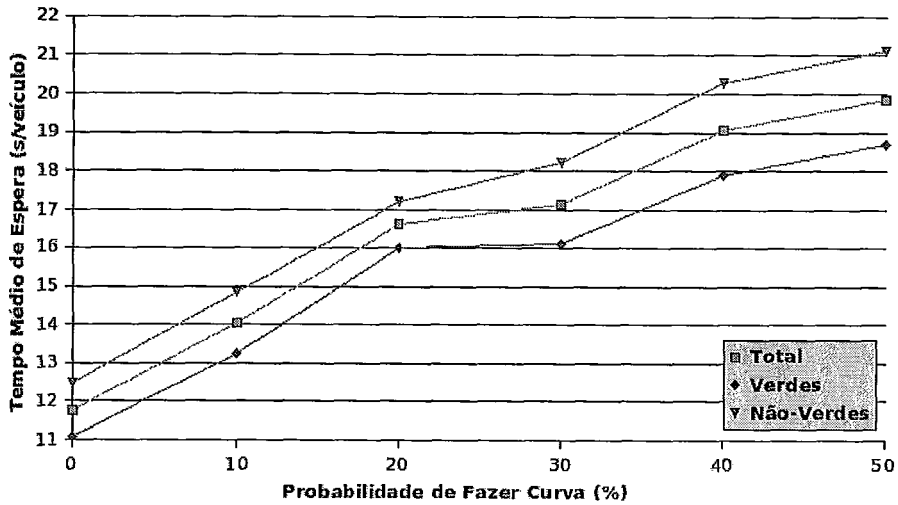


Figura 4.17: Gráfico do comportamento do tempo médio de espera para a grade Manhattan 2x2 assimétrica em função da probabilidade de fazer uma curva.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesse capítulo, na Seção 5.1, são apresentados alguns comentários finais e principais conclusões acerca do trabalho desenvolvido e, na Seção 5.2, são apresentados alguns possíveis trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O trabalho realizado teve como principal objetivo desenvolver uma nova estratégia de controle distribuído para alguns cenários em Sistemas Inteligentes de Transporte. Particularmente, foi focado o problema da sinalização e coordenação de interseções de trânsito e, posteriormente, desenvolveu-se um modelo para controlar o deslocamento de veículos em linha reta baseado em um *pipeline* assíncrono.

Essa nova estratégia mostrou-se ser um mecanismo bastante interessante para controlar a sinalização de interseções, por apresentar as seguintes características:

- **garante segurança**, pois só será dada permissão a um determinado fluxo de veículos ou pedestres trafegar pela interseção quando o mintermo associado for sumidouro, o que é uma garantia da não-existência de qualquer outro fluxo conflitante de veículos trafegando pelas mesmas regiões da interseção;

- **justo**, pois a medida em que a dinâmica do grafo de restrições for evoluindo, eventualmente, todos os mintermos terão a possibilidade de se tornar sumidouros em tempo finito;
- tem-se total liberdade em modelar diversos tipos de **interseções com geometrias variadas** e em **ajustar a granularidade da subdivisão da interseção** em regiões para se tentar obter um desempenho ótimo;
- permite que possa ser utilizada **qualquer estratégia para a determinação dos tempos dos sinais de trânsito** associados.

Posteriormente, desenvolveu-se um outro mecanismo de controle descentralizado para a coordenação da sinalização de interseções, que generalizou o conhecido paradigma da “onda verde” para uma rede de vias dispostas de maneira a se formar uma grade do tipo Manhattan. O modelo desenvolvido foi relativamente simples e desempenha o papel para o qual foi proposto. Todavia, existe uma dependência muito forte em relação aos tempos de sumidouro atribuídos aos mintermos e às distâncias entre as interseções, de modo que, dependendo dos valores desses parâmetros, as velocidades de deslocamento sugeridas e o comprimento dos tapetes verdes podem não ser factíveis.

A partir das diversas simulações e análises qualitativas da onda verde generalizada, nota-se que existe uma dependência entre a eficiência desse mecanismo e a porcentagem de veículos verdes que estão trafegando na rede. A partir de uma certa porcentagem de veículos verdes injetados no sistema é que se consegue começar a observar melhoramentos no desempenho do tráfego (redução do tempo médio de espera dos veículos verdes e não verdes), pois aumenta-se a probabilidade de que um veículo esteja dentro de um pelotão que segue um tapete verde. Observou-se também que existe uma forte dependência do desempenho do sistema em função da geometria e dos sentidos permitidos do tráfego nas vias: os comportamentos verificados para a avenida, para a grade Manhattan 5x5 simétrica (para esta situação observou-se uma

notável diferença da situação em que o sentido permitidos do tráfego nas vias é tal que se proporcione uma aciclicidade máxima para a situação em que a aciclicidade é mínima), e para a grade Manhattan 2x2 assimétrica, em algumas simulações, tiveram comportamentos bem distintos. O ganho do mecanismo *ad hoc* presente nos veículos verdes que os fazem reduzir sua velocidade para 1/8 da velocidade máxima permitida foi bem representativo, o tempo de espera foi em média 19% menor do que a situação onde eles não apresentam tal mecanismo, e, na situação onde não apresentam tal mecanismo, o comportamento dos veículos verdes e não-verdes foi mais parecido.

A modelagem inspirada no *pipeline* assíncrono para se controlar o tráfego de veículos em linha reta, mostrou-se bastante razoável, e a curto e médio prazo poderia ser utilizada para se criar um sistema distribuído anti-colisões. A aparente desvantagem desse modelo é que ele obriga que os veículos tenham uma dimensão menor do que a dimensão de uma região. Caso se queira permitir que veículos com diferentes comprimentos trafeguem por uma mesma via, para manter a corretude, o tamanho das regiões deve ser dado em função do maior comprimento de veículo possível, o que claramente irá reduzir a densidade de veículos trafegando em uma determinada via.

5.2 Trabalhos Futuros

Conforme já foi afirmado anteriormente, neste presente trabalho, iniciou-se diversos estudos relacionados à potencialidade de se utilizar o *SER* em diversos aspectos de Sistemas Inteligentes de Transportes. Como ele mostrou ser um mecanismo bastante promissor para esse fim, várias extensões podem ser imaginadas e propostas. Essas extensões podem ser agrupadas em trabalhos a curto prazo, que seriam aperfeiçoamentos específicos e mais imediatos das simulações e modelagens realizadas; e trabalhos a médio e longo prazo, que seriam novas abordagens, e outros cenários

em que o *SER*, ou alguma de suas generalizações, poderiam estar sendo aplicados ao contexto de Sistemas Inteligentes de Transporte.

Curto Prazo

Sinalização de Interseções

- Utilizar alguma técnica inteligente, que determine dinamicamente os tempos de abertura dos sinais, e aplicá-la na determinação dos tempos de sumidouro dos minitermos e investigar o comportamento do sistema.
- Realizar estudos sobre o impacto de se integrar o tráfego de veículos e pedestres no mesmo esquema de sinalização utilizando o *SER*.
- Utilizar o modelo de sinalização desenvolvido para interseções com outras geometrias.

Onda Verde Generalizada

- Investigar acerca do efeito de se considerar $T_{ra} = 0$ no cálculo do tempo de deslocamento da onda verde e, possivelmente, propor alternativas para a determinação desse parâmetro, como, por exemplo, realizando uma média dos valores anteriores.
- Otimizar o modelo;
- Desenvolver um mecanismo de suavização de velocidade para a onda verde generalizada, caso a diferença de velocidade entre duas ondas verdes consecutivas seja elevado.
- Estender o conceito da onda verde generalizada, para vias com uma faixa apresentado nesse trabalho, para cenários onde existam vias com duas faixas.

- Pesquisar acerca de um mecanismo mais eficiente, do que o mecanismo *ad hoc* utilizado, para o comportamento dos veículos verdes quando estes não fizerem parte de um tapete verde.
- Estender o mecanismo da onda verde generalizada para uma rede de vias com geometrias diferentes de uma grande Manhattan.

Médio/Longo Prazo

- Avançar nos estudos acerca da modelagem inspirada no *pipeline* assíncrono: investigar os tempos de sumidouro mais apropriados e estender o conceito para se realizar o cruzamento de *pipelines* em interseções.
- Realizar estudo da aplicação das generalizações do *SER*, o *SMER* e o *SER^H*, para Sistemas Inteligentes de Transporte. Uma aplicação onde poderia ser utilizado o *SER^H*, por exemplo, é no controle de uma interseção onde algumas das vias de acesso passam longos períodos sem apresentar tráfego de veículos (operação em quase alta carga), o mintermo associado ao sinal daquela via, pode entrar em um estado de hibernação, sendo acordado por um mintermo vizinho quando da aproximação de veículos. Uma aplicação onde poderia estar sendo aplicado o *SMER* seria em interseções onde deseja-se priorizar o tráfego de veículos em uma determinada direção em detrimento das outras, por exemplo, no caso de uma grande avenida e suas vias de acesso, onde os mintermos associados aos sinais da avenida poderiam ter prioridade sobre aqueles associados às vias de acesso.
- Realizar estudo da aplicação do *SER* e suas generalizações para se controlar o tráfego no solo de uma plataforma aeroportuária [24] [25] Acredita-se que sejam mecanismos promissores também para esse fim, pois esse cenário apresenta algumas situações semelhantes ao descrito nesse trabalho, como:

- veículos distintos estão competindo pelo direito de passagem em regiões diversas da plataforma aeroportuária;
- deve-se garantir que apenas um veículo esteja trafegando em uma determinada região;
- deve-se dar prioridade ao deslocamento de certos tipos de veículos em detrimento de outros (por exemplo, aeronaves em trânsito têm sempre prioridade sobre os demais veículos que trafegam no solo de uma plataforma aeroportuária).

Referências Bibliográficas

- [1] “Transyt-7f users guide”, tech. rep., Transportation Research Center - University of Florida, 1998.
- [2] G. BALAN AND S. LUKE, “Cooperation and coordination: History-based traffic control”, in *Proceedings of the Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2006.
- [3] V. C. BARBOSA, *An Introduction to Distributed Algorithms*. The MIT Press, 1 ed., 1996.
- [4] V. C. BARBOSA, *Models for Parallel and Distributed Computation. Theory, Algorithmic Techniques and Applications*, ch. The Combinatorics of Resource Sharing, pp. 27–52. 2002.
- [5] V. C. BARBOSA AND E. GAFNI, “Concurrency in heavily loaded neighborhood-constrained systems”, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, vol. 11, pp. 562–584, 1989.
- [6] V. C. BARBOSA, *Concurrency in Systems with Neighborhood Constraints*. PhD thesis, University of California, Los Angeles, 1986.
- [7] V. BARBOSA, M. BENEVIDES, AND F. FRANÇA, “Sharing resources at nonuniform access rates”, *Theory of Computing Systems*, vol. 34, pp. 13–26, 2001.

- [8] D. CARVALHO, F. PROTTI, M. D. GREGORIO, *et al.*, “A novel distributed scheduling algorithm for resource sharing under near-heavy load”, in *Proceedings of OPODIS 2004, Lecture Notes in Computer Science*, 2004.
- [9] D. CHEN, Z. LI, AND L. ZHANG, “Tep, a traffic signal control algorithm based on knowledge and its simulation using rte”, in *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2004.
- [10] M. A. CHOWDHURY AND A. W. SADEK, *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. Artech House Its Library, 1 ed., 2003.
- [11] D. M. DE ARAÚJO CARVALHO, “Escalonamento distribuído por reversão de arestas com reconfiguração dinâmica de carga”, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [12] R. DE FREIRE CASSIA, *Uma Metodologia Automatizável para Conversão Síncrono-Assíncrono de Circuitos Digitais*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [13] D. DE OLIVEIRA, A. L. C. BAZZAN, AND V. LESSER, “Using cooperative mediation to coordinate traffic lights: A case study”, in *Proceedings of the Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2005.
- [14] D. DE OLIVEIRA, P. R. FERREIRA, A. L. BAZZAN, *et al.*, “A swarm-based approach for selection of signal plans in urban scenarios”, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 31, pp. 416–417, 2004.
- [15] F. M. G. FRANÇA, *Neural Networks as Neighborhood-Constrained Systems*. PhD thesis, Imperial College, 1994.
- [16] U. KARAASLAN, P. VARAIYA, AND J. WALRAND, “Two proposals to improve freeway traffic flow”, in *Proceedings of the American Control Conference*, 1991.

- [17] J. K. KAWAHARA, “Controle de tráfego urbano: Avaliação e desenvolvimento de sistemas atuados”, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1983.
- [18] B. J. LUSTOSA, “O controle de tráfego em Área dos planos de sinalização”, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981.
- [19] J. NIITYMAKI AND R. NEVALA, “Fuzzy adaptive traffic signal control-principles and results”, in *Proceedings of the IFSA World Congress*, 2001.
- [20] C. PAPPIS AND E. MANDAMI, “A fuzzy logic controller for a traffic junction”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 7, pp. 707–717, 1977.
- [21] D. A. PATTERSON AND J. L. HENNESSY, *Computer Organization and Design - The Hardware / Software Interface*. Morgan Kaufmann, 3 ed., 2005.
- [22] S. G. ROJO, J. G. SLAMA, A. L. PEREIRA, AND F. MORA-CAMINO, “A fuzzy logic approach for car-following modelling”, *Systems Analysis Modelling Simulation*, vol. 42, pp. 735–755, 2002.
- [23] I. B. SOARES, “Sinalização de interseções utilizando escalonamento por reversão de arestas”. <http://www.lam.ufrj.br/~ivomar/applet/>, Julho 2007.
- [24] D. STOICA, A. ACHAIBOU, C. COSENZA, AND F. MORA-CAMINO, “Improved efficiency and security by advanced aircraft ground traffic control”, in *The 10th World Conference on Transportation Research Society*, 2004.
- [25] D. STOICA, A. ACHAIBOU, M. DE COLIGNY, AND F. MORA-CAMINO, “A new model for airport ground traffic flow management”, in *CORS/INFORMS Joint International Meeting*, 2004.

- [26] M. TOMIZUKA, “Automated highway systems - an intelligent transportation system for the next century”, in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1997.
- [27] M. TREIBER, “Microsimulation of road traffic”. <http://www.traffic-simulation.de/>, Junho 2007.
- [28] M. TREIBER, A. HENNECKE, AND D. HELBING, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Physical Review E*, vol. 62, pp. 1805–1824, 2000.
- [29] B. UNIVERSITY OF CALIFORNIA, “California path - california partners for advanced transit and highways”. <http://www.path.berkeley.edu/>, Julho 2007.
- [30] B. VAN AREM, A. DE VOS, AND M. VANDERSCHUREN, “The effect of a special lane for intelligent vehicles on traffic flows. an exploratory study using the microscopic traffic simulation model mixic”, tech. rep., Institute of Infrastructure, Transport and Regional Development - University of Twente, 1997.
- [31] B. VAN AREM, C. J. G. VAN DRIEL, AND R. VISSER, “The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, pp. 429–436, 2006.
- [32] L. ZANG, L. JIA, AND Y. LUO, “An intelligent control method for urban traffic signal based on fuzzy neural network”, in *Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006.
- [33] X. ZHANG, “Intelligent driving - prometheus approaches to longitudinal traffic flow control”, in *Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, 1991.
- [34] P. ZWANEVELD AND B. VAN AREM, “Traffic effects of automated vehicle guidance systems”, tech. rep., Institute of Infrastructure, Transport and Regional Development - University of Twente, 1998.