

RODRIGO CASTELAN CARLSON

**APLICAÇÃO DE MAXIMIZAÇÃO DE LARGURA DE
BANDA NO CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO EM
TEMPO-REAL**

FLORIANÓPOLIS

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE MAXIMIZAÇÃO DE LARGURA DE
BANDA NO CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO EM
TEMPO-REAL**

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

RODRIGO CASTELAN CARLSON

Florianópolis, Março de 2006

APLICAÇÃO DE MAXIMIZAÇÃO DE LARGURA DE BANDA NO CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO EM TEMPO-REAL

Rodrigo Castelan Carlson

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

Werner Kraus Junior, Ph.D.
Orientador

Eduardo Camponogara, Ph.D.
Co-Orientador

Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Sergio Henrique Demarchi, Dr.

Edson Roberto de Pieri, Dr.

Ubirajara Franco Moreno, Dr.

Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.

Ao meu pai e à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Para não cometer a injustiça de esquecer o nome de alguém, coloquei poucos nomes aqui e preferi destacar os “grupos” de origem destes amigos. Aqueles que contribuíram saberão se enquadrar em algum dos grupos.

Agradecimento ao meu orientador Prof. Werner Kraus Junior e ao meu co-orientador Prof. Eduardo Camponogara.

Ao meu pai Renato, e meus irmãos Augusto, Luiz Henrique e Victor Emmanuel. Aos meus demais familiares também.

Diversos amigos participaram de uma forma ou de outra do desenvolvimento deste trabalho, os amigos do Projeto SInCMobil/Contreal, os amigos do Movimento Escoteiro, os amigos da Turma 98/2 de Engenharia de Controle e Automação da UFSC, os amigos da Turma 98/2 de Administração da ESAG, os amigos da escalada e montanhismo e os amigos ex-nadadores. Os amigos do DAS e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

A utilização da estratégia de controle de tráfego urbano TUC foi possível graças à gentil cooperação do Professor Markos Papageorgiou e Dr. Elias Kosmatopoulos do Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Simulação da Universidade Técnica de Creta e da Dra. Vaya Dinopoulou do Instituto Técnico de Educação do Oeste da Macedônia, na Grécia.

Ao meu cachorro Rudolf que me permitiu aprender coisas que com seres humanos eu não teria aprendido.

À BRASCONTROL pela participação no projeto Contreal.

À CAPES pela bolsa de mestrado e ao CNPq pelo apoio ao estabelecimento de parceria com a Universidade Técnica de Creta.

Por que ter um cão?

Para que ao chegar em casa
seja saudado por alguém que o ame
e crê não poder viver sem você.

Para que ele o ensine
a acreditar nos seus semelhantes.

Para que você aprenda
a viver sem egoísmo
e seja responsável por alguém
que depende de você
e nunca reclama.

Para que não se esqueça
de que na vida também
é preciso brincar,
como ele faz.

Para ter um alarme vivo
e um policial que não dorme.

Porque o cão
é o único amor verdadeiro
que o dinheiro
pode comprar. (Will Judy)¹

¹Retirei este texto do seguinte endereço, <<http://www.muraljoia.com.br/02tporquetercao.htm>> que não faz referência ao texto original em inglês, mas a primeira vez que o li foi numa historinha do Franjinha e do Bidu em um gibi da Turma da Mônica muitos anos atrás.

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

APLICAÇÃO DE MAXIMIZAÇÃO DE LARGURA DE BANDA NO CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO EM TEMPO-REAL

Rodrigo Castelan Carlson

Março/2006

Orientador: Werner Kraus Junior, Ph. D.

Co-Orientador: Eduardo Camponogara, Ph. D.

Área de Concentração: Automação e Sistemas

Palavras-chave: Controle de Tráfego Urbano, Maximização de Largura de Banda, Controle Realimentado

Número de Páginas: 135

O módulo de controle de defasagem da estratégia *Traffic-responsive Urban Control* - TUC para controle em tempo-real de tráfego urbano é substituído por um método de maximização de largura de banda. A maximização de largura de banda é realizada em tempo-real, baseada nas mudanças das porcentagens de verde e do tempo de ciclo. Em vias arteriais é desejável, por operadores de tráfego e motoristas, uma boa progressão veicular. Técnicas de maximização de largura de banda são largamente utilizadas em sistemas de planos a tempos fixos para favorecer a progressão veicular em vias arteriais. No controle em tempo-real a utilização destas técnicas não foi explorada. Simulações em uma via arterial com cinco interseções foram realizadas. Os resultados indicam que o desempenho desta estratégia é comparável com a estratégia de controle TUC e superior à estratégia de tempo fixo ajustada otimamente.

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

APPLICATION OF BANDWIDTH MAXIMISATION IN REAL-TIME URBAN TRAFFIC CONTROL

Rodrigo Castelan Carlson

March/2006

Advisor: Werner Kraus Junior, Ph. D.

Co-Advisor: Eduardo Camponogara, Ph. D.

Area of Concentration: Automation and Systems

Keywords: Urban Traffic Control, Bandwidth Maximisation, Feedback Control

Number of Pages: 135

The offset control module of the *Traffic-responsive Urban Control* - TUC strategy for urban traffic control is replaced by a bandwidth maximisation method. Bandwidth maximisation is performed online based on split and cycle changes. From the point of view of drivers and traffic engineers, it is often desirable a good progression in arterial networks. Techniques of bandwidth maximisation are widely used in fixed-time plan systems to provide progression in arterial networks. In real-time control the use of these techniques was not explored. Simulations of a five junction arterial were carried out with results indicating that performance is comparable to the TUC strategy and superior to optimally adjusted fixed-time plans.

Sumário

1	Introdução	1
2	Técnicas de Coordenação Semafórica a Tempos Fixos	6
2.1	Técnicas que maximizam largura de banda	6
2.1.1	Sincronizando Sinais de Tráfego para Obtenção de Bandas de Largura Máxima	8
2.1.2	Sincronização de Sinais de Tráfego via Programação Linear Inteira Mista . .	13
2.1.3	MAXBAND	17
2.1.4	MULTIBAND	25
2.2	Técnicas que minimizam critérios de tráfego	30
2.2.1	TRANSYT	30
2.3	Outras Técnicas	32
3	Combinação do Método de Morgan e Little e da Estratégia TUC	34
3.1	TUC	35
3.2	Discussão da abordagem proposta	48
3.2.1	Mudanças de defasagem de meio tempo de ciclo	48
3.2.2	Sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças nas porcentagens de verde	49
3.2.3	Sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças no tempo de ciclo . .	50
3.3	Aspectos de Implementação Computacional	51

4	Simulações	53
4.1	Simulador de Tráfego SITRA-B+	53
4.1.1	Características gerais do modelo de simulação	54
4.1.2	Modos de funcionamento do SITRA	56
4.1.3	Modelo de Tráfego	57
4.2	Malha viária simulada	59
4.3	Simulações e resultados	60
4.3.1	Conjunto de Simulações 1	61
4.3.2	Conjunto de Simulações 2	65
4.3.3	Conjunto de Simulações 3	67
4.3.4	Conjunto de Simulações 4	69
4.3.5	Conjunto de Simulações 5	73
5	Conclusões e Perspectivas	81
A	Terminologia	84
A.1	Aproximação	84
A.2	Banda de verde	85
A.3	Capacidade (da interseção)	85
A.4	Concentração (k)	85
A.5	Coordenação	85
A.6	Defasagem	85
A.7	Densidade	86
A.8	Estágio	86
A.9	Fase	86

A.10 Fluxo (q)	87
A.11 Fluxo de Saturação (s)	87
A.12 Grau de Saturação (x)	87
A.13 <i>Headway</i>	88
A.14 Largura de banda de verde	88
A.15 Ocupação (y)	88
A.16 Porcentagens de verde (frações de verde)	88
A.17 Sincronização	88
A.18 Tempo de Ciclo (C)	89
A.19 Tempo perdido (L)	89
A.20 Verde efetivo (g_{ef})	89
A.21 Via (<i>Link</i>)	90
A.22 Volume	90
B Algoritmo do Método de Morgan e Little	91
C Método de Webster para Temporização Semafórica	94
C.1 Procedimento para aplicação do método de Webster	94
C.2 Exemplo de aplicação	95
D Sistemas de Controle de Tráfego Urbano em Tempo-Real	97
D.1 Sistemas Acíclicos	98
D.1.1 ALLONS-D	100
D.1.2 CRONOS	102
D.1.3 OPAC	103
D.1.4 PRODYN	104

D.1.5	RHODES/REALBAND	105
D.2	Sistemas Cíclicos	110
D.2.1	SCATS	110
D.2.2	SCOOT	112
E	Gráficos de Resultados	114
E.1	Conjunto de Simulações 1	114
E.1.1	Resultados Globais	114
E.1.2	Resultados da Arterial	116
E.2	Conjunto de Simulações 2	117
E.2.1	Resultados Globais	117
E.2.2	Resultados da Arterial	119
E.3	Conjunto de Simulações 3	119
E.3.1	Resultados Globais	120
E.3.2	Resultados da Arterial	121
E.4	Conjunto de Simulações 4	122
E.4.1	Resultados Globais	122
E.4.2	Resultados da Arterial	124
E.5	Conjunto de Simulações 5	127
E.5.1	Resultados Globais	127
E.5.2	Resultados da Arterial	128

Lista de Figuras

1.1	Via arterial com filas formadas nas interseções.	2
1.2	Diagramas espaço-tempo.	4
2.1	Diagrama espaço-tempo para uma arterial com bandas iguais em ambos os sentidos (adaptada de [32]).	7
2.2	Diagrama espaço-tempo geral do problema (adaptada de [32]).	9
2.3	Diagrama espaço-tempo para uma arterial com bandas máximas desiguais (adaptada de [32]).	13
2.4	Geometria do problema de maximização de largura de bandas (adaptada de [30]). . .	14
2.5	Geometria para a formulação de MAXBAND (adaptada de [31]).	19
2.6	Padrões de fases de conversão à esquerda (adaptada de [31]).	22
2.7	Diagrama espaço-tempo para bandas obtidas através de MAXBAND (adaptada de [19]).	25
2.8	Geometria para formulação do problema MULTIBAND (adaptada de [19]).	27
2.9	Diagrama espaço-tempo obtido com MULTIBAND (adaptada de [19]).	28
3.1	Arquitetura funcional TUC (adaptada de [11]).	36
3.2	Modelagem simplificada dos fluxos de saída das vias (adaptada de [9]).	39
3.3	Via urbana (adaptada de [10]).	40
3.4	Via z com fila (em cinza) (adaptada de [11]).	45
3.5	Mudança de defasagem de meio tempo de ciclo.	49

3.6	Mudança do tempo de verde.	50
3.7	Largura da banda como função do tempo de ciclo.	50
4.1	Elementos da modelagem com SITRA.	56
4.2	Exemplo de aplicação do modelo de tráfego do SITRA.	59
4.3	Aspecto geral da malha viária simulada.	59
4.4	Diagramas espaço-tempo do Conjunto de Simulações 1.	64
4.5	Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 4.	70
4.6	Tempo de Ciclo ao longo das simulações do Conjunto de Simulações 4.	73
4.7	Tempo de Ciclo ao longo das simulações do Conjunto de Simulações 5.	80
A.1	Exemplo de aproximação em interseção.	84
A.2	Exemplo de defasagem de três interseções.	86
A.3	Exemplo de ciclo, estágios e fases.	87
A.4	Variação da descarga de veículos com verde totalmente saturado.	89
C.1	Interseção exemplo.	95
D.1	Horizonte deslizante (adaptada de [37]).	99
D.2	Espaço de soluções.	100
D.3	Estrutura em duas camadas de ALLONS-D (adaptada de [37]).	101
D.4	Estrutura VFC-OPAC em três camadas (adaptada de [22]).	105
D.5	Estrutura do sistema RHODES (adaptada de [25]).	106
D.6	Módulos do protótipo RHODES (adaptada de [25]).	107
D.7	Exemplo para ilustrar REALBAND (adaptada de [25]).	108
D.8	Bandas REALBAND (adaptada de [25]).	109

E.1	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Velocidade Média (km/h).	115
E.2	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Total de Viagem (h).	115
E.3	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Distância Total Percorrida (km).	115
E.4	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Número de Paradas/veh.	115
E.5	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Parado (s/veh).	116
E.6	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Velocidade Média (km/h).	116
E.7	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Tempo de Viagem (s).	116
E.8	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Número de Paradas.	117
E.9	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Parado (s).	117
E.10	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Velocidade Média (km/h).	117
E.11	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Total de Viagem (h).	117
E.12	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Distância Total Percorrida (km).	118
E.13	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Número de Paradas/veh.	118
E.14	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Parado (s/veh).	118
E.15	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Velocidade Média (km/h).	119
E.16	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Tempo de Viagem (s).	119
E.17	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Número de Paradas.	119
E.18	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Parado (s).	119
E.19	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Velocidade Média (km/h).	120
E.20	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Total de Viagem (h).	120
E.21	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Distância Total Percorrida (km).	120
E.22	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Número de Paradas/veh.	120
E.23	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Parado (s/veh).	121
E.24	Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Velocidade Média (km/h).	121

E.25 Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Tempo de Viagem (s).	121
E.26 Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Número de Paradas.	122
E.27 Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Parado (s).	122
E.28 Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).	122
E.29 Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Total de Viagem (h).	122
E.30 Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Distância Total Percorrida (km).	123
E.31 Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas/veh.	123
E.32 Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s/veh).	123
E.33 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).	124
E.34 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).	124
E.35 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.	124
E.36 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).	124
E.37 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).	125
E.38 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).	125
E.39 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.	125
E.40 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).	125
E.41 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).	126
E.42 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).	126
E.43 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.	126

E.44 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).	126
E.45 Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).	127
E.46 Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Total de Viagem (h).	127
E.47 Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Distância Total Percorrida (km).	127
E.48 Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas/veh.	127
E.49 Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s/veh).	128
E.50 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).	128
E.51 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).	128
E.52 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.	129
E.53 Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).	129
E.54 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).	129
E.55 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).	129
E.56 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.	130
E.57 Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).	130
E.58 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).	130
E.59 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).	130
E.60 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.	131
E.61 Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).	131

Lista de Tabelas

3.1	Dados do exemplo.	51
3.2	Conjuntos de sincronização para o exemplo.	51
4.1	Resumo das simulações realizadas.	62
4.2	Plano a tempos fixos para o Conjunto 1.	62
4.3	Resultados globais do Conjunto de Simulações 1.	63
4.4	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 1 (p/ veh).	65
4.5	Fluxo nas pistas arteriais para o Conjunto de Simulações 2.	66
4.6	Plano a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 2.	66
4.7	Resultados globais do Conjunto de Simulações 2.	66
4.8	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 2 (p/ veh).	67
4.9	Taxas de conversão à direita da arterial para o Conjunto de Simulações 3.	68
4.10	Plano a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 3.	68
4.11	Resultados globais do Conjunto de Simulações 3.	68
4.12	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 3.	69
4.13	Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 4 (veh/h).	70
4.14	Planos a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 4.	71
4.15	Resultados globais do Conjunto de Simulações 4.	72
4.16	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 4.	72

4.17	Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 5 (veh/h).	74
4.18	Planos a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 5.	75
4.19	Resultados globais do Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com três planos otimamente ajustados.	75
4.20	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com três planos otimamente ajustados.	77
4.21	Resultados globais do Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com um plano otimamente ajustado.	78
4.22	Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com um plano otimamente ajustado.	79
C.1	Dados do exemplo.	96
D.1	Resumo dos principais sistemas de controle de tráfego em tempo real.	98

Capítulo 1

Introdução

Despite the long-lasting research and development worldwide, co-ordinated urban traffic control is still an area susceptible to further significant improvements.

C. Bielefeldt, C. Diakaki and M. Papageorgiou [1]

A semaforização de interseções em malhas viárias urbanas é indispensável como ferramenta para o gerenciamento de conflitos, segurança e fluidez do tráfego. Frequentemente deseja-se realizar a coordenação entre interseções adjacentes. Considere a Figura 1.1. Observa-se que nas interseções há carros acumulados, formando filas nas pistas da arterial. Estes veículos pararam porque vieram de vias transversais e ao chegarem na interseção o sinal estava vermelho ou, porque vinham progredindo pela via arterial e ao chegarem na interseção o sinal estava vermelho. Com a coordenação apropriada dos semáforos é possível minimizar o número de veículos que saem, por exemplo, do ponto (A) e querem ir ao ponto (B), mas são forçados a parar em interseções intermediárias. Isto é desejável pois paradas sucessivas em arteriais são irritantes e desconfortáveis para os motoristas.

Dois grupos de métodos de coordenação podem ser levantados. No primeiro, o foco está na coordenação das indicações semaforicas sem considerar explicitamente os fenômenos de tráfego. Os trabalhos de Morgan e Little [35] e de Little [30] a respeito de métodos de maximização de largura de banda em arteriais se enquadram como os mais conhecidos nesta classe. Generalizações destes para incluir otimização de fases de conversão à esquerda e coordenação de malhas triangulares, entre outras melhorias, deram origem ao MAXBAND [31]. MULTIBAND [19] é similar ao MAXBAND, mas capaz de ajustar a largura da banda a padrões de fluxos específicos atribuindo pesos a cada segmento da via, gerando assim uma largura de banda variável.

O outro grupo de métodos de coordenação usa modelos de tráfego e algoritmos de otimização

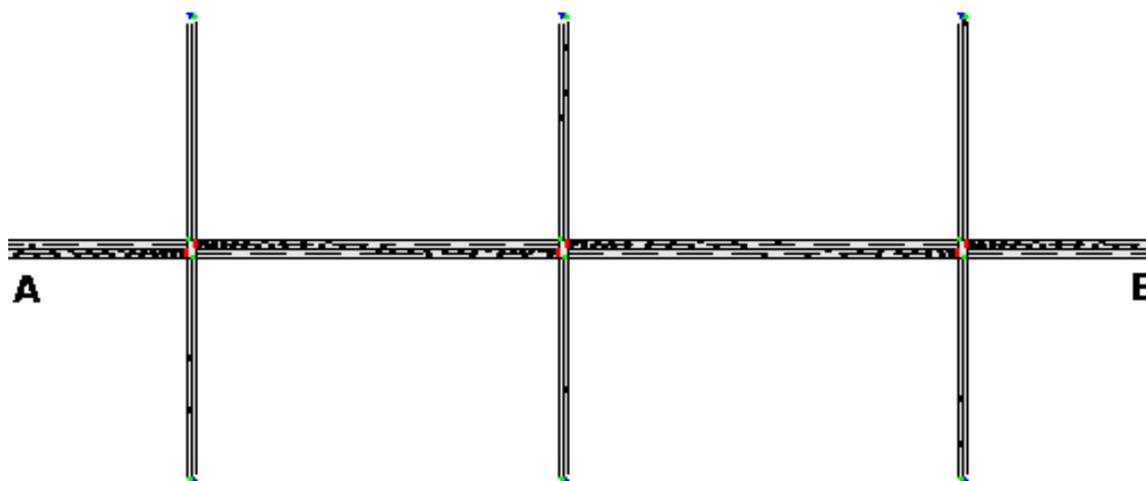


Figura 1.1: Via arterial com filas formadas nas interseções.

para coordenar os semáforos através da otimização de critérios como número de paradas e atraso veicular. TRANSYT [6] é provavelmente o mais conhecido nesta classe. A natureza do segundo grupo de métodos, onde a otimização leva em consideração aspectos do tráfego não considerados no primeiro grupo, de maneira geral não produz larguras de bandas máximas em vias arteriais.

Os métodos descritos acima foram projetados para operação de planos a tempos fixos. De maneira a permitir a resposta a variações de fluxo em tempo-real, nas décadas de 80 e 90 diversos sistemas de controle em tempo-real ¹ foram desenvolvidos. Sistemas baseados nos conceitos de porcentagens de verde, ciclo e defasagem, também conhecidos como sistemas cíclicos, incluem SCOOT [41], SCATS [33] e TUC [11].

Outra abordagem, baseada em modelos dinâmicos de tráfego e estratégias de otimização com horizonte deslizante, ou sistemas acíclicos, levou a sistemas como PRODYN [15], OPAC [18] e RHODES [25]. Sistemas acíclicos são computacionalmente complexos e portanto, têm operação local e descentralizada [10].

Todos os sistemas de controle em tempo-real incluem mecanismos para obter a coordenação semafórica, explícita ou implicitamente. Entretanto, ainda que largamente utilizada em sistemas a

¹O termo “tempo-real” refere-se aqui aos sistemas que fazem medidas em tempo-real e decidem/calculam uma ação de controle para o próximo período. Sistemas de controle de tráfego em tempo-real também são chamados de sistemas de controle *online* em contraposição aos sistemas a tempos fixos ou *offline* que não fazem o uso de medidas em tempo-real. Na literatura em língua inglesa, o termo *actuated* (em português, atuado) refere-se de maneira geral a sistemas que fazem alocação dinâmica de planos, ou seja, sistemas que já tem os planos pré-programados e que, com base nas medidas em tempo real, escolhem qual plano aplicar ao invés de calcular um plano ou ação de controle. Garbacz [16] chama os sistemas atuados de *responsive*, e os sistemas em tempo-real de *adaptive*. A estratégia de controle TUC utilizada neste trabalho tem a palavra *responsive* em seu nome, entretanto de acordo com a definição de Garbacz ela é uma estratégia de controle *adaptive*, e no conceito adotado aqui, é uma estratégia de controle em tempo-real.

tempos fixos, a maximização de largura de banda ainda não foi implementada em sistemas de controle de tráfego em tempo-real.

Na literatura, Jovanis e Gregor [28] desenvolveram uma metodologia para obter planos de coordenação a serem utilizados em sistemas de alocação dinâmica de planos, mas a abordagem difere da apresentada neste trabalho já que a atuação está limitada a variações das porcentagens de verde baseadas em medidas locais. O sistema RHODES utiliza uma estratégia de coordenação chamada REALBAND [7]. Ainda que esta estratégia busque por bandas baseadas em largura de pelotões, REALBAND não é um método de maximização de largura de banda. A banda resultante é obtida através de um procedimento que otimiza um critério de desempenho depois de propagar pelotões preditos, por meio de um modelo de tráfego para um dado horizonte de tempo.

Os métodos de maximização de largura de banda são preferidos por motoristas e operadores de tráfego por várias razões. Do ponto de vista dos motoristas, estes parecem preferir abdicar de um pouco de tempo desde que parem menos nas arteriais [32]. Do ponto de vista dos operadores, estes métodos são tecnicamente melhores de operar pois recebem poucas entradas e são facilmente visualizados em diagramas espaço-tempo [31].

A estratégia de controle de tráfego utilizada neste trabalho é a *Traffic-Responsive Urban Control* - TUC [10, 11], que implementa o controle de porcentagens de verde, ciclo e defasagem. Em experimentos de campo, o desempenho de TUC é comparável a outras estratégias bem conhecidas como, por exemplo, SCOOT [1]. TUC não foi projetado especificamente para coordenação de arteriais nos dois sentidos. O cálculo da defasagem em vias de mão dupla é realizado de maneira *ad-hoc*.

A Figura 1.2 apresenta diagramas espaço-tempo para um via arterial com cinco interseções. O diagrama (a) refere-se a aplicação de um plano a tempos fixos calculado com uma técnica de maximização de largura de banda. O diagrama (b) refere-se à aplicação da estratégia de controle TUC. Os diagramas espaço-tempo representam no eixo vertical as distâncias entre as interseções da via, e no eixo horizontal o tempo. As linhas horizontais representam os sinais em vermelho, e a ausência delas os sinais em verde. As linhas diagonais representam, da esquerda para a direita o percurso do primeiro e do último veículo a obter banda de verde. A distância no tempo entre estas duas linhas é a largura da banda. A leitura do diagrama de cima para baixo e da esquerda para a direita representa os veículos em um sentido, enquanto a leitura de baixo para cima e da esquerda para a direita representa os veículos no sentido oposto. A inclinação da reta representa a velocidade destes veículos. No diagrama (b) que representa a aplicação da estratégia TUC, as bandas desenhadas (barras diagonais) são ilustrativas, para mostrar que veículos neste caso têm pouca ou nenhuma progressão, quando comparadas com o plano de tempo fixo do diagrama (a).

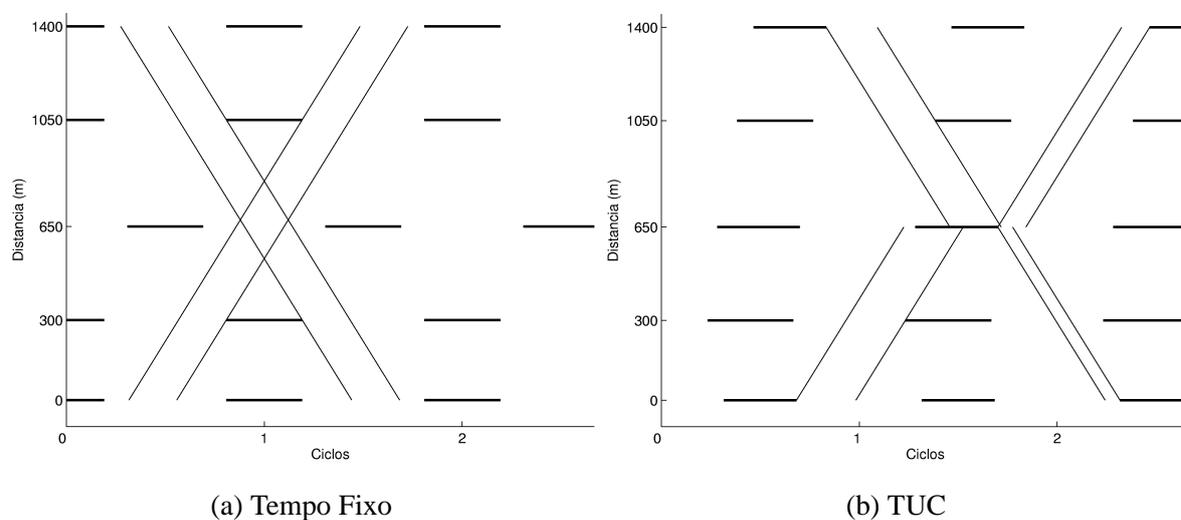


Figura 1.2: Diagramas espaço-tempo.

Tendo em vista o fato de TUC não ter sido projetado especificamente para coordenação em vias arteriais de mão dupla, o objetivo deste trabalho é obter uma estratégia de controle de tráfego em tempo-real que realiza a coordenação semafórica por meio da maximização de largura de banda. Será investigada a utilização de um método de maximização de largura de banda para o cálculo das defasagens para a estratégia TUC. O método de Morgan e Little tem as características necessárias para este trabalho devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação, quando comparado a outros métodos que exigem utilização de algoritmos complexos de otimização. TUC é eficiente, sua simplicidade permite aplicação centralizada, e sua modularidade permite substituição do módulo de controle de defasagem. A combinação de TUC com o método de Morgan e Little será doravante denominada TUC-ML. A estratégia de controle TUC está sendo utilizada em parceria com a Universidade Técnica de Creta, Grécia.

O desempenho da estratégia TUC-ML é avaliada por meio de estudo de simulação em uma via arterial, uma vez que interessa realçar os efeitos de progressão veicular neste estudo. Para fins de comparação dois outros controles semafóricos são estudados: TUC com o módulo de controle de defasagem original, e planos a tempos fixos otimamente ajustados. Como conclusão dos estudos, verificou-se um melhor desempenho das estratégias TUC e TUC-ML com relação à estratégia a tempos fixos. TUC-ML provê melhor progressão que TUC sem perda de desempenho.

Este documento está organizado como segue. O Capítulo 2 apresenta as principais técnicas de coordenação semafórica a tempos fixos. A estratégia de controle em tempo-real TUC e abordagem de coordenação em tempo-real proposta neste trabalho são apresentadas no Capítulo 3. O Capítulo 4

apresenta as simulações realizadas e seus resultados. As conclusões e perspectivas são apresentadas no Capítulo 5.

Como este trabalho está aplicado ao controle de tráfego urbano, o Apêndice A traz alguns termos da área para esclarecimento. Os Apêndices B e C descrevem os métodos de Morgan e Little [35], e de Webster [44], respectivamente, que serão referenciados em momento apropriado ao longo do trabalho. O Apêndice D apresenta os principais sistemas de controle de tráfego urbano em tempo-real, com ênfase nos seus aspectos de coordenação semafórica. Finalmente, o Apêndice E apresenta os gráficos correspondentes aos resultados de simulação apresentados em tabelas no Capítulo 4.

Capítulo 2

Técnicas de Coordenação Semafórica a Tempos Fixos

The calculation of offsets to give maximal bandwidth is an easy job, thanks to computers.

J. D. C. Little, B. V. Martin and J. T. Morgan [32]

As técnicas de coordenação/sincronização semafórica a tempos fixos podem ser divididas em dois grupos: i) as que realizam otimização (maximização) de largura de banda; e ii) as que otimizam algum critério de tráfego, como atraso e número de paradas. As seções seguintes apresentam os princípios básicos de cada um dos grupos, detalhando o funcionamento de algumas das técnicas mais conhecidas e difundidas.

2.1 Técnicas que maximizam largura de banda

Os semáforos podem ser coordenados de maneira que um veículo que receba sinal verde em um extremo de uma arterial, trafegando em velocidades pré-determinadas, possa percorrer a arterial até a outra extremidade sem parar em sinal vermelho durante o trajeto, desde que o tempo de ciclo seja o mesmo para todas as interseções do trajeto e não haja filas longas nos cruzamentos a jusante. A porção do ciclo para a qual isto é possível é chamada de largura de banda de verde para aquele sentido. Técnicas que procuram tirar o máximo proveito do tempo de ciclo/verde disponível na geração de bandas são conhecidas por técnicas (ou métodos) de maximização de largura de banda de verde [32].

O projeto de sistemas de progressão (ondas verdes) baseia-se no fato de que semáforos tendem a agrupar os veículos em pelotões com *headways* uniformes, efeito este acentuado em vias arteriais [19].

A Figura 2.1 apresenta um diagrama de espaço-tempo para uma arterial com dez interseções. As linhas horizontais grossas mostram os tempos de vermelho ao longo do tempo. As barras diagonais mostram a banda em ambos os sentidos da arterial, limitada pelas trajetórias do primeiro e do último veículo que usufruem da banda.

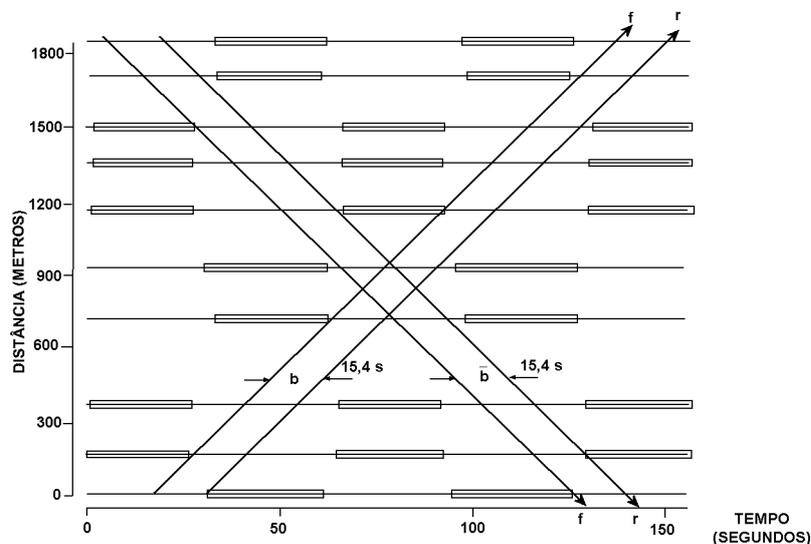


Figura 2.1: Diagrama espaço-tempo para uma arterial com bandas iguais em ambos os sentidos (adaptada de [32]).

Com base em dados geométricos da via, tempo de ciclo e de porcentagens de verde, as técnicas de maximização de largura de banda obtêm valores de defasagem que proporcionam as chamadas “ondas verdes”. MULTIBAND [19] como será visto, incorpora os valores de fluxo no seu modelo, enquanto as demais técnicas podem utilizar valores de fluxo para ajustar a largura da banda em cada sentido da arterial, aumentando ou reduzindo-a de acordo com o fluxo.

Normalmente, a banda em cada sentido é única, ou seja, não é dividida em dois ou mais intervalos no ciclo através de uma interrupção da progressão por um sinal vermelho. As técnicas que são aqui apresentadas tratam de maximização de bandas únicas, já que bandas divididas podem ser obtidas tratando cada um dos trechos separadamente.

O favorecimento da progressão de veículos por meio de ondas verdes obtidas por técnicas de maximização de largura de banda é de fácil e intuitiva assimilação por operadores e motoristas e é largamente utilizada. Diagramas espaço-tempo permitem fácil visualização do resultado [31]. Técnicas que maximizam largura de banda, quando comparadas com técnicas que otimizam critérios

de tráfego, utilizam poucos dados de entrada, exigindo basicamente dados geométricos da via, velocidades de cruzeiro e porcentagens de verde. A maximização de banda tende a reduzir o número de paradas e o atraso veicular [32]. A banda favorece a progressão dos veículos que param menos nos semáforos, reduzindo o número total de paradas. A redução do atraso decorre da redução do número de paradas. Carros parados são carros em fila sofrendo atraso. Entretanto, o favorecimento da progressão na arterial não pode ser tal que prejudique em demasia as vias transversais. A adoção de planos obtidos por maximização de largura de banda é satisfatória quando o volume de tráfego está baixo, e de pouca utilidade quando o volume de tráfego está alto [30]. O desempenho de sistemas que empregam a maximização de largura de banda é melhor também quando poucos carros fazem conversão das vias secundárias para a via arterial, e quando o fluxo é predominante na via arterial [19].

Nesta seção, são apresentados dois trabalhos a respeito de sincronização de sinais através da maximização de largura de banda, bem como os programas MAXBAND e MULTIBAND. O primeiro método apresentado a seguir foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. As demais metodologias são apresentadas em caráter complementar, pois também podem ser utilizadas alternativamente ao método escolhido, porém com maior complexidade de implementação.

2.1.1 Sincronizando Sinais de Tráfego para Obtenção de Bandas de Largura Máxima

No trabalho [35], Morgan e Little propõem procedimentos para a solução de dois problemas:

- i) dados tempo comum de ciclo, porcentagens de verde (vermelho) em cada interseção e velocidades e distâncias entre sinais adjacentes, determinar a defasagem entre os semáforos de maneira a obter larguras de banda iguais em cada direção e tão largas quanto possível; e
- ii) ajustar as defasagens para favorecer um sentido com uma largura de banda maior, se factível, e dar à outra direção uma largura de banda tão grande quanto possível.

A proposta de Morgan e Little [35], além de resolver os mesmos problemas que os demais métodos propostos na literatura até sua publicação, permite estipular velocidades de projeto diferentes entre sinais adjacentes, em ambos os sentidos, e ajustar a largura de banda com base em tamanho de pelotão. Dois programas de computador foram desenvolvidos, um para efetuar o cálculo das bandas máximas e outro para desenhar diagramas espaço-tempo a partir dos resultados do primeiro. A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada do método de Morgan e Little [35].

Conceitos básicos

Considere uma via de mão dupla com n interseções semaforizadas (ver Figura 2.2). Os sentidos da via serão identificados como $i - j$ e $j - i$. Os semáforos serão identificados por S_1, S_2, \dots, S_n , com o índice crescendo no sentido $i - j$. Sejam:

C o tempo de ciclo dos sinais (s);

r_i o tempo de vermelho de S_i (ciclos);

b (\bar{b}) a largura da banda no sentido $i - j$ ($j - i$) (ciclos);

t_{ij} (\bar{t}_{ij}) o tempo de viagem de S_i até S_j no sentido $i - j$ ($j - i$) (ciclos);

θ_{ij} a defasagem relativa de S_i e S_j , medida como o tempo entre o centro de vermelho de S_i ao próximo centro de vermelho de S_j (ciclos); por convenção $0 \leq \theta_{ij} \leq 1$;

x_i a posição de S_i na rua (m);

v_i (\bar{v}_i) a velocidade entre S_i e S_{i+1} no sentido $i - j$ ($j - i$) (m/s); e

$\delta_{ij} \in \{0, \frac{1}{2}\}$.

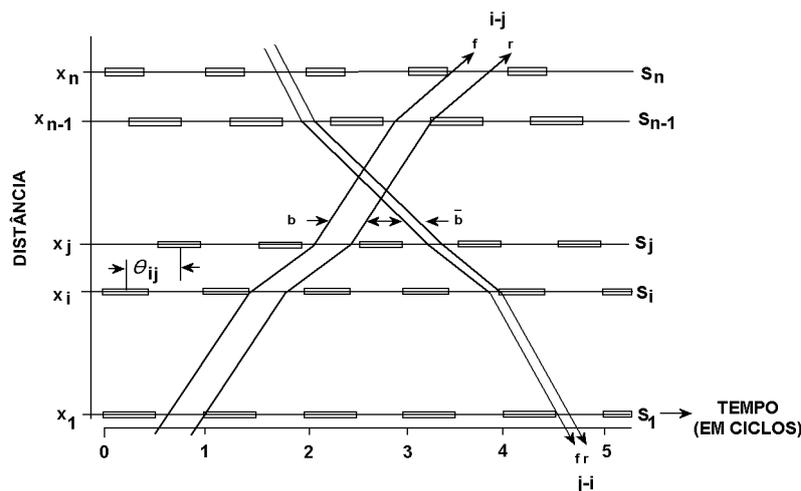


Figura 2.2: Diagrama espaço-tempo geral do problema (adaptada de [32]).

A unidade de tempo pode ser transformada em ciclos dividindo-a por C . Entende-se “tempo de vermelho” como “tempo inutilizado”. Um conjunto θ_{ij} , $j = 1, \dots, n$ para qualquer i é chamado de sincronização de semáforos. Os tempos de viagem entre sinais adjacentes são assumidos conhecidos

e constantes. Os tempos de viagem entre quaisquer sinais são dados por:

$$t_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=i}^{j-1} t_{k,k+1} & j > i \\ 0 & j = i \\ - \sum_{k=j}^{i-1} t_{k,k+1} & j < i \end{cases} \quad (2.1)$$

bastando substituir t por \bar{t} para obter os tempos no sentido $j - i$. Por conveniência é possível expressar os tempos de percurso em termos de velocidades e distâncias. Assim:

$$t_{i,i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{v_i C} \quad (2.2)$$

$$\bar{t}_{i,i+1} = \frac{x_i - x_{i+1}}{\bar{v}_i C} \quad (2.3)$$

A operação mantissa de z é obtida por $\text{man}(z) = 1 - [z]$, com $[x]$, a operação piso ou chão, que arredonda x para o maior número inteiro menor do que x . Portanto, $\text{man}(5, 2) = 0, 2$, $\text{man}(-0, 2) = 0, 8$, e de maneira geral, $0 \leq \text{man}(z) < 1$.

Um sinal é chamado crítico se um lado do vermelho de S_j toca a banda de verde em um sentido e o outro lado toca a banda de verde no outro sentido. Os sinais críticos são divididos em dois grupos e um sinal pode pertencer a ambos os grupos. No Grupo 1 estão os sinais cujos vermelhos tocam a frente da banda no sentido $i - j$ e a traseira no sentido $j - i$, e no Grupo 2 os sinais cujos vermelhos tocam a frente no sentido $j - i$ e a traseira no sentido $i - j$. Na Figura 2.2, o sinal S_1 é crítico do Grupo 2 e o sinal S_i é crítico do Grupo 1. A frente e a traseira da banda são identificadas na figura por f e r e mudanças de inclinação indicam mudanças na velocidade de projeto.

Morgan e Little [35] provaram que larguras máximas de bandas são obtidas quando os semáforos estão em sincronização semi-inteira (*half-integer synchronization*). Uma sincronização de semáforos é semi-inteira se:

$$\theta_{ij} = \text{man} \left[\frac{1}{2} (t_{ij} + \bar{t}_{ij}) + \delta_{ij} \right] \quad (2.4)$$

O significado operacional fica mais claro no caso em que as velocidades em ambos os sentidos são iguais, $t_{ij} = -\bar{t}_{ij}$, no qual $\theta_{ij} = \delta_{ij} \in \{0, \frac{1}{2}\}$, e dois sinais terão seus centros de vermelho exatamente em fase ou exatamente defasados (ver Figura 2.1).

Defasagem para larguras de banda máximas e iguais

Através do desenvolvimento de teoremas e provas, Morgan e Little [35] mostram que um pequeno número de casos precisa ser examinado. Basta procurar entre os casos em que há sincronização semi-inteira e apenas na direção $i - j$. Sejam:

b_i a maior largura de banda no sentido $i - j$ sob sincronização semi-inteira se o vermelho de S_i toca a frente da banda de $i - j$; e

B o valor de uma das larguras de banda máximas iguais.

Durante o cálculo convém permitir que b_i e B assumam valores negativos; a interpretação operacional é de largura de banda igual a zero.

Para o desenvolvimento que segue, assume-se como origem de medidas o lado direito do vermelho de S_i . A trajetória que toca o lado direito do vermelho de S_j passa em S_i no tempo u_{ij} e é dada por:

$$u_{ij} = 1 - \text{man} \left[-\theta_{ij} - \frac{r_j}{2} + \frac{r_i}{2} + t_{ij} \right]. \quad (2.5)$$

Substituindo nesta a Equação (2.4) e deixando explícita a dependência de δ_{ij} :

$$u_{ij}(\delta_{ij}) = 1 - \text{man} \left[\frac{1}{2}(r_i - r_j) + \frac{1}{2}(t_{ij} - \bar{t}_{ij}) - \delta_{ij} \right]. \quad (2.6)$$

A trajetória que toca o lado esquerdo do vermelho de S_j passa em S_i no tempo $u_{ij} - r_j$. Portanto, como δ_{ij} assume os valores 0 ou 1/2 e como o vermelho de S_i deve tocar a frente, o melhor δ_{ij} é identificado por

$$\max \left[u_{ij}(0) - r_j, u_{ij}\left(\frac{1}{2}\right) - r_j \right]. \quad (2.7)$$

Assim,

$$b_i = \min_j \max_{\delta \in \{0, \frac{1}{2}\}} [u_{ij}(\delta) - r_j] \quad (2.8)$$

$$B = \max_i b_i. \quad (2.9)$$

Resumindo, a máxima largura igual de banda é $\max(0, B)$, onde

$$B = \max_i \min_j \max_{\delta \in \{0, \frac{1}{2}\}} [u_{ij}(\delta) - r_j]. \quad (2.10)$$

Seja $i = c$ um i que maximiza a largura da banda e $\delta_{c1}, \dots, \delta_{cn}$ os correspondentes δ s maximizadores. Então a sincronização para larguras de banda máximas e iguais é $\theta_{c1}, \dots, \theta_{cn}$ obtida substituindo δ_{cj} , $j = 1, \dots, n$, em (2.4).

Defasagem para larguras de banda máximas e desiguais

Depois de obtidas bandas iguais, a banda total pode ser dividida entre os sentidos da via com base no tamanho de pelotões. Isto é relevante quando a largura de um pelotão em um sentido excede a banda e no outro sentido não, ou quando se deseja alocar largura da banda para filas residuais, oriundas de conversões à direita de vias transversais. Desloca-se a banda de um sentido para o outro para que ambos os pelotões passem desimpedidos pela banda.

Seja $\theta_{c1}, \dots, \theta_{cn}$ a configuração que proporciona bandas máximas iguais, e S_c o sinal crítico cujo vermelho toca a frente da banda no sentido $i - j$. Os valores correspondentes de u_{c1}, \dots, u_{cn} e largura de banda igual máxima B são conhecidos. Sejam,

α_j o deslocamento de fase de S_j (ciclos);

$\theta'_{cj} = \text{man}(\theta_{cj} - \alpha_j)$ a fase de S_j ajustada (ciclos);

$g = \min_i(1 - r_i)$ o menor tempo de verde (ciclos); e

$P(\bar{P})$ a largura do pelotão no sentido $i - j$ ($j - i$) (ciclos),

se $P = \bar{P}$ as bandas máximas iguais são utilizadas. Caso contrário, se $P + \bar{P} \leq 2B$, pode haver largura de banda suficiente para acomodar ambos os pelotões e a largura de banda é dividida proporcionalmente para ambos os sentidos, se possível. Se $P + \bar{P} > 2B$, o maior pelotão é acomodado, e se possível, o que restar, é dado ao pelotão menor.

Para o caso em que $\bar{P} \leq P$, se $P + \bar{P} \leq 2B$, $b = \min[g, 2BP/(P + \bar{P})]$ e se $P + \bar{P} > 2B$, $b = \min(P, g)$, exceto se $P \geq 2B$, quando então $b = g$. Calcula-se os deslocamentos $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ de $\alpha_j = \max(u_{cj} - 1 + b - B, 0)$ e $\bar{b} = \max(2B - b, 0)$.

Para o caso em que $\bar{P} > P$, se $P + \bar{P} \leq 2B$, $\bar{b} = \min[g, 2B\bar{P}/(P + \bar{P})]$ e se $P + \bar{P} \geq 2B$, $b = \min(\bar{P}, g)$, exceto se $\bar{P} \geq 2B$, quando então $\bar{b} = g$. Calcula-se os deslocamentos $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ de $\alpha_j = \max(\bar{b} + r_j - u_{cj}, 0)$ e $b = \max(2B - \bar{b}, 0)$.

A sincronização ajustada $\theta'_{c1}, \dots, \theta'_{cn}$, é calculada por

$$\theta'_{cj} = \text{man}(\theta_{cj} - \alpha_j) \quad (2.11)$$

e as larguras de banda são b no sentido $i - j$ e \bar{b} no sentido $j - i$. A Figura 2.3 apresenta a mesma via arterial da Figura 2.1, mas agora com larguras de bandas máximas desiguais.

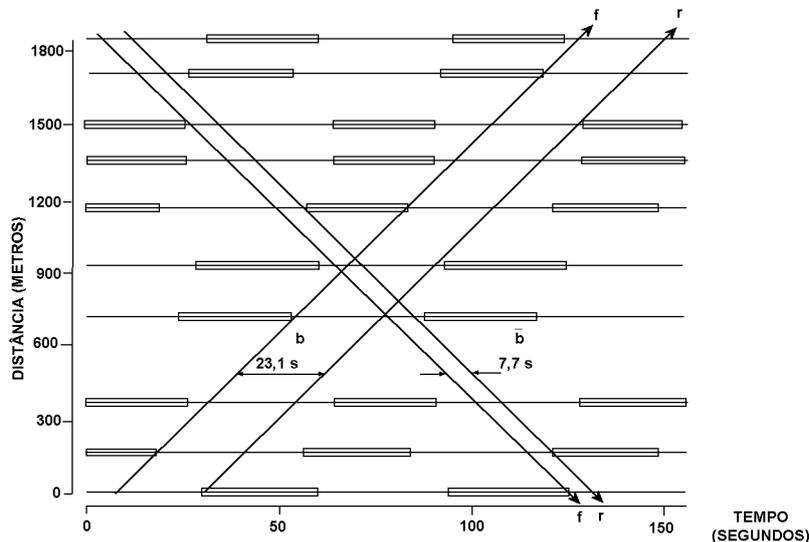


Figura 2.3: Diagrama espaço-tempo para uma arterial com bandas máximas desiguais (adaptada de [32]).

O Anexo B apresenta o procedimento de cálculo de bandas máximas aqui apresentado na forma de um algoritmo. Little *et al.* elaboraram um programa para o cálculo da largura de banda máxima por este método, discutido em [32]

2.1.2 Sincronização de Sinais de Tráfego via Programação Linear Inteira Mista

O problema de maximização de largura de banda apresentado na seção anterior [35], foi reformulado em programação linear inteira mista [30]. Com esta reformulação, foi possível introduzir novas variáveis de decisão e novas restrições. Há casos em que as arteriais são longas e os sinais críticos que restringem a banda estão bastante afastados uns dos outros. Nestes casos, pequenas variações nas velocidades de projeto podem resultar em uma sincronização diferente e uma largura de banda maior. Assim, esta nova formulação permite variar as velocidades de projeto dentro de certos limites. Ao tempo de ciclo também é permitido variar dentro de certa faixa. Adicionalmente à coordenação de semáforos em vias arteriais, é introduzida uma formulação para coordenação de vias em rede, tema que não será tratado neste trabalho. Um algoritmo de *branch-and-bound* para resolver a nova formulação foi sugerido em [30].

O programa matemático desenvolvido maximiza a soma ponderada de duas larguras de banda, uma em cada sentido, sem considerar a possibilidade de partição da banda em duas por um sinal vermelho, ao longo da arterial. Inicialmente, para a elaboração do programa linear inteiro misto é

considerado o caso em que se deseja maximizar duas bandas iguais. A Figura 2.4 é referência para a descrição que sucede.

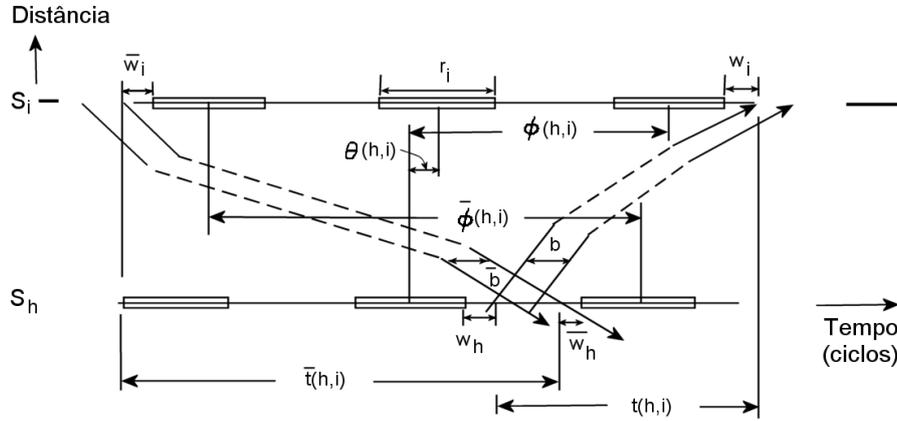


Figura 2.4: Geometria do problema de maximização de largura de bandas (adaptada de [30]).

Sejam S_h e S_i dois sinais tais que S_i segue S_h no sentido $h - i$, e:

r_i o tempo de vermelho na rua sob estudo (ciclos);

$b(\bar{b})$ a largura da banda no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$t(h, i)$ [$\bar{t}(h, i)$] o tempo de viagem de S_h para S_i (S_i para S_h) na direção $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$\phi(h, i)$ [$\bar{\phi}(h, i)$] o tempo do centro do vermelho de S_h ao centro de um determinado vermelho de S_i . Os dois vermelhos são escolhidos de maneira a estarem imediatamente à esquerda (direita) da mesma banda de verde no sentido $h - i$ ($i - h$). $\phi(h, i)$ [$\bar{\phi}(h, i)$] é positivo se o centro de vermelho de S_i está à direita (esquerda) do de S_h (ciclos);

w_i (\bar{w}_i) o tempo do lado direito (esquerdo) do vermelho de S_i até a banda de verde (ciclos); e

$m(h, i) = \phi(h, i) + \bar{\phi}(h, i) \in \mathbb{Z}$, e equivale a um número inteiro de ciclos.

Da figura, podem ser identificadas as seguintes identidades:

$$\frac{1}{2}r_h + w_h + t(h, i) - w_i - \frac{1}{2}r_i = \phi(h, i) \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{2}r_h + \bar{w}_h + \bar{t}(h, i) - \bar{w}_i - \frac{1}{2}r_i = \bar{\phi}(h, i). \quad (2.13)$$

Lembrando que $\phi(h, i) + \bar{\phi}(h, i) \in \mathbb{Z}$ e combinando as identidades 2.12 e 2.13,

$$(w_h + \bar{w}_h) - (w_i + \bar{w}_i) + t(h, i) + \bar{t}(h, i) = m(h, i) - (r_h - r_i) \quad (2.14)$$

$$m(h, i) \in \mathbb{Z}. \quad (2.15)$$

Para eliminar a restrição de que S_h venha em seguida a S_i e a relação 2.14 ser válida para S_i e S_h arbitrários, basta redefinir $t(h, i)$ apropriadamente. Mantendo verdadeira a relação $t(h, j) = t(h, i) + t(i, j)$ e fazendo $h = j$, obtém-se $t(i, h) = -t(h, i)$, com análise correspondente para $\bar{t}(h, i)$. Adicionalmente,

$$\phi(h, j) = \phi(h, i) + \phi(i, j) \quad (2.16)$$

$$m(h, j) = m(h, i) + m(i, j) \quad (2.17)$$

$$\phi(i, h) = -\phi(h, i) \quad (2.18)$$

$$m(i, h) = -m(h, i) \quad (2.19)$$

com relações correspondentes para $\bar{\phi}$.

Da Figura 2.4 obtém-se também:

$$w_i + b \leq 1 - r_i \quad (2.20)$$

$$\bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - r_i. \quad (2.21)$$

A notação é simplificada definindo que $x_i = x(i, i + 1)$ para $x = t, \bar{t}, \phi, \bar{\phi}, m$. O problema então fica:

Encontrar b , w_i , \bar{w}_i , m_i para (2.22)

$$\max b \quad (2.23)$$

sujeito a: (2.24)

$$\left. \begin{array}{l} w_i + b \leq 1 - r_i \\ \bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - r_i \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n) \quad (2.25)$$

$$\left. \begin{array}{l} (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) = m_i - (r_i + r_{i+1}) \\ m_i \in \mathbb{Z} \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.26)$$

$$w_i, \bar{w}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n). \quad (2.27)$$

Após resolver este problema as defasagens desejadas são obtidas substituindo as variáveis w_i , \bar{w}_i , e m_i , e os parâmetros t_i , \bar{t}_i e r_i nas Equações 2.12 e 2.13.

A este programa, são adicionadas variáveis de decisão e restrições que permitam ao tempo de ciclo e velocidades de projeto variarem. São estipulados valores máximos e mínimos para ambos e as mudanças de velocidades de um segmento da via para o seguinte são limitados. As larguras das bandas nos diferentes sentidos passam a ser proporção uma da outra. Sejam:

k a constante de proporcionalidade entre b e \bar{b} escolhida pelo projetista;

T o tempo de ciclo (s);

T_1, T_2 os limites inferior e superior para o tempo de ciclo, isto é, $T_1 \leq T \leq T_2$ (s);

z a frequência de ciclo (ciclos/s);

$d(h, i)$ distância entre S_h e S_i (m); $d_i = d(i, i+1)$;

$v_i(\bar{v}_i)$ a velocidade entre S_i e S_{i+1} no sentido $h-i$ (S_{i+1} e S_i no sentido $i-h$) (m/s);

$e_i, f_i, (\bar{e}_i, \bar{f}_i)$ os limites inferior e superior para velocidade no sentido $h-i$ ($i-h$) (m/s); e

$1/h_i, 1/g_i(1/\bar{h}_i, 1/\bar{g}_i)$ os limites inferior e superior para mudança na velocidade recíproca no sentido $h-i$ ($i-h$), isto é, $1/h_i \leq (1/v_{i+1}) - (1/v_i) \leq 1/g_i$ (m/s^{-1}).

A variação na velocidade é limitada pela velocidade recíproca pois ela aparece linearmente no problema podendo ser transformada em t_i . Assim, $t_i = (d_i/v_i)z$ e $\bar{t}_i = (d_i/\bar{v}_i)z$. Resulta então um novo

programa mais abrangente:

$$\text{Encontrar } b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, m_i, \text{ para} \quad (2.28)$$

$$\max (b + \bar{b}) \quad (2.29)$$

$$\text{sujeito a:} \quad (2.30)$$

$$\bar{b} = kb \quad (2.31)$$

$$1/T_2 \leq z \leq 1/T_1 \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{array}{l} w_i + b \leq 1 - r_i \\ \bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - r_i \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n) \quad (2.33)$$

$$\left. \begin{array}{l} (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) = m_i - (r_i + r_{i+1}) \\ m_i \in \mathbb{Z} \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{array}{l} (d_i/f_i)z \leq t_i \leq (d_i/e_i)z \\ (d_i/\bar{f}_i)z \leq \bar{t}_i \leq (d_i/\bar{e}_i)z \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.35)$$

$$\left. \begin{array}{l} (d_i/h_i)z \leq (d_i/d_{i+1})t_{i+1} \leq (d_i/g_i)z \\ (d_i/\bar{h}_i)z \leq (d_i/d_{i+1})\bar{t}_{i+1} \leq (d_i/\bar{g}_i)z \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n-2) \quad (2.36)$$

$$w_i, \bar{w}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.37)$$

$$b \geq 0. \quad (2.38)$$

Uma vez finalizada a resolução do problema, o tempo de ciclo C é obtido fazendo $C = 1/z$. As velocidades de projeto são obtidas pela razão entre as distâncias fornecidas e os tempos de percurso obtidos, assim, $v_i = d_i/t_i$ e $\bar{v}_i = d_i/\bar{t}_i$, com $i = 1, \dots, n$. As defasagens são obtidas da mesma maneira que no problema reduzido apresentado anteriormente.

Programas lineares inteiros mistos apresentam uma série de dificuldades para sua resolução pois possuem variáveis inteiras e variáveis reais. No programa apresentado, m_i é inteira e $b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i$ são reais. Little [30] ainda faz algumas considerações que podem simplificar o programa, que não serão abordadas aqui, mas que podem ser relevantes para a utilização do algoritmo *branch-and-bound* desenvolvido para sua resolução.

2.1.3 MAXBAND

MAXBAND [31] é um programa que implementa a resolução de um programa inteiro misto como o desenvolvido por Little [30], mas com adições à formulação original. MAXBAND obtém

a coordenação que maximiza as larguras das bandas em ambos os sentidos. Considera também a otimização de fases de conversão à esquerda e estipula tempos para a descarga de filas residuais provenientes de conversões à direita das vias transversais.

Vermelhos assimétricos são introduzidos na formulação. Assim, o sinal de verde para conversão à esquerda pode ser colocado no início ou no final do tempo de verde para a arterial. Com a nova formulação é possível determinar qual opção resulta em maior largura de banda. Nos casos em que os fluxos de vias transversais são significantes, as conversões à direita para a arterial, podem provocar filas residuais que interferem na progressão dos pelotões. A nova formulação permite adicionar um tempo anterior à banda para a descarga de filas residuais.

A geometria básica para a formulação do problema é apresentada na Figura 2.5. Sejam:

$b(\bar{b})$ a largura da banda no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

S_i o i -ésimo sinal ($i = 1, \dots, n$);

$r_i(\bar{r}_i)$ o tempo de vermelho no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$w_i(\bar{w}_i)$ o tempo do lado direito (esquerdo) do vermelho de S_i à extremidade esquerda (direita) da banda no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$t(h, i)[\bar{t}(h, i)]$ o tempo de viagem de S_h a S_i (S_i a S_h) no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$\phi(h, i)[\phi(h, i)]$ o tempo do centro de um vermelho em S_h no sentido $h - i$ ($i - h$) a um vermelho específico em S_i no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos) {os dois vermelhos são escolhidos de maneira que estejam imediatamente à esquerda (direita) da banda de verde em um mesmo sentido};

$\phi(h, i) [\bar{\phi}(h, i)]$ é positivo se o centro do vermelho de S_i estiver à direita (esquerda) do centro de vermelho de S_h ;

Δ_i o tempo do centro de \bar{r}_i ao centro de r_i mais próximo (ciclos); positivo se o centro de r_i estiver à direita do centro de \bar{r}_i ; e

$\tau_i(\bar{\tau}_i)$ o tempo de descarga de filas residuais, um avanço na largura da banda no sentido $h - i$ ($i - h$) ao deixar S_i (ciclos).

A equação fundamental é obtida a partir da Figura 2.5 tomando-se a diferença de tempo entre os pontos A e B nos sentidos $h - i$ e $i - h$.

No sentido $h - i$ tempo de A para B = Δ_i + número inteiro de ciclos + $\phi(h, i)$; e,

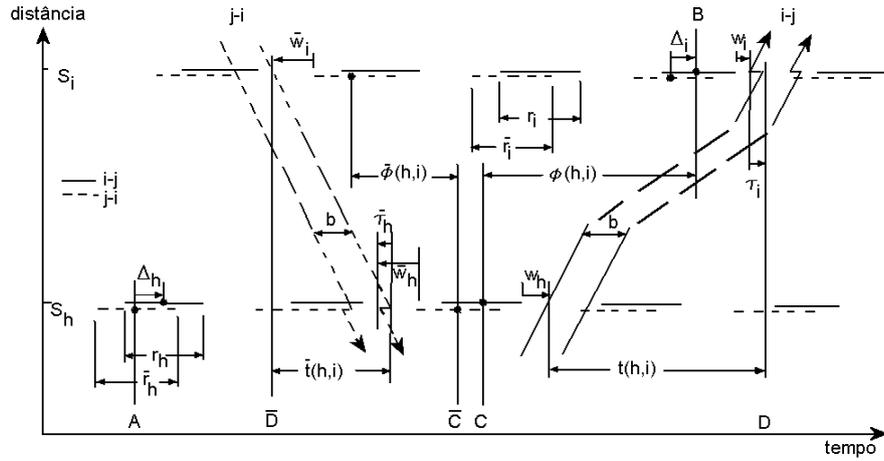


Figura 2.5: Geometria para a formulação de MAXBAND (adaptada de [31]).

No sentido $i - h$ tempo de A para B = número inteiro de ciclos $-\bar{\phi}(h, i) +$ outro número inteiro de ciclos $+\Delta_i$.

Igualando-as, rearranjando seus termos e englobando os números inteiros em um única variável $m(h, i)$,

$$\phi(h, i) + \bar{\phi}(h, i) + \Delta_h - \Delta_i = m(h, i). \quad (2.39)$$

Também na Figura 2.5 de C a D obtém-se

$$\phi(h, i) + (1/2)r_i + w_i + \tau_i = (1/2)r_h + w_h + t(h, i) \quad (2.40)$$

e de \bar{C} a \bar{D} obtém-se

$$\bar{\phi}(h, i) + (1/2)\bar{r}_i + \bar{w}_i = (1/2)\bar{r}_h + \bar{w}_h - \bar{\tau}_h + \bar{t}(h, i). \quad (2.41)$$

Substituindo as Equações (2.40) e (2.41) na Equação (2.39) resulta

$$t(h, i) + \bar{t}(h, i) + \frac{1}{2}(r_h + \bar{r}_h) + (w_h + \bar{w}_h) - \frac{1}{2}(r_i + \bar{r}_i) - (w_i + \bar{w}_i) - (\tau_i + \bar{\tau}_h) + \Delta_h - \Delta_i = m(h, i). \quad (2.42)$$

Da mesma maneira que no método de Little [30], deseja-se que S_i não esteja restrito a vir em seguida a S_h . Deseja-se por motivos físicos que $t(h, j) = t(h, i) + t(i, j)$, e portanto se $h = j$, faz-se:

$$t(i, h) = -t(h, i) \quad (2.43)$$

$$\bar{t}(i, h) = -\bar{t}(h, i) \quad (2.44)$$

$$\phi(h, i) = -\phi(i, h) \quad (2.45)$$

$$\bar{\phi}(h, i) = -\bar{\phi}(i, h) \quad (2.46)$$

$$m(h, i) = -m(i, h). \quad (2.47)$$

Simplifica-se a notação definindo $x_i = x(i, i + 1)$, para $x = t, \bar{t}, m, \phi, \bar{\phi}$. Portanto,

$$t_i + \bar{t}_i + (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + \Delta_i - \Delta_{i+1} = -\frac{1}{2}(r_i + \bar{r}_i) + \frac{1}{2}(r_{i+1} + \bar{r}_{i+1}) + (\bar{\tau}_i + \tau_{i+1}) + m_i. \quad (2.48)$$

Ainda da Figura 2.5, percebe-se que:

$$w_i + b \leq 1 - r_i \quad (2.49)$$

$$\bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i. \quad (2.50)$$

Desejando-se $b = \bar{b}$, as Equações (2.48), (2.49) e (2.50) podem ser agrupadas em um problema inteiro misto para a coordenação de sinais.

Encontrar $b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i$ e m_i para (2.51)

$$\max b \quad (2.52)$$

sujeito a (2.53)

$$\left. \begin{array}{l} w_i + b \leq 1 - r_i \\ \bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n) \quad (2.54)$$

$$\left. \begin{array}{l} t_i + \bar{t}_i + (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + \Delta_i - \Delta_{i+1} = \\ -(1/2)(r_i + \bar{r}_i) + (1/2)(r_{i+1} + \bar{r}_{i+1}) + (\bar{\tau}_i + \tau_{i+1}) + m_i \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.55)$$

$$m_i \in \mathbb{Z} \quad (2.56)$$

$$b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n). \quad (2.57)$$

$$(2.58)$$

Resolvido o problema, as defasagens são obtidas através das equações (2.40) e (2.41).

Como nesta formulação a banda de verde é definida na partida do sinal, a adição de tempos para descarga de filas residuais (τ) provocam um deslocamento da banda. Este efeito faz com que em alguns casos os carros na traseira da banda parem em um sinal vermelho. Com a contrapartida de reduzir a largura da banda, pode ser estipulada uma folga para atender os tempos de descarga de filas residuais. Basta somar τ_i e $\bar{\tau}_i$, respectivamente no lado esquerdo das equações (2.49) e (2.50).

A generalização a seguir permite que o programa de otimização decida quando uma fase de conversão à esquerda vai ocorrer (se existir uma) com respeito ao verde da arterial em qualquer sinal.

O verde de conversão à esquerda pode ser antecipado ou postergado; será escolhido aquele que provê a maior largura de banda. O engenheiro de tráfego pode também desejar estipular quais combinações serão permitidas. A Figura 2.6 mostra os quatro padrões possíveis de conversão à esquerda. Sejam:

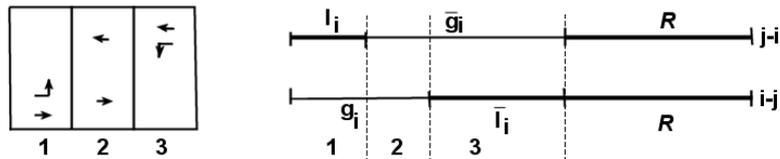
$g_i(\bar{g}_i)$ o tempo de verde em S_i para a via arterial no sentido $i - j$ ($j - i$) (ciclos);

$l_i(\bar{l}_i)$ o tempo alocado para o verde de conversão à esquerda em S_i no sentido $i - j$ ($j - i$) (ciclos); e

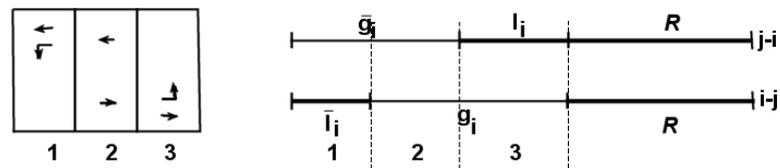
R o tempo comum de vermelho em ambas as direções para movimentos das transversais (ciclos).

Como o tempo alocado para verde de conversão à esquerda no sentido $i - j$ é tempo de vermelho no sentido $j - i$, da Figura 2.6, resulta que $r_i = R + \bar{l}_i$, $\bar{r}_i = R + l_i$, $r_i + g_i = 1$ e $\bar{r}_i + \bar{g}_i = 1$.

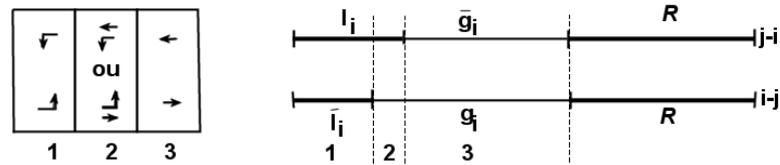
1. Conversão de $i-j$ antecipada; de $j-i$ postergada



2. Conversão de $i-j$ postergada; de $j-i$ antecipada



3. Conversão de $i-j$ antecipada; de $j-i$ antecipada



4. Conversão de $i-j$ postergada; de $j-i$ postergada

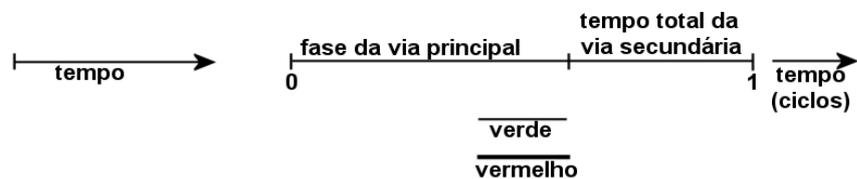
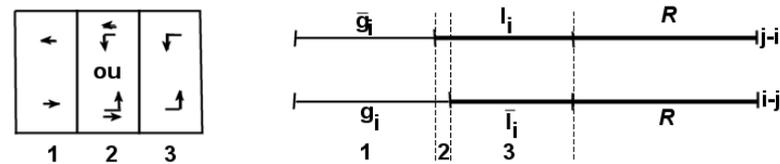


Figura 2.6: Padrões de fases de conversão à esquerda (adaptada de [31]).

Para melhor compreensão, considere o caso 1 da Figura 2.6. Neste caso, as conversões da arterial no sentido $i - j$ são antecipadas e no sentido $j - i$ postergadas. O tempo de verde g_i no sentido $i - j$ permite que os veículos progridam pela arterial. O tempo l_i no sentido $j - i$ aparece como um tempo de vermelho para este sentido, mas corresponde ao tempo de verde dentro de g_i que os veículos no sentido $i - j$ poderão utilizar para conversão à esquerda. Ao final do tempo de verde

g_i inicia o tempo \bar{l}_i , que corresponde ao tempo de verde pertencente a \bar{g}_i durante o qual veículos no sentido $j - i$ poderão efetuar a conversão à esquerda.

Pode-se expressar Δ_i em termos de l_i e \bar{l}_i para cada caso (padrão) como segue:

Padrão	Δ_i
1	$-(1/2)(l_i + \bar{l}_i)$
2	$(1/2)(l_i + \bar{l}_i)$
3	$-(1/2)(l_i - \bar{l}_i)$
4	$(1/2)(l_i - \bar{l}_i)$

A adição ou a subtração de l_i com \bar{l}_i corresponde à quantidade total de tempo de vermelho que não coincide no tempo entre os sentidos $i - j$ e $j - i$. A metade deste valor é quanto os centros de vermelho estão deslocados um do outro. Por definição δ_i é positivo se o centro de r_i estiver à direita do centro de \bar{r}_i e negativo caso contrário. No caso dos quatro padrões apresentados, o deslocamento é negativo quando o sentido $i - j$ está antecipado.

Todos estes podem ser expressos da seguinte forma:

$$\Delta_i = (1/2)[(2\delta_i - 1)l_i - (2\bar{\delta}_i - 1)\bar{l}_i] \quad (2.59)$$

onde δ_i e $\bar{\delta}_i$ são variáveis 0 - 1 e os casos anteriores agora são:

Padrão	δ_i	$\bar{\delta}_i$
1	0	1
2	1	0
3	0	0
4	1	1

Assim, é possível utilizar o programa linear inteiro misto para selecionar o padrão que maximiza a largura da banda. Se apenas alguns padrões forem permitidos, novas restrições em δ_i e $\bar{\delta}_i$ podem ser adicionadas. Por exemplo, se apenas os padrões 1 e 2 forem permitidos, a restrição $\delta_i + \bar{\delta}_i = 1$ é adicionada.

É possível ainda, favorecer um sentido da via manipulando-se a razão da largura da banda entre os sentidos $j - i$ e $i - j$. Mas ao fazer a largura da banda em um sentido maior do que a largura da banda no outro sentido, a largura desta banda nunca pode ser maior que o menor tempo de verde naquele direção. Uma vez que isto aconteça, não faz sentido restringir a largura da banda na direção oposta só para satisfazer a razão estabelecida. Assim, fala-se aqui de razão alvo.

Seja $k =$ razão alvo do sentido $j - i$ por $i - j$. Para o caso em que $k < 1$ ($i - j$ favorecida),

a função objetivo e as restrições de razão podem ser definidas como segue: $\max(b + k\bar{b})$, sujeito a $\bar{b} \geq kb$. Para atender também o caso em que $k > 1$ a formulação fica: $\max(b + k\bar{b})$ sujeito a $(1 - k)\bar{b} \geq (1 - k)kb$. Para $k = 1$ esta última desigualdade deve ser substituída por $b = \bar{b}$.

Finalmente, são feitas as generalizações que permitem variar o tempo de ciclo e as velocidades de projeto. As variáveis e parâmetros adicionais são as mesmas que no problema de Little, exceto pelo fato que as distâncias no sentido $i - j$ e $j - i$ podem ser diferentes. Portanto, aparecem também as variáveis $d(h, i)[\bar{d}(h, i)]$ que são as distâncias entre S_h e S_i no sentido $i - j$ ($j - i$), sendo que $d_i = d(i, i + 1)$ e $\bar{d}_i = \bar{d}(i, i + 1)$. A formulação final do problema para $k \neq 1$ é:

$$\text{Encontrar } b, \bar{b}, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i \text{ e } m_i \text{ para} \quad (2.60)$$

$$\max (b + k\bar{b}) \quad (2.61)$$

$$\text{sujeito a} \quad (2.62)$$

$$(1 - k)\bar{b} \geq (1 - k)kb \quad (2.63)$$

$$1/T_2 \leq z \leq 1/T_1 \quad (2.64)$$

$$\left. \begin{array}{l} w_i + b \leq 1 - r_i \\ \bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n) \quad (2.65)$$

$$\left. \begin{array}{l} (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) + \delta_i l_i - \bar{\delta}_i \bar{l}_i \\ -\delta_{i+1} l_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{l}_{i+1} - m_i = (r_{i+1} - r_i) + (\bar{r}_i + \tau_{i+1}) \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n - 1) \quad (2.66)$$

$$\left. \begin{array}{l} (d_i/f_i)z \leq t_i \leq (d_i/e_i)z \\ (\bar{d}_i/\bar{f}_i)z \leq \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{e}_i)z \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n - 1) \quad (2.67)$$

$$\left. \begin{array}{l} (d_i/h_i)z \leq (d_i/d_{i+1})t_{i+1} - t_i \leq (d_i/g_i)z \\ (\bar{d}_i/\bar{h}_i)z \leq (\bar{d}_i/\bar{d}_{i+1})\bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{g}_i)z \end{array} \right\} (i = 1, \dots, n - 2) \quad (2.68)$$

$$b, \bar{b}, z \geq 0 \quad (2.69)$$

$$w_i, \bar{w}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.70)$$

$$t_i, \bar{t}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n - 1) \quad (2.71)$$

$$m_i \in \mathbb{Z} \quad (i = 1, \dots, n - 1) \quad (2.72)$$

$$\delta_i, \bar{\delta}_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n - 1). \quad (2.73)$$

$$(2.74)$$

com a restrição (2.63) sendo substituída por $b = \bar{b}$ se $k = 1$.

Resolvido o problema, o tempo de ciclo C é dado por $C = 1/z$. As velocidades serão dados por $v_i = d_i/t_i$ e $\bar{v}_i = d_i/\bar{t}_i$. Os valores de δ_i e $\bar{\delta}_i$ determinam os padrões a serem adotados para conversão à esquerda e as defasagens são obtidas através das equações (2.40) e (2.41).

A Figura 2.7 mostra um diagrama espaço tempo para MAXBAND em que os vermelhos são simétricos.

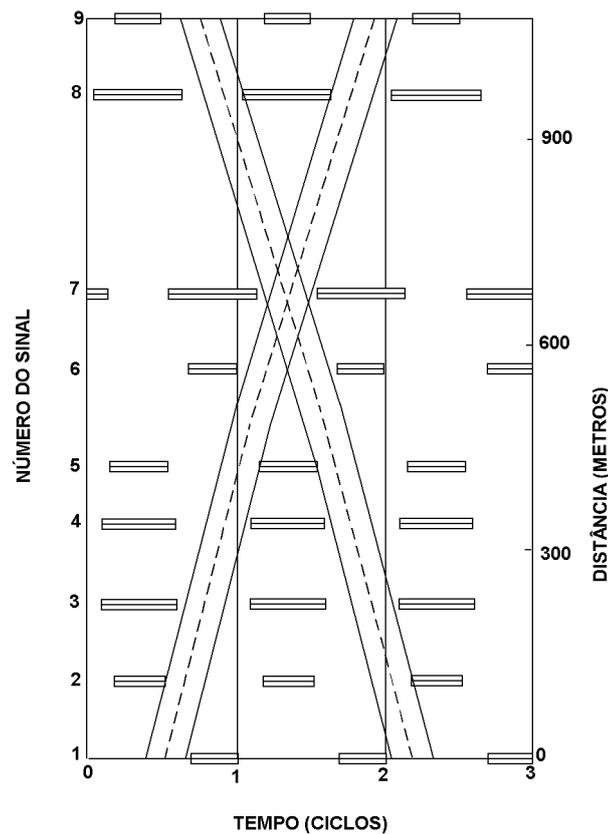


Figura 2.7: Diagrama espaço-tempo para bandas obtidas através de MAXBAND (adaptada de [19]).

Se as porcentagens dos tempos de verde não forem fornecidas previamente, MAXBAND pode utilizar dados de fluxo para calculá-las pela teoria de Webster [44]. MAXBAND conta ainda com uma formulação para coordenação de redes triangulares e que posteriormente foi generalizada para redes em geral num programa chamado MAXBAND-86 [4].

2.1.4 MULTIBAND

Uma limitação nas técnicas de maximização de banda existentes é que o critério de projeto não leva em consideração os fluxos nos segmentos de via da arterial e suas transversais, e portanto é

insensível a estas variações. A utilização da razão alvo (k) para dividir desigualmente a banda entre os dois sentidos da arterial não garante que os planos obtidos sejam bons. Estudos mostraram também que a razão alvo para toda a arterial é insuficiente [19]. As conversões para, e da arterial, fazem com que os volumes na arterial não permaneçam constantes ao longo de todo o trajeto. Consequentemente a idéia de pelotões uniformes se deslocando ao longo da via nem sempre é verdadeira.

MULTIBAND [19] é uma proposta que procura combinar as vantagens das técnicas de maximização de banda e da otimização de critérios de tráfego simultaneamente em um modelo de otimização. O intuito desta combinação é remediar as deficiências que advêm da não consideração dos fluxos na via.

São incorporados ao problema o volume em cada segmento da arterial, que em conjunto com outros parâmetros como capacidade e velocidade, terão efeito sobre a otimização. Pesos passam a ser atribuídos também a cada segmento da arterial, ao invés de apenas um (k).

O desenvolvimento de MULTIBAND parte do programa MAXBAND. Cada segmento em cada direção terá uma banda específica e pesos podem ser atribuídos com respeito à contribuição daquela banda na função objetivo. Note que apenas a largura da banda varia a cada segmento; o centro da banda é contínuo ao longo de toda a arterial e em ambos os sentidos. Bandas uniformes e iguais continuam sendo possíveis, e passam a ser uma opção do usuário do programa.

Por conveniência, são rerepresentados aqui os parâmetros e variáveis do modelo MAXBAND (ver Figura 2.5) que permanecem no modelo MULTIBAND. Sejam:

S_i o i -ésimo sinal ($i = 1, \dots, n$);

$r_i(\bar{r}_i)$ o tempo de vermelho no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$t(h, i)[\bar{t}(h, i)]$ o tempo de viagem de S_h a S_i (S_i a S_h) no sentido $h - i$ ($i - h$) (ciclos);

$\tau_i(\bar{\tau}_i)$ o tempo de descarga de filas residuais, uma avanço na largura da banda no sentido $h - i$ ($i - h$) ao deixar S_i (ciclos).

T o tempo de ciclo (s);

T_1, T_2 os limites inferior e superior para o tempo de ciclo, isto é, $T_1 \leq T \leq T_2$ (s);

z a frequência de ciclo (ciclos/s);

$d(h, i)$ a distância entre S_h e S_i (m); $d_i = d(i, i + 1)$;

$v_i(\bar{v}_i)$ a velocidade entre S_i e S_{i+1} no sentido $h - i$ (S_{i+1} e S_i no sentido $i - h$) (m/s);

$e_i, f_i, (\bar{e}_i, \bar{f}_i)$ os limites inferior e superior para velocidade no sentido $h - i$ ($i - h$) (m/s); e

$1/h_i, 1/g_i(1/\bar{h}_i, 1/\bar{g}_i)$ os limites inferior e superior para mudança na velocidade recíproca no sentido $h - i$ ($i - h$), isto é, $1/h_i \leq (1/v_{i+1}) - (1/v_i) \leq 1/g_i$ (m/s^{-1}).

As duas variáveis que seguem foram redefinidas para a nova formulação, conforme a Figura 2.8 no sentido $i - (i + 1)$ (raciocínio análogo se aplica ao sentido $(i + 1) - i$):

$b_i(\bar{b}_i)$ é a largura da banda entre os sinais S_i e S_{i+1} no sentido $i - j$ ($j - i$); nesta formulação há uma banda para cada segmento da via em cada sentido;

$w_i(\bar{w}_i)$ é o tempo do lado direito (esquerdo) do vermelho de S_i à linha central da banda verde no sentido $i - j$ ($j - i$); o ponto de referência para o tempo é deslocado das extremidades para o centro da banda.

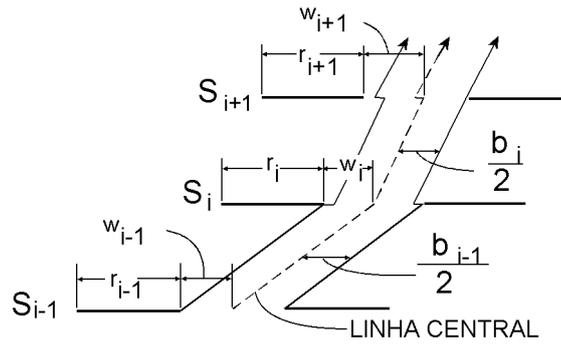


Figura 2.8: Geometria para formulação do problema MULTIBAND (adaptada de [19]).

As restrições $w_i + b_i/2 \leq 1 - r_i$ e $w_i - b_i/2 \geq 0$ se aplicam para o sentido $i - j$ no sinal S_i e podem ser combinadas:

$$b_i/2 \leq w_i \leq (1 - r_i) - b_i/2. \quad (2.75)$$

A mesma relação deve ser observada no sinal S_{i+1} pois a banda tem que ser limitada nas duas extremidades:

$$b_i/2 \leq w_{i+1} \leq (1 - r_{i+1}) - b_i/2. \quad (2.76)$$

Estas relações também são válidas no sentido $j - i$, marcando as variáveis com uma barra. A redefinição dos pontos de referência de tempo para o centro da banda não alteram as restrições de laço inteiro, bem como as de tempo de viagem e de mudança de velocidade.

A restrição que divide a banda para os dois sentidos também é modificada para comportar múltiplas bandas. Para cada par de segmentos paralelos,

$$(1 - k_i)\bar{b}_i \geq (1 - k_i)k_i b_i, \quad (2.77)$$

onde k_i = razão alvo de $j - i$ em relação a $i - j$ da banda no segmento i , tomada como razão entre os volumes correspondentes em cada sentido. Como em MULTIBAND as bandas são específicas de cada segmento da via, elas podem ser ponderadas separadamente para atingir objetivos desejáveis para cada segmento. A nova função objetivo tem o seguinte formato:

$$\max B = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \bar{a}_i \bar{b}_i) \quad (2.78)$$

onde $a_i(\bar{a}_i)$ são os pesos específicos de segmento em cada sentido ([19] sugere maneiras de obter estes pesos).

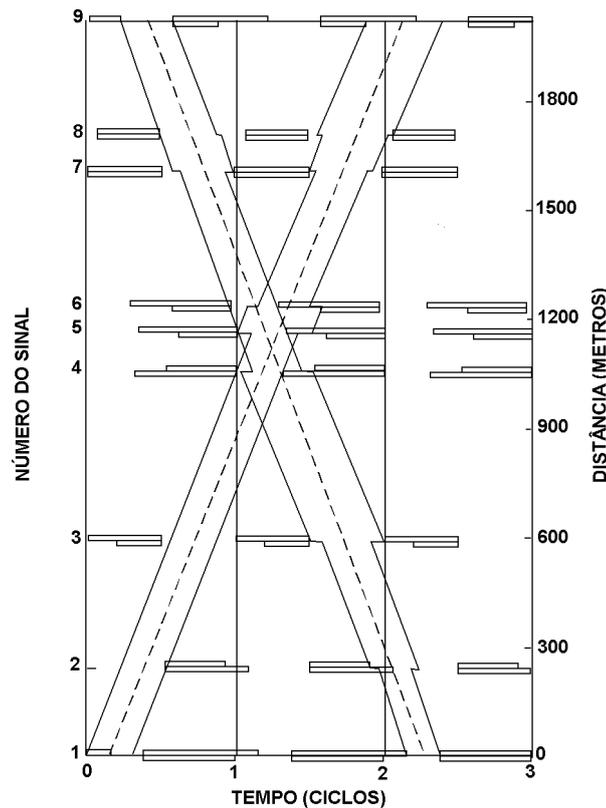


Figura 2.9: Diagrama espaço-tempo obtido com MULTIBAND (adaptada de [19]).

A formulação final do problema fica:

Encontrar $b_i, \bar{b}_i, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i, \delta_i, \bar{\delta}_i$ e m_i para (2.79)

$$\max B = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \bar{a}_i \bar{b}_i) \quad (2.80)$$

sujeito a: (2.81)

$$(1 - k_i) \bar{b}_i \geq (1 - k_i) k_i b_i \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.82)$$

$$1/T_2 \leq z \leq 1/T_1 \quad (2.83)$$

$$\left. \begin{aligned} b_i/2 \leq w_i \leq (1 - r_i) - b_i/2 \\ b_i/2 \leq w_{i+1} \leq (1 - r_{i+1}) - b_i/2 \end{aligned} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.84)$$

$$\left. \begin{aligned} (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) + \delta_i l_i - \bar{\delta}_i \bar{l}_i \\ - \delta_{i+1} l_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{l}_{i+1} - m_i = (r_{i+1} - r_i) + (\bar{r}_i + \bar{r}_{i+1}) \end{aligned} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.85)$$

$$\left. \begin{aligned} (d_i/f_i)z \leq t_i \leq (d_i/e_i)z \\ (\bar{d}_i/\bar{f}_i)z \leq \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{e}_i)z \end{aligned} \right\} (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.86)$$

$$\left. \begin{aligned} (d_i/h_i)z \leq (d_i/d_{i+1})t_{i+1} - t_i \leq (d_i/g_i)z \\ (\bar{d}_i/\bar{h}_i)z \leq (\bar{d}_i/\bar{d}_{i+1})\bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq (\bar{d}_i/\bar{g}_i)z \end{aligned} \right\} (i = 1, \dots, n-2) \quad (2.87)$$

$$b_i, \bar{b}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.88)$$

$$z \geq 0 \quad (2.89)$$

$$w_i, \bar{w}_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.90)$$

$$m_i \in \mathbb{Z} \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (2.91)$$

$$\delta_i, \bar{\delta}_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n). \quad (2.92)$$

$$(2.93)$$

A Figura 2.9 mostra um diagrama espaço tempo para MULTIBAND em que os vermelhos não são simétricos.

Com relação ao programa MAXBAND, a formulação MULTIBAND, por aumentar as possibilidades de decisão, aumenta significativamente o tamanho do problema de otimização.

Os resultados de simulação realizados pelos autores compararam planos MAXBAND com planos MULTIBAND. Várias configurações foram utilizadas e MULTIBAND obteve resultados melhores do que MAXBAND em todos eles, mostrando ser uma ferramenta alternativa na obtenção de planos coordenados para arteriais.

2.2 Técnicas que minimizam critérios de tráfego

Os critérios de tráfego normalmente utilizados em problemas deste tipo são atraso veicular e número de paradas. Outros critérios como emissão de poluentes e consumo de combustível por exemplo, podem ser considerados. É apresentado aqui o programa TRANSYT/10, um dos mais difundidos programas de coordenação semafórica a tempos fixos.

2.2.1 TRANSYT

TRANSYT [6] é um método para encontrar, e estudar, os melhores planos de tempo fixo com os quais coordenar a semaforização em malhas viárias. O método possui dois elementos principais: o modelo de tráfego e o otimizador de sinais.

O modelo representa o comportamento do tráfego em uma rede de vias na qual a maioria das interseções são controladas por semáforos. O modelo prevê o valor de um índice de desempenho para uma rede programada com um conjunto de planos e de fluxos médios que seja de interesse investigar. O índice de desempenho é uma medida do custo total de congestionamento do tráfego e é normalmente uma combinação ponderada do atraso total e do número de paradas.

O processo de otimização ajusta a temporização semafórica e verifica, usando o modelo, se os ajustes reduzem ou não o índice de desempenho. Adotando os ajustes que reduzem o índice de desempenho, a temporização é sucessivamente melhorada.

O modelo TRANSYT assume as seguintes hipóteses a respeito do tráfego:

- i) as principais interseções na rede são semaforizadas ou controladas por uma regra de prioridade;
- ii) todos os semáforos da rede possuem tempo de ciclo comum ou metade deste valor, e detalhes dos estágios e valores mínimos são conhecidos;
- iii) para cada aproximação diferente entre interseções, ou conversão em interseções, o fluxo médio é conhecido e constante.

A rede é representada por nós conectados por arcos. Cada nó representa uma interseção semaforizada. Cada arco representa uma corrente de tráfego chegando em um nó.

TRANSYT modela a operação do controle de semáforos em cada nó com referência aos instantes de mudança de estágio. Um instante de mudança de estágio é o instante em que o verde de

um estágio termina e a transição para o verde do próximo estágio inicia. Aqui, defasagem de uma interseção é marcada pelo instante de mudança de estágio quando a mudança para o verde do estágio 1 é iniciada.

Para a modelagem do comportamento de uma determinada rede, o tempo de ciclo comum é dividido em intervalos chamados *passos*. Os cálculos do TRANSYT são realizados com base na média dos valores de demanda e filas para cada passo de um ciclo típico. Os histogramas de chegadas por passo são chamados *cyclic flow profiles*.

O processo de otimização no TRANSYT procura por uma temporização que minimize as filas e os atrasos. O otimizador altera as defasagens e as porcentagens de verde em cada interseção. O tempo de ciclo não é otimizado, mas um programa externo chamado CYOP pode ser utilizado para avaliar uma faixa de tempos de ciclo, de onde um ótimo pode ser selecionado.

No TRANSYT, a medida de desempenho considerada é uma combinação ponderada do atraso e número de paradas nos arcos da rede. Isto representa o custo do congestionamento de tráfego e é chamado de índice de desempenho (*Performance Index - PI*) e é dado por:

$$PI = \sum_{i=1}^N (W w_i d_i + ((\frac{K}{100}) k_i s_i)) \quad (2.94)$$

em que

N é o número de vias (*links*);

W é o custo total por hora-pcu média de atraso (libras);

K é o custo total por 100 paradas-pcu (libras);

w_i é o peso de atraso na via i (1/unidades de tempo);

d_i é o atraso na via i (unidades de tempo);

k_i é o peso de parada na via i ;

s_i é o número de paradas na via i .

Ou seja, o otimizador TRANSYT procurar minimizar o PI e produzir ondas verdes multidirecionais. Como normalmente não é possível zerar o número de paradas e o atraso, TRANSYT procura automaticamente por um valor mínimo. O PI é avaliado em termos monetários (libras esterlinas).

TRANSYT utiliza como unidade de medida *passenger car unit* - pcu, que é equivalente a um carro de passeio.

A otimização de defasagem é realizada através de um processo de *hill climbing* [6]. Inicialmente TRANSYT avalia o PI para uma temporização inicial e a seguir altera através de mudanças incrementais e recalcula o PI. Se ele reduz, a defasagem é alterada sucessivamente na mesma direção pela mesma mudança incremental até que um valor mínimo de PI seja obtido. Se a mudança inicial aumenta o PI, a defasagem é alterada na direção oposta. As interseções são avaliadas em uma seqüência pré estabelecida, e o processo é repetido várias vezes até obter o valor mínimo.

Uma característica deste processo é que o ótimo encontrado nem sempre é global. Para reduzir esta possibilidade, TRANSYT usa mudanças grandes e pequenas sucessivamente na defasagem.

TRANSYT também otimiza os tempos de verde, permite especificar filas máximas para evitar bloqueios, permite que nós sejam avaliados em grupos, permite utilizar meio ciclo, e permite repetir estágios.

2.3 Outras Técnicas

Outros trabalhos com resultados significativos foram desenvolvidos sobre este assunto, mas não resultaram em ferramentas que se difundiram como MAXBAND ou TRANSYT.

Entre estes trabalhos está o de Cohen [5] que utiliza os programas MAXBAND e TRANSYT de forma combinada para a obtenção de planos semafóricos para arteriais. Uma série de experimentos foram realizados combinando-os das seguintes maneiras:

1. otimização de defasagens TRANSYT utilizando apenas a solução inicial padrão;
2. defasagens otimizadas através de MAXBAND sem busca por velocidade como solução inicial para o TRANSYT;
3. defasagens otimizadas através de MAXBAND com busca por velocidade como solução inicial para o TRANSYT;
4. tempo de ciclo otimizado por MAXBAND utilizado no TRANSYT;
5. seqüência de fases otimizadas por MAXBAND utilizado no TRANSYT; e

6. combinação dos experimentos 2 e 4, 5 e 6, e 3, 4, e 5. Os experimentos demonstraram que o uso combinado de MAXBAND e TRANSYT possui um potencial para a produção de melhores planos semaforicos do que usando apenas um dos programas. Os resultados melhores são ainda mais evidentes quando há fases de conversão à esquerda. Os autores recomendaram que na prática se utilize as informações de volume e capacidade ou tempos de verde existentes para obter defasagens, tempo de ciclo e seqüência de fases por meio do MAXBAND. Utilizando este resultado como solução inicial, o TRANSYT é executado para obter os tempos de verde e defasagens finais.

Hisai [26] elaborou um modelo para condições não saturadas de tráfego utilizando programação dinâmica. O modelo leva em consideração a formação de pelotões e pode ser utilizado para minimizar o atraso veicular ou para a maximização de largura de banda.

Gartner *et al.* [20, 21] desenvolveu um trabalho que discute sincronização e coordenação de malhas viárias por meio de programação linear inteira mista. Tratam coordenação como a obtenção de defasagem entre interseções dados seus tempos de porcentagem de verde e um tempo de ciclo comum a todas elas; e sincronização como a obtenção simultânea dos tempos de ciclo, porcentagens de verde e defasagem.

Dutra e Demarchi [13] apresentam uma adaptação do método de Morgan e Little [35] a partir da qual foi elaborado, em planilha eletrônica, um método de coordenação semaforica por maximização de largura de banda chamado SBAND [14].

Capítulo 3

Combinação do Método de Morgan e Little e da Estratégia TUC

This (real-time coordination of traffic flows) has proven to be a challenging real-time control problem.

P. Dell’Olmo and P. Mirchandani [7]

A proposta deste trabalho é combinar o método de coordenação semafórica de Morgan e Little [35] (daqui em diante denominado método ML) com a estratégia de controle em tempo-real TUC, de maneira a obter uma estratégia de controle em tempo-real que calcula defasagens para obtenção de larguras máximas de banda.

O método de coordenação empregado pela estratégia TUC utiliza uma lei de controle realimentado que leva em consideração a formação de filas. O cálculo da defasagem é realizado de forma descentralizada. Em vias com tráfego nos dois sentidos, a defasagem é calculada primeiro num sentido depois no outro. A defasagem final é estabelecida como uma soma ponderada das defasagens em cada sentido. Desta maneira, ao se estipular pesos iguais para os dois sentidos ($W = 0,5$), nenhum dos sentidos será perfeitamente atendido por uma “onda verde”, fenômeno desejado para prover progressão em vias arteriais. O método ML por outro lado calcula de forma analítica a defasagem global. Ambos os sentidos terão ondas verdes e a largura da banda em cada sentido pode ser ajustada, se factível.

A estratégia TUC passa a ser aplicada com seu módulo de controle de defasagem desligado. Para o cálculo das defasagens passa a ser utilizado o método ML. Os valores necessários para aplicação

do método ML, posição x da interseção, as velocidades de cruzeiro v e \bar{v} nas vias da arterial, e a largura de pelotões P e \bar{P} , são parâmetros fornecidos previamente. Entretanto, medidas ou métodos de estimação de v , \bar{v} , P e \bar{P} poderiam ser utilizados. O tempo comum de ciclo C para todas as interseções é obtido a partir do controlador de ciclo. Os tempos de vermelho r são calculados a partir das porcentagens de verde fornecidas pelo controle de porcentagens de verde e dos valores de amarelo e vermelho total.

O método ML foi escolhido pois permite obter a solução ótima por meio de um algoritmo simples de ser implementado, ao contrário de outros métodos, como MAXBAND e MULTIBAND, que requerem algoritmos sofisticados para serem resolvidos. Além disso para um primeiro estudo com maximização de largura de banda aplicada em controle em tempo-real, os outros métodos não trazem vantagens, pois TUC assume velocidades de projeto fixas ou estas poderiam ser estimadas em tempo-real. O tempo de ciclo é obtido pelo controlador de ciclo e não interessa tê-lo na formulação do problema. Fases de conversão à esquerda, tempo para descarga de filas residuais, e largura de bandas variáveis são variáveis que complicariam um primeiro estudo do problema e são deixadas para estudos futuros.

A estratégia de controle TUC foi escolhida pois provê controle em tempo-real coordenado de tráfego urbano em redes de larga escala, mesmo em condições de tráfego saturadas. Tem desempenho comparável a outras estratégias de controle em tempo-real. A sua modularidade permite a operação independente de cada um de seus módulos, favorecendo a mudança do controlador de defasagem.

3.1 TUC

TUC [10, 11] (*Traffic-responsive Urban Control*) foi desenvolvido de maneira a prover controle de tráfego em tempo-real coordenado em grandes redes urbanas, até mesmo em condições de tráfego saturado. Inicialmente desenvolvido para controle de porcentagens de verde apenas, foi posteriormente expandido para efetuar, em tempo-real, controle de ciclo e defasagem, bem com prioridade para transporte coletivo. A estratégia TUC tem quatro partes principais (ver Figura 3.1):

- **controle de porcentagens de verde:** o objetivo de controle é a minimização do risco de sobre-saturação e bloqueio de interseção por fila em interseção a jusante. Este objetivo de controle é atingido através de manipulação apropriada de porcentagens de verde em interseções semaforizadas para tempos de ciclo e defasagem dados. A metodologia empregada nesta parte da estratégia TUC é baseada na solução do problema LQR (*Linear Quadratic Regulator*) da Teoria de Controle Ótimo [12], sendo aplicada centralizadamente para toda a área controlada;

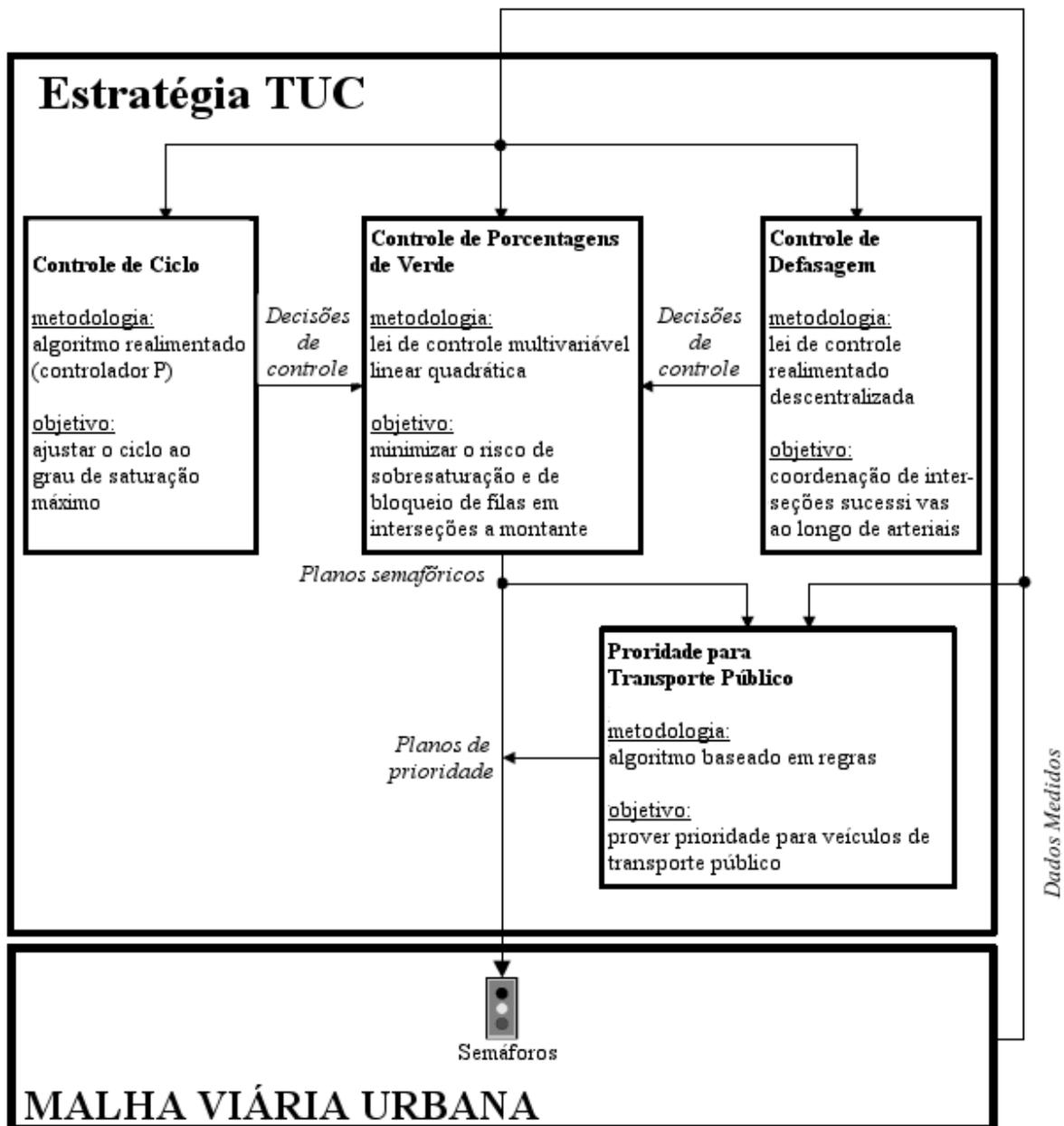


Figura 3.1: Arquitetura funcional TUC (adaptada de [11]).

- **controle de ciclo:** é efetuado através de um simples algoritmo baseado em realimentação (regulador P) que modifica o tempo de ciclo de maneira a adaptar a duração do ciclo ao nível máximo de saturação correntemente observado na rede;
- **controle de defasagem:** é aplicado através de uma lei de controle descentralizada que modifica a defasagem dos estágios principais de interseções sucessivas ao longo de arteriais, de maneira a criar “ondas verdes”, levando em consideração possível existência de filas;
- **prioridade para transporte público coletivo:** esta parte da estratégia deve prover prioridade para veículos de transporte público modificando localmente de maneira apropriada os resultados globais dos módulos anteriores.

As medidas necessárias em tempo-real são o número médio de veículos em cada pista durante um ciclo, estimados através da ocupação média obtida por laços indutivos.

TUC foi desenvolvido para prover controle em tempo-real coordenado de tráfego urbano em redes de larga escala, mesmo em condições de tráfego saturadas. Este objetivo é atingido por meio de ferramentas metodológicas que permitem a aplicação em redes de larga escala e dá origem às seguintes características:

- alta eficiência com respeito à imprecisão das medições, perturbações e falhas de hardware;
- generalidade que leva à fácil aplicação em redes com características e dimensões arbitrárias virtualmente sem a necessidade de calibração ou ajustes;
- simplicidade de projeto e implementação de código;
- requisitos reduzidos de medidas (um detector veicular por pista com posicionamento arbitrário do mesmo) e de comunicação (medidas/decisões uma vez por ciclo);
- baixo esforço computacional.

Como mostrado esquematicamente na Figura 3.1, as medidas da rede disponíveis em tempo-real são alimentadas uma vez por ciclo para os controladores de ciclo, defasagem e porcentagens de verde. Baseado nestas medidas, os controladores de ciclo e defasagem executam suas tarefas e passam suas decisões de controle para o controlador de porcentagens de verde. Dadas estas decisões de controle e as medidas, o controlador de porcentagens de verde executa sua tarefa e fornece as configurações semafóricas de toda a rede. Se a parte de prioridade para transporte coletivo também estiver ativa, ela pode modificar localmente estas configurações para atender ao pedido de prioridade.

As medidas exigidas em tempo real pelos controladores de ciclo, porcentagens de verde e defasagem são o número médio de veículos em cada uma das pistas durante um ciclo. A não ser que a rede controlada esteja equipada com um sistema de detecção por vídeo, estas medidas não estão disponíveis. Neste caso, medidas de ocupação são coletadas através de laços detectores convencionais e são utilizadas para estimar o número de veículos nas vias através de funções não-lineares apropriadas. Adicionalmente às medidas mencionadas até então, a parte de prioridade para transporte público utiliza dados relacionados ao movimento de veículos de transporte público dentro da rede controlada. Estes dados incluem ao menos informação sobre a presença de um veículo de transporte público em determinada rua.

As seções seguintes descrevem em mais detalhes cada um dos três controladores da estratégia TUC. A parte de prioridade para transporte público não será abordada pois não está no escopo deste trabalho.

Controle das Porcentagens de Verde

A metodologia básica empregada por TUC para o controle porcentagens de verde é a formulação do problema de controle de tráfego como um problema de controle Regulador Linear Quadrático (LQR) ótimo [9, 12] baseado em um modelo matemático do tipo *store-and-forward* [9].

De acordo com a abordagem básica de modelagem *store-and-forward* [9], os veículos se deslocam com tempos de viagem constantes ao longo de uma aproximação e são armazenados ao final da aproximação se o fluxo de entrada correspondente for maior do que o o fluxo de saída. O fluxo de saída de uma aproximação é passado à frente de acordo com o sinal de controle aplicado.

A principal característica que faz com que modelagem pela abordagem *store-and-forward* seja interessante é a introdução de um modelo simplificado que permite a descrição do processo de fluxo do tráfego sem o uso de variáveis binárias. A simplificação é introduzida ao modelar o fluxo de saída u de uma aproximação. Assumindo demanda suficiente na aproximação, o fluxo de saída u no tempo discreto k é dado por:

$$u(k) = \frac{S \cdot G(k)}{C} \quad (3.1)$$

onde S é o fluxo de saturação da aproximação, G é a duração do tempo de verde correspondente e C é o tempo de ciclo da interseção. De acordo com a Equação (3.1), se o período T da representação em tempo discreto for igual a C , u é igual à média do fluxo durante o ciclo correspondente, ao invés de ser igual a S na fase verde e igual a zero na fase vermelha, como ilustrado na Figura 3.2. Em outras

palavras, a equação sugere que há um fluxo de saída contínuo e ininterrupto em cada aproximação e a demanda é suficiente para que isto ocorra. As consequências desta simplificação são [9]:

- a representação do período de tempo discreto T não pode ser menor que o tempo de ciclo C , assim decisões de controle não podem ser tomadas numa frequência maior do que a cada ciclo;
- o modelo não descreve as oscilações nas filas de veículos devido às mudanças de sinal (verde/vermelho);
- o modelo não descreve o efeito de defasagem para interseções consecutivas.

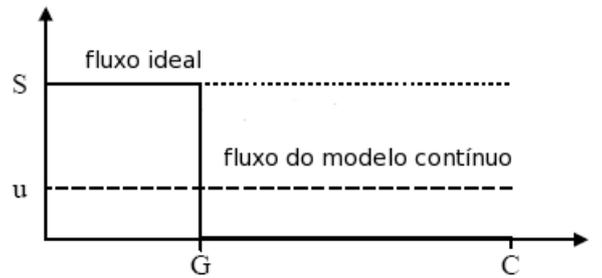


Figura 3.2: Modelagem simplificada dos fluxos de saída das vias (adaptada de [9]).

Apesar destas consequências, a simplificação introduzida evita o uso de variáveis binárias e abre caminho para a aplicação de um grande número de métodos de controle e otimização eficientes (como programação linear, programação quadrática, programação não-linear, controle multivariável) com complexidade polinomial. A importância disto reside no fato que a aplicação de tais métodos permite o controle coordenado centralizado em larga escala e em tempo-real de malhas viárias urbanas.

Para o desenvolvimento de um modelo matemático, a malha viária urbana é representada como um grafo direcionado com vias (aproximações) $z \in Z$ e interseções $j \in J$. Para cada interseção semaforizada j , I_j e O_j são os conjuntos de vias de chegada e saída, respectivamente. Assume-se que a defasagem, o tempo de ciclo C_j e tempo perdido total L_j da interseção j são fixos. Por simplicidade, $C_j = C$, $\forall j \in J$. O controle semafórico da interseção j é baseado em um número fixo de estágios que pertencem ao conjunto F_j , enquanto v_z é o conjunto de estágios em que a via z tem direito de passagem. Os fluxos de saturação S_z , $z \in I_j$, e as taxas de conversão $t_{z,w}$, $z \in I_j$, $w \in O_j$, são conhecidos e fixos.

Por definição, a restrição $\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C$ verifica na interseção j , onde $g_{j,i}$ é o tempo de verde do estágio i na interseção j . Adicionalmente, $g_{j,i}$ é restringido a estar dentro da faixa $[g_{j,i}^{\min}, g_{j,i}^{\max}]$ com $g_{j,i}^{\min}$ e $g_{j,i}^{\max}$ os tempos mínimos e máximos de verde permitidos, respectivamente.

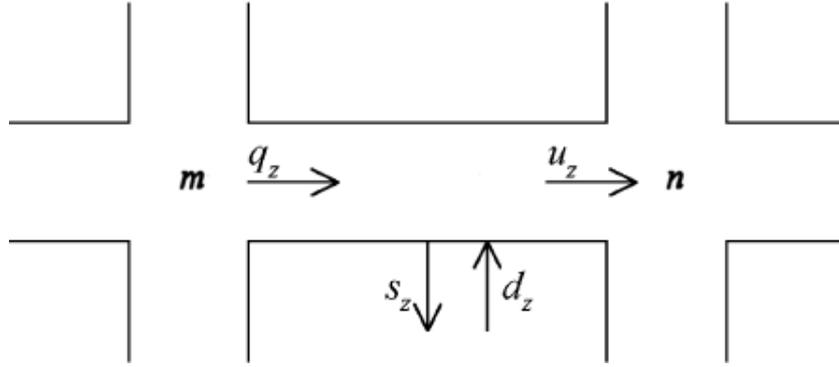


Figura 3.3: Via urbana (adaptada de [10]).

Considere a via (aproximação) z ligando duas interseções m , n tal que $z \in O_m$ e $z \in I_n$ (ver Figura 3.3). A dinâmica na via z é expressa pela seguinte equação:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)], \quad (3.2)$$

onde x_z é o número de veículos na via z , q_z e u_z são os fluxos de entrada e saída, respectivamente, da via z no período $[kT, (k+1)T]$ com T o intervalo de controle e $k = 1, 2, \dots$ um índice de tempo discreto, e d_z e s_z a demanda e o fluxo que sai, respectivamente. O fluxo que sai obedece a relação $s_z(k) = t_{z,0}q_z(k)$ com as taxas de saídas $t_{z,0}$ fixas e conhecidas.

O fluxo de entrada da via z é dado por $q_z(k) = \sum_{w \in I_m} t_{w,z} u_w(k)$, onde $t_{w,z}$ com $w \in I_m$ são as taxas de conversão em direção à via z a partir das vias que entram na interseção m . Assumindo que o espaço disponível nas vias a jusante e que x_z são bastante grandes, o fluxo de saída u_z de uma via é igual ao fluxo de saturação S_z se a via tem direito de passagem, e é igual a zero caso contrário. Esta é a hipótese básica da abordagem *store-and-forward*. Entretanto, se o intervalo de controle T é escolhido não menor que o tempo de ciclo C , um valor médio é obtido por $u_z(k) = S_z G_z(k)/C$, onde G_z é o tempo efetivo de verde na via z calculada como $G_z(k) = \sum_{i \in v_z} g_{j,i}(k)$.

Assuma que estejam disponíveis tempos de verde nominais $g_{j,i}^N$, previamente determinados, que levem a um estado de regime das filas nas vias, sob uma demanda d_z^N que não provoca saturação, isto é, de (3.2)

$$(1 - t_{z,0})q_z^N + d_z^N - u_z^N = 0, \quad (3.3)$$

onde q_z^N e u_z^N são os valores de regime correspondentes.

Introduzindo todo este desenvolvimento em (3.2), a equação de estados seguinte é obtida:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - t_{z,0}) \sum_{w \in I_m} \frac{t_{w,z} S_w (\sum_{i \in v_w} \Delta g_{m,i}(k))}{C} + \Delta d_z(k) - \frac{S_z (\sum_{i \in v_z} \Delta g_{n,i}(k))}{C} \right], \quad (3.4)$$

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

Aplicando (3.4) a uma malha viária arbitrária compreendendo diversas interseções semaforizadas $j \in J$, a seguinte equação de estados (na forma vetorial) descreve a evolução do sistema no tempo

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{g}(k) + \mathbf{T}\Delta\mathbf{d}(k), \quad (3.5)$$

onde \mathbf{x} é o vetor de estados do número de veículos x_z nas vias $z \in Z$, $\Delta\mathbf{g}$ é o vetor $\Delta g_{j,i} = g_{j,i} - g_{j,i}^N$, $\forall i \in F_j, \forall j \in J$, e $\Delta\mathbf{d}$ é o vetor de $\Delta d_z = d_z - d_z^N$, e $\mathbf{A} = I$, \mathbf{B} e \mathbf{T} as matrizes de estado, entrada e perturbação respectivamente. A matriz de entrada \mathbf{B} reflete a topologia da rede, os estágios fixados, ciclo, fluxos de saturação e taxas de conversão. Como x_z é o número de veículos na via z ao invés do tamanho da fila, não é necessário incorporar atraso de transporte na Equação (3.5).

Para a aplicação da metodologia LQR para obtenção de uma lei de controle realimentado sem elementos preditores, ou seja, uma lei de controle que reage ao impacto de perturbações que se manifestaram e não daquelas que irão se manifestar (reativa e não antecipatória), assume-se $\Delta\mathbf{d}(k) = 0$ levando a Equação (3.5) à seguinte equação de estados:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{g}(k). \quad (3.6)$$

A metodologia de otimização LQR deve ser vista neste caso, como um instrumento para derivar uma matriz de ganhos eficiente e não como uma tentativa de otimizar algum critério físico sujeito a modelagens matemáticas precisas. Neste contexto, a hipótese de perturbações zero é aceitável e a Equação (3.6) é utilizada como modelo matemático dentro do problema de controle ótimo LQR.

De maneira a minimizar o risco de sobressaturação e a formação de filas que bloqueiam interseções a montante, pode-se tentar minimizar e balancear as ocupações relativas x_z/x_z^{\max} nas vias, onde x_z^{\max} é a capacidade de armazenamento na via $z \in Z$ (medida em veículos). Um critério quadrático que considera este objetivo de controle tem a forma geral

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (\|\mathbf{x}(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta\mathbf{g}(k)\|_{\mathbf{R}}^2), \quad (3.7)$$

onde \mathbf{Q} é uma matriz diagonal definida não negativa e \mathbf{R} é uma matriz diagonal definida positiva.

O horizonte de tempo infinito na Equação (3.7) é tomado de maneira a obter uma lei realimentada invariante no tempo de acordo com a teoria de otimização LQ [12]. O primeiro termo é responsável pela minimização e balanceamento das ocupações relativas na via z . Para este fim os elementos da diagonal de \mathbf{Q} são definidos como o inverso das capacidades máximas de armazenamento das vias correspondentes. As magnitudes das reações de controle podem ser influenciadas pela escolha da matriz $\mathbf{R} = r\mathbf{I}$. Para este fim a escolha de r é feita por tentativa e erro de maneira a obter o comportamento desejado para a malha viária em que está sendo aplicado o controle.

A minimização do critério de desempenho (3.7) sujeito a (3.6) resulta na lei de controle realimentado:

$$\mathbf{g}(k) = \mathbf{g}^N - \mathbf{L}\mathbf{x}(k), \quad (3.8)$$

onde \mathbf{g} é o vetor de tempos de verde $g_{j,i}, \forall i \in F_j, \forall j \in J$, e \mathbf{L} é a matriz de controle resultante que depende das matrizes do problema \mathbf{B} , \mathbf{Q} e \mathbf{R} , mas que mostrou em investigações por simulação ter pouca sensibilidade com respeito a variações dos parâmetros de tráfego. O cálculo de \mathbf{L} é feito através da solução da equação discreta de Riccati, a seguir, e é realizada *offline* para aplicação *online*.

Conforme apresentado em [9], dadas as matrizes do problema \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{Q} e \mathbf{R} , a matriz de ganhos \mathbf{L} pode ser calculada a partir de:

$$\mathbf{L}(k) = [\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{A} \quad (3.9)$$

onde a matriz de Riccati $\mathbf{P}(k)$ é a solução da equação a diferenças de Riccati

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{Q} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{B} \mathbf{L}(k) \quad (3.10)$$

com a condição terminal $\mathbf{P}(K) = \mathbf{I}$. Partindo desta condição terminal, as Equações (3.9) e (3.10) pode ser executadas retroativamente no tempo para obter $\mathbf{L}(k)$, $k = K-1, K-2, \dots$, com K suficientemente longo para que $\mathbf{L}(k)$ convirja para a matriz de ganhos \mathbf{L} , invariante no tempo.

Para aplicar a Equação (3.8), as medidas das variáveis de estado são necessárias em tempo real. Entretanto, o número de veículos x_z normalmente não pode ser diretamente medido, exceto se detecção por câmaras de vídeo for utilizada. Por esta razão, medidas da ocupação local o_z , coletadas em tempo real por laços indutivos tradicionais, podem ser transformadas no número aproximado de veículos na via por meio de funções não lineares apropriadas $x_z = f_z(o_z(k))$ [9].

Como a metodologia LQR aqui empregada não leva em consideração a existência de restrições de controle, as restrições existentes são impostas após a aplicação da Equação (3.8). Para este fim,

o seguinte problema de otimização é resolvido em tempo real para cada interseção j para especificar tempos de verde factíveis $G_{i,j}$ que estejam o mais próximo possível dos tempos de verde $g_{j,i}$ não factíveis obtidos pelo controlador:

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

sujeito a:

$$\sum_{i \in F_j} G_{j,i} + L_j = C$$

$$G_{j,i} \in [g_{j,i}^{\min}, g_{j,i}^{\max}], \forall i \in F_j.$$

Um algoritmo de baixo custo computacional foi desenvolvido para a resolução deste problema. A solução exata é encontrada em um número finito de iterações que não excede o número $|F_j|$ de estágios na interseção i .

A estrutura da matriz de controle \mathbf{L} faz com que a lei de controle tenha a característica de *gating*, ou seja, de fechar as entradas da malha viária controlada. Assim, protege as vias a jusante com um número elevado de veículos de saturarem, diminuindo os tempos de verde das vias a montante. Esta característica pode ser acentuada com a utilização de pesos nas estimativas de número de veículos nas vias.

Outras duas leis de controle que dispensam o uso de valores nominais dos tempos de verde foram obtidas em [10].

Dadas as decisões de porcentagens de verde desta parte da estratégia TUC, bem como as entradas que esta parte recebeu dos controladores de Ciclo e Defasagem, configurações completas dos sinais para toda a rede, incluindo tempo de ciclo, porcentagens de verde e defasagens estão disponíveis para implementação, ao final do controle de porcentagens de verde.

Controle de ciclo

Para permitir a coordenação por meio de valores apropriados de defasagem entre as interseções, o mesmo tempo de ciclo é utilizado para toda a rede. Um tempo de ciclo mais longo tipicamente aumenta a capacidade da interseção pois a proporção do tempo perdido constante fica proporcionalmente menor. Por outro lado, um tempo de ciclo longo pode aumentar o atraso veicular e interseções não saturadas devido a tempos de espera maiores durante as fases vermelhas.

Considerando as observações anteriores, o objetivo do controle de ciclo deve ser aumentar a capacidade das interseções o quanto for necessário para limitar o nível máximo de saturação observado na rede. Com TUC, este objetivo é efetuado através da aplicação de um algoritmo realimentado que usa como critério para aumentar ou reduzir o ciclo o nível de saturação máximo corrente de uma porcentagem pré-especificada de vias da rede. O algoritmo realimentado para controle de ciclo compreende os três passos que seguem:

1. uma porcentagem p pré-especificada de vias da rede com carregamento máximo corrente $\sigma_z(k) = x_z(k)/x_z^{\max}$ é identificada e, dos carregamentos correspondentes, é feita a média para obter o carregamento médio máximo $\sigma(k)$;
2. o ciclo da rede é calculado pela lei de controle realimentado (controlador proporcional):

$$C(k) = C^N + K^c(\sigma(k) - \sigma^N) \quad (3.11)$$

onde C^N é o tempo de ciclo nominal da rede; σ^N é um carregamento médio nominal; K^c é um parâmetro de controle que afeta a intensidade das reações do controlador. Após a aplicação da Equação (3.11), o tempo de ciclo calculado é restringido para dentro da faixa $[C_{\min}, C_{\max}]$, se necessário, para se tornar factível, onde C_{\min} e C_{\max} são os tempos de ciclo mínimos e máximos permitidos, respectivamente;

3. se o tempo de ciclo resultante $C(k)$ for suficientemente grande enquanto todas as vias se aproximando de determinada interseção tiverem níveis de saturação suficientemente baixos, isto é, seu carregamento corrente $\sigma_z(k)$ é menor do que um limite pré especificado σ_t , então estas interseções não saturadas operarão com ciclo meio tempo de ciclo (executarão tempos de ciclo de $C(k)/2$).

Os dois primeiros passos procuram ajustar o tempo de ciclo da rede aos níveis máximos de saturação observados, enquanto o terceiro passo procura reduzir os atrasos que ocorreriam em interseções específicas não saturadas devido a altos tempos de ciclo. A justificativa teórica de controle para o controle proporcional da Equação (3.11) está de acordo com o mencionado impacto do tempo de ciclo na capacidade das interseções. Mais precisamente, um alto tempo de ciclo aumenta proporcionalmente a capacidade da interseção. Este último, por sua vez, leva a reduções contínuas de $x_z(k)$ (e portanto do carregamento da via) que corresponde a um impacto integrativo. Em outras palavras, o processo sob controle de ciclo inclui um integrador; assim, o controlador proporcional é perfeitamente apropriado para estabilizar o carregamento da via em torno de um valor desejado (zero).

Controle de Defasagem

A especificação de defasagem deveria idealmente levar em consideração a possível existência de filas (particularmente sob condições não saturadas) e este fato é tentado pelo controlador de defasagem de TUC, o qual se baseia nas seguintes suposições:

- a defasagem é inicialmente especificada ao longo de arteriais de mão única que não se interceptam. Notar que para TUC arteriais são definidas como uma sequência arbitrária de vias que não precisam corresponder necessariamente a arteriais físicas da rede;
- no caso de arteriais de mão dupla, uma defasagem é especificada para cada direção e a defasagem que será finalmente implementada é a soma ponderada das defasagens nas duas direções. Alternativamente, a direção com maior carregamento pode ser selecionada (online) para determinar as defasagens da arterial;
- no caso de arteriais que se interceptam, TUC considera uma ordem de prioridade pré-especificada das arteriais de acordo com suas importâncias relativas em relação à especificação da defasagem, e o controle de defasagem é implementado a cada arterial sequencialmente, começando com a arterial que tem maior prioridade.

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

Como mencionado anteriormente, TUC considera a possível existência de filas ao especificar a defasagem entre duas interseções sucessivas por meio da aplicação de uma lei de controle realimentado simples. Considere duas interseções sucessivas j_1 e j_2 e a via z da rede que liga ambas, de j_1 para j_2 , e que recebe direito de passagem no estágio principal da interseção j_2 (Figura 3.4) com comprimento l_z e velocidade de cruzeiro v_z .

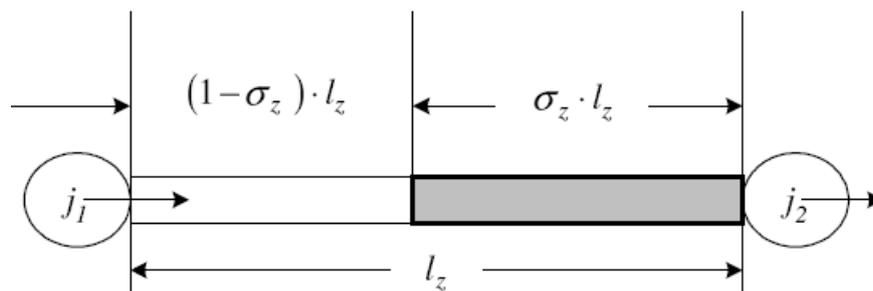


Figura 3.4: Via z com fila (em cinza) (adaptada de [11]).

O comprimento da fila (parte cinza da figura) é aproximadamente igual a $\sigma_z(k) \cdot l_z$. Enquanto o número de veículos na via for igual a zero, a defasagem entre as interseções deve ser de um valor igual ao tempo de viagem em velocidade de cruzeiro l_z/v_z na via, isto é, o ciclo da interseção a jusante deve começar correspondentemente depois do ciclo da interseção a montante (defasagem positiva). A medida que o número de veículos na via z cresce, a defasagem deve decrescer correspondentemente de maneira a permitir um descarregamento parcial da fila que se forma na via. Então o ciclo na interseção a jusante deverá começar mais cedo do que no caso de inexistência de fila, e em alguns casos, pode até mesmo começar mais cedo que o ciclo na interseção a montante (defasagem negativa).

Mais especificamente, uma defasagem ideal seria obtida quando as duas ondas de fluxo veicular seguintes se encontrassem exatamente na cauda da fila existente:

1. onda de fluxo criada devido à mudança do sinal verde na interseção a montante j_1 ; esta onda se move a jusante com velocidade v_z ; assim, irá atingir a cauda da fila no tempo $[1 - \sigma_z(k)] \cdot l_z/v_z$ após a mudança para sinal verde;
2. onda cinemática criada devido à mudança para verde na interseção a jusante j_2 ; esta onda se move a montante (ao longo da fila) com velocidade v^c que geralmente é estimada em torno de 15 km/h; assim, a onda cinemática irá atingir a cauda da fila no tempo $\sigma_z(k) \cdot l_z/v^c$.

Baseado no exposto, a defasagem ideal t_{j_1, j_2} na direção que leva de j_1 a j_2 deve satisfazer:

$$\frac{[1 - \sigma_z(k)] \cdot l_z}{v_z} = t_{j_1, j_2}(k) + \frac{\sigma_z(k) \cdot l_z}{v^c}. \quad (3.12)$$

Resolvendo esta equação para t_{j_1, j_2} , se obtém a lei de controle de defasagem

$$t_{j_1, j_2}(k) = \frac{l_z}{v_z} - l_z K_z^o \frac{x_z(k)}{x_z^{\max}} \quad (3.13)$$

onde K_z^o é um parâmetro de controle igual a $(v^c - v_z)/(v^c v_z)$.

De maneira análoga, uma segunda defasagem t_{j_2, j_1} pode ser especificado para a direção de j_2 para j_1 . Então, a nova defasagem $t_{1,2}$ entre as duas interseções pode ser calculada como segue:

$$t_{1,2} = W_{j_1, j_2} t_{j_1, j_2}(k) + W_{j_2, j_1} t_{j_2, j_1}(k) \quad (3.14)$$

onde W_{j_1, j_2} e W_{j_2, j_1} (com $W_{j_1, j_2} + W_{j_2, j_1} = 1$) são pesos, de acordo com os quais a defasagem de cada direção vai contribuir para a defasagem final que será implementada entre as duas interseções.

Para implementar a defasagem especificada na Equação (3.14), um ciclo de transição C_{j_2} é temporariamente implementado na interseção j_2 . O ciclo de transição é implementado uma única vez, depois da qual as interseções estarão coordenadas de acordo com a nova defasagem. O ciclo de transição é calculado como segue:

$$C_{j_2}(k) = \begin{cases} (C + \Delta t_{1,2}(k)) \bmod C & \text{se } (C + \Delta t_{1,2}(k)) \bmod C \geq C_{\min} \\ C + (C + \Delta t_{1,2}(k)) \bmod C & \text{senão} \end{cases} \quad (3.15)$$

onde C é o tempo de ciclo normal sob o qual as interseções operariam se controle de defasagem não fosse aplicado, e $\Delta t_{1,2}(k)$ é a diferença entre nova defasagem $t_{1,2}(k)$ e a anterior $t_{1,2}(k-1)$, isto é, $\Delta t_{1,2}(k) = t_{1,2}(k) - t_{1,2}(k-1)$. O ciclo de transição calculado com a Equação (3.15) deve respeitar as restrições de tempo de ciclo máximo e mínimo mencionadas na subseção anterior. O valor fornecido por meio da aplicação da Equação (3.15), sempre respeita o o tempo de ciclo mínimo C_{\min} , mas pode violar o tempo máximo de ciclo C_{\max} . Para evitar isto, após a aplicação da Equação (3.15), o tempo de ciclo de transição calculado é restringido a C_{\max} , se necessário, para ser tornar factível. Neste caso, a defasagem resultante não será a desejada, mas a estrutura realimentada da Equação (3.13), entretanto, vai por fim atingir a defasagem desejada no próximo intervalo de controle de defasagem.

Generalização das lógicas descritas anteriormente, leva às seguintes fórmulas entre duas interseções e consequentemente ao longo da arterial:

$$t_{j_i, j_{i+1}}(k) = \frac{l_z}{v_z} - l_z K_z^o \frac{x_z(k)}{x_z^{\max}} \text{ com } z \in (O_{j_i} \cap I_{j_{i+1}}) \quad (3.16)$$

$$t_{j_{i+1}, j_i}(k) = \frac{l_z}{v_z} - l_z K_z^o \frac{x_z(k)}{x_z^{\max}} \text{ com } z \in (O_{j_{i+1}} \cap I_{j_i}) \quad (3.17)$$

$$t_{i, i+1}(k) = W_{j_i, j_{i+1}} t_{j_i, j_{i+1}}(k) + W_{j_{i+1}, j_i} t_{j_{i+1}, j_i}(k) \quad (3.18)$$

$$C_{j_{i+1}} = \begin{cases} \left(C + \sum_{n=1}^i \Delta t_{n, n+1}(k) \right) \bmod C & \text{se } \left(C + \sum_{n=1}^i \Delta t_{n, n+1}(k) \right) \bmod C \geq C_{\min} \\ C + \left(C + \sum_{n=1}^i \Delta t_{n, n+1}(k) \right) \bmod C & \text{senão} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$C_{j_{i+1}} = \begin{cases} C_{j_{i+1}}(k) & \text{se } C_{j_{i+1}}(k) \leq C_{\max} \\ C_{\max} & \text{senão} \end{cases} \quad (3.20)$$

onde I_{j_i} e O_{j_i} são os conjuntos de vias que chegam e deixam a interseção j_i , respectivamente. A soma que aparece na Equação (3.19) é necessária para considerar as mudanças de defasagem em todas as interseções anteriores na arterial.

Os ciclos de transição especificados pelo controlador de defasagem de TUC, como descrito acima, são passados ao controlador de porcentagens de verde para serem usados no próximo intervalo de controle de porcentagens de verde das interseções consideradas. No caso em que o controlador de ciclo de TUC fornece simultaneamente um novo tempo de ciclo para o controlador de porcentagens de verde, o ciclo de transição é utilizado uma única vez para implementar novas defasagens, depois da qual o ciclo fornecido pelo controlador de ciclo é implementado até que um novo ciclo de transição seja produzido.

3.2 Discussão da abordagem proposta

Aplicar o método ML com a estratégia de controle TUC traz três problemas principais:

- i) mudanças de defasagem de meio tempo de ciclo;
- ii) sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças nas porcentagens de verde; e
- iii) sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças no tempo de ciclo.

Cada um destes problemas será discutido separadamente nas subseções que seguem.

3.2.1 Mudanças de defasagem de meio tempo de ciclo

Este problema surge porque a otimalidade da largura de banda implica na centralização dos centros de vermelho. Então interseções que têm suas defasagens modificadas têm que ter o centro do tempo de vermelho deslocado de meio ciclo para se ajustar ao novo conjunto de coordenação. Um plano de transição seria necessário, a exemplo do que é feito na estratégia TUC, mas isto foi desprezado no presente trabalho. Assim, nos experimentos realizados, mudanças na defasagem podem infringir requisitos de tempos mínimos de verde para fases que tiverem seus tempos de verde menores que duas vezes o tempo de verde mínimo mais o tempo de entreverdes (amarelo + vermelho total).

A Figura 3.5 mostra a temporização semafórica em três interseções. Na figura, o conjunto de sincronização dos semáforos é inicialmente $\theta = [0.0 \ 0.5 \ 0.5]$. No tempo 3, a defasagem da interseção

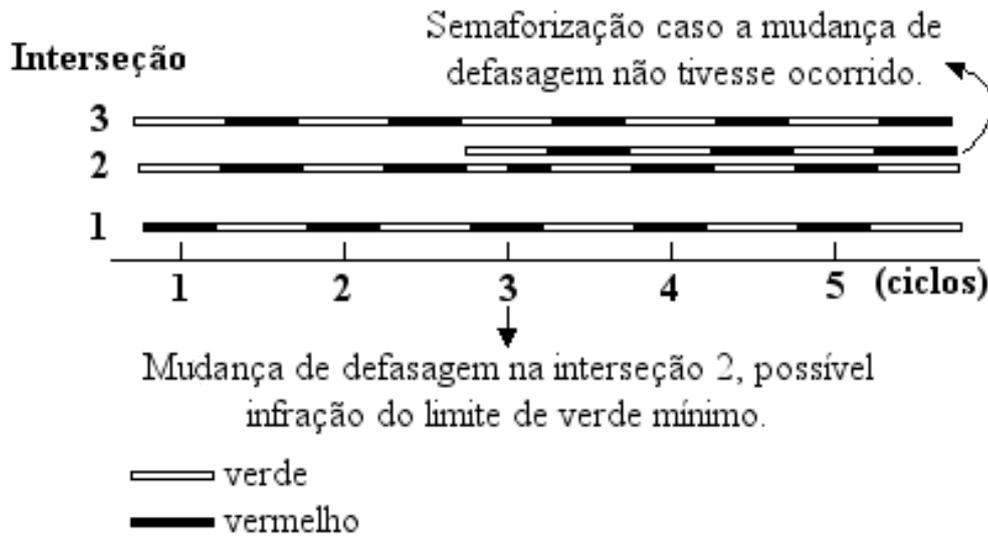


Figura 3.5: Mudança de defasagem de meio tempo de ciclo.

dois muda e $\theta = [0.0 \ 0.0 \ 0.5]$. Paralelo à semaforização da interseção dois, está a semaforização caso a mudança de defasagem não tivesse ocorrido. Devido à mudança na defasagem (feita de forma abrupta), o tempo de verde e de vermelho da interseção dois durante esta transição são cortados pela metade. Notar que a transição desta maneira afeta tanto a via arterial como a via secundária.

3.2.2 Sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças nas porcentagens de verde

Este problema, da mesma forma que o problema anterior, surge porque a otimalidade da largura de banda implica na centralização dos centros de vermelho. Então, mudanças nos tempos de verde devem ser referenciadas ao centro dos tempos de vermelho e não ao início do tempo de verde do estágio principal como normalmente acontece. A Figura 3.6 mostra como uma redução no tempo de verde Δv acontece para os dois casos. Um aumento no tempo de verde acontece de forma análoga.

Mudanças expressivas nos tempos de verde, mesmo não havendo mudança no tempo de ciclo podem exigir mudanças no conjunto de sincronização para manter o conjunto ótimo.

Do ponto de vista de experimentos, quando não se deseja observar os efeitos das mudanças nos tempos de verde, este problema pode ser evitado por meio da escolha apropriada de fluxos de maneira que as proporções de verde sejam praticamente constantes durante a realização de experimentos. Do ponto de vista prático torna-se necessário calcular nova coordenação periodicamente para manter a largura máxima de banda. Este aspecto é discutido novamente na subseção seguinte.

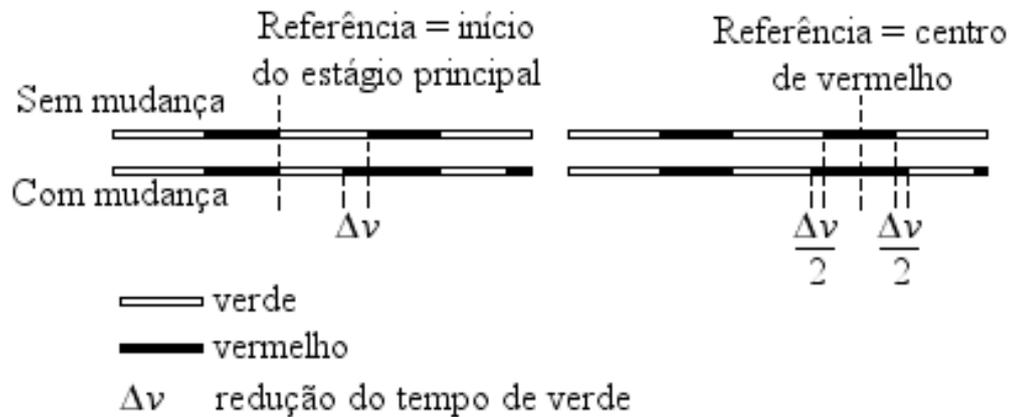


Figura 3.6: Mudança do tempo de verde.

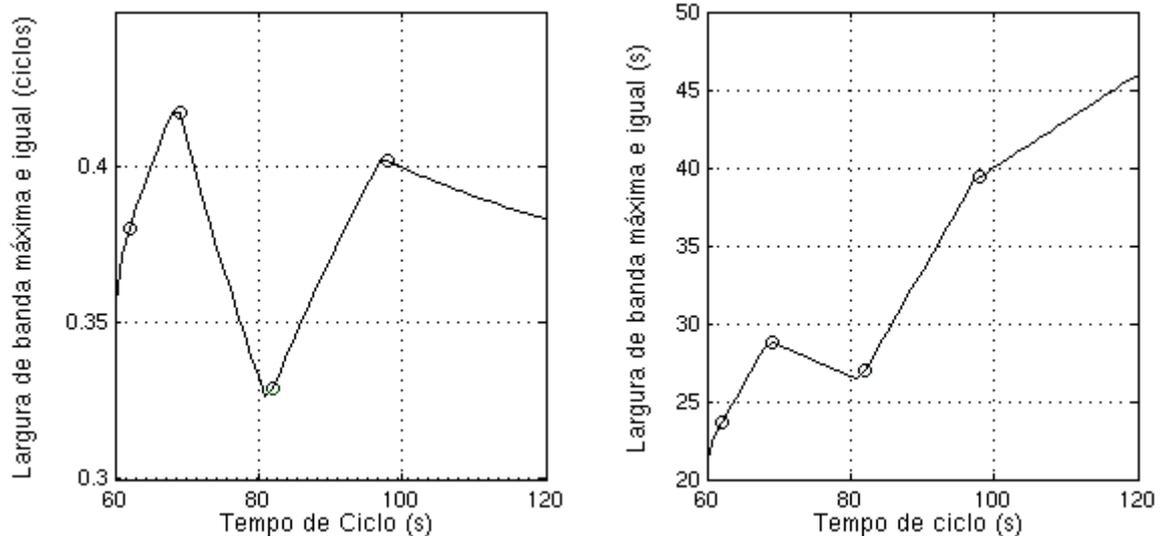


Figura 3.7: Largura da banda como função do tempo de ciclo.

3.2.3 Sensibilidade do conjunto de sincronização a mudanças no tempo de ciclo

Para entender este problema, a Figura 3.7 mostra o que acontece quando as porcentagens de verde estão fixas e larguras de banda são calculadas pelo método ML de acordo com a variação do tempo de ciclo C na faixa de 60 a 120 segundos. Círculos indicam quando o conjunto de coordenação θ se modificou como resposta à mudança do tempo de ciclo. Como pode ser visto (por exemplo, em torno do tempo de ciclo de 82 segundos), uma pequena mudança no tempo de ciclo implica numa mudança repentina no conjunto de sincronização. A Tabela 3.1 apresenta os dados utilizados para obtenção dos gráficos e a Tabela 3.2 mostra os conjuntos de coordenação que resultam dos diferentes tempos de ciclo.

O controle de ciclo TUC é realizado a cada n segundos e o controle de defasagem é aplicado

Interseção	1	2	3	4	5
x (m)	0	315	680	1080	1440
$v = \bar{v}$ (km/h)	80	80	80	80	-
$P = \bar{P}$ (ciclos)			0.2		
r (ciclos)			$1 - \frac{(C-10)0.8}{C}$		

Tabela 3.1: *Dados do exemplo.*

C	θ				
60 a 61 s	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0
62 a 68 s	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5
69 a 81 s	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0
82 a 97 s	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
98 a 120 s	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0

Tabela 3.2: *Conjuntos de sincronização para o exemplo.*

em intervalos de kn segundos, com $k = 1, 2, \dots$ um parâmetro de projeto. Os intervalos de tempo para aplicação das leis de controle respeita o tempo de ciclo, então mesmo que o tempo n ou kn tenha sido atingido, o controle será calculado apenas ao final do ciclo.

A implicação deste problema é que defasagens devem ser recalculadas toda vez que TUC calcula um novo tempo de ciclo. Por outro lado o ideal é ter $k = 1$ em decorrência do problema anterior. Assim, mesmo que o controle de ciclo não forneça um ciclo diferente do anterior, o controle de defasagem pode impor uma modificação decorrente das mudanças nos tempos de verde. Devido ao problema anterior o controle de defasagem poderia até mesmo ser aplicado ciclo a ciclo, mas isto é desnecessário. Foi observado nos experimentos que um conjunto de sincronização costuma se manter por vários ciclos, mesmo que ocorram mudanças nos tempos de verde. E mesmo após mudanças nos tempos de verde, uma banda continuaria existindo, mas até o próximo cálculo das defasagens, não seria ótima.

3.3 Aspectos de Implementação Computacional

O simulador SITRA-B+ (ver Capítulo 4) permite a utilização de estratégias de controle de tráfego externas ao simulador. Para isso é necessário criar uma interface que realize a comunicação da estratégia de controle com o simulador através de arquivos texto (ASCII).

Uma interface foi desenvolvida para a aplicação das estratégias TUC e TUC-ML externamente ao simulador, enquanto as estratégias a tempos fixos foram implementadas internamente ao simulador.

A interface foi desenvolvida orientada a objetos em linguagem C++ e fez uso da estratégia TUC, fornecida pelo Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Simulação da Universidade Técnica de Creta, implementada como uma função em linguagem C. Todo o desenvolvimento se deu em ambiente Linux e utilizou-se o compilador g++. Como SITRA foi desenvolvido para Microsoft Windows, a ferramenta Wine que emula uma API Windows em Linux, foi utilizada para que SITRA pudesse ser executado em ambiente Linux.

O algoritmo de Morgan e Little para o cálculo de bandas máximas foi implementado em C++ como parte de uma classe para este fim. O algoritmo implementado é idêntico ao apresentado no Apêndice B.

A interface pode ser utilizada para aplicar a estratégia TUC em qualquer malha viária. A estratégia TUC-ML, por outro lado, só pode ser aplicada em vias arteriais com duas fases por interseção.

Capítulo 4

Simulações

A rigorous analysis of an agency's needs and resources needs to be completed before implementing an adaptive control system to make sure that adaptive control is a good fit.

R. M. Garbacz [16]

Este capítulo apresenta as simulações realizadas. Inicialmente é apresentado o simulador de tráfego urbano utilizado, SITRA-B+. Em seguida a malha viária utilizada para as simulações é apresentada. E finalmente serão apresentados as simulações realizadas e seus resultados.

4.1 Simulador de Tráfego SITRA-B+

SITRA-B+ [42] é um programa de simulação dedicado aos problemas de tráfego viário urbano. A simulação do tráfego é microscópica, isto é, representa-se o tráfego considerando os veículos individualmente.

O comportamento dos veículos na malha viária resulta da integração, a passo de tempo constante de uma equação diferencial, chamada lei de seguimento veicular, que fornece a aceleração de um veículo a partir do comportamento do veículo que o antecede. Mais detalhes sobre este modelo serão dados na Subseção 4.1.3. Modelos complementares, como modelos de troca de fila, aceitação de inserção e passagem de veículos em cruzamentos ou rotatórias, também são utilizados. Os movimentos internos em interseções complexas são descritos por faixas internas e realizados por meio da gerência de conflitos. A duração de uma simulação pode ser dividida em espaços ou intervalos de tempo durante os quais certos parâmetros de simulação são variados, e outros parâmetros se mantêm constantes durante toda a simulação.

O desempenho do programa depende principalmente do número de veículos considerados a cada instante de simulação. Esse número depende tanto do tamanho, como da capacidade da malha viária. Assim, para uma malha de determinado tamanho, o desempenho será limitado pelos fluxos desejados. A limitação do tamanho da malha, da quantidade de veículos e portanto, do desempenho, é dependente do hardware utilizado.

O objetivo de um simulador de tráfego é representar o comportamento dos veículos em uma malha viária, e calcular os indicadores que permitam caracterizar o escoamento do tráfego em um dado período. As principais aplicações de SITRA consistem no estudo de modificações na geometria da malha viária, ou na calibração e avaliação de estratégias de gestão do tráfego.

As estratégias de gestão de tráfego que podem ser testadas com SITRA são de dois tipos:

- as estratégias de controle semafórico: pesquisa a temporização ótima para a mudança de sinal nos diferentes cruzamentos da malha. Estas podem ser planos fixos por hora ou estratégias adaptativas/dinâmicas; e
- as estratégias de condução: conduzir um veículo ou conjunto de veículos da sua origem até seu destino otimizando um critério dado.

Neste trabalho serão testadas estratégias de controle semafórico.

Um dos principais interesses de SITRA é sua independência em face a sistemas de testes. Se se deseja testar um novo sistema não é necessário modificar ou compilar SITRA. Estes programas externos devem no entanto, satisfazer o protocolo de comunicação (por arquivos texto) imposto por SITRA. As estratégias semafóricas funcionam em paralelo com SITRA e a comunicação se faz graças a mecanismos de sincronização que asseguram a validade dos dados transmitidos.

4.1.1 Características gerais do modelo de simulação

Descreve-se em seguida as características gerais do modelo de simulação que permite a representação do tráfego viário. Mais detalhes do modelo serão dados na Subseção 4.1.3.

Os veículos no SITRA são individualizados (simulação microscópica), e o avanço dos veículos na malha viária é dado por uma lei de seguimento veicular parametrizada que exprime o estado de um veículo em função do estado dele mesmo e do veículo à sua frente na instante de tempo que antecede o cálculo.

Uma malha viária é modelada de maneira geral como um conjunto de pistas e de interseções, onde uma pista representa um conjunto de faixas entre duas interseções para um único sentido de circulação. A estrutura da malha viária no modelo de simulação é como segue:

- as faixas são individualizadas no interior das pistas;
- as interseções são descritas de maneira microscópica segundo um método que leva em conta as faixas internas, a gestão de conflitos e a possibilidade de impedir movimentos de conversão. Permite também descrever paradas de ônibus e faixas reservadas para veículos especiais;
- a malha viária simulada é delimitada por entradas onde são gerados os veículos e saídas por onde eles deixam a malha viária;
- pode-se modelar estacionamentos de capacidade limitada com pistas de acesso específicas;
- pode-se da mesma maneira modelar estacionamentos situados em lateral de calçada onde o acesso é lateral.

Na modelagem macroscópica, utiliza-se o termo “nó” para designar seja uma interseção, seja um nó de entrada, seja um nó de saída, seja um nó de estacionamento. Dois nós podem ser ligados entre si por um ou mais arcos orientados que representam portanto as pistas. Na modelagem microscópica, um nó é um ponto de conexão e um arco orientado é uma faixa. A Figura 4.1 mostra os principais elementos da modelagem. Os sensores, localizados em uma pista, são do tipo laço magnético ou do tipo balisa (com comunicação pista rádio por exemplo).

Os veículos circulando nesta malha viária pertencem a categorias com características parametrizadas definidas pelo usuário sendo geométricas e cinemáticas, e podem ser gerados:

- utilizando-se uma matriz OD (Origem Destino) e uma distribuição inicial, onde cada elemento da matriz contém o fluxo médio de veículos por tipo de veículo e por intervalo de tempo simulado, cada um destes fluxos divididos nos diferentes itinerários selecionados pelo usuário;
- a partir da média de fluxos desejados na entrada e as porcentagens de conversão;
- descrevendo-se os horários particulares de veículos nas entradas, o que permite gerar linhas regulares de ônibus ou veículos que têm um comportamento excepcional, como veículos de emergência.

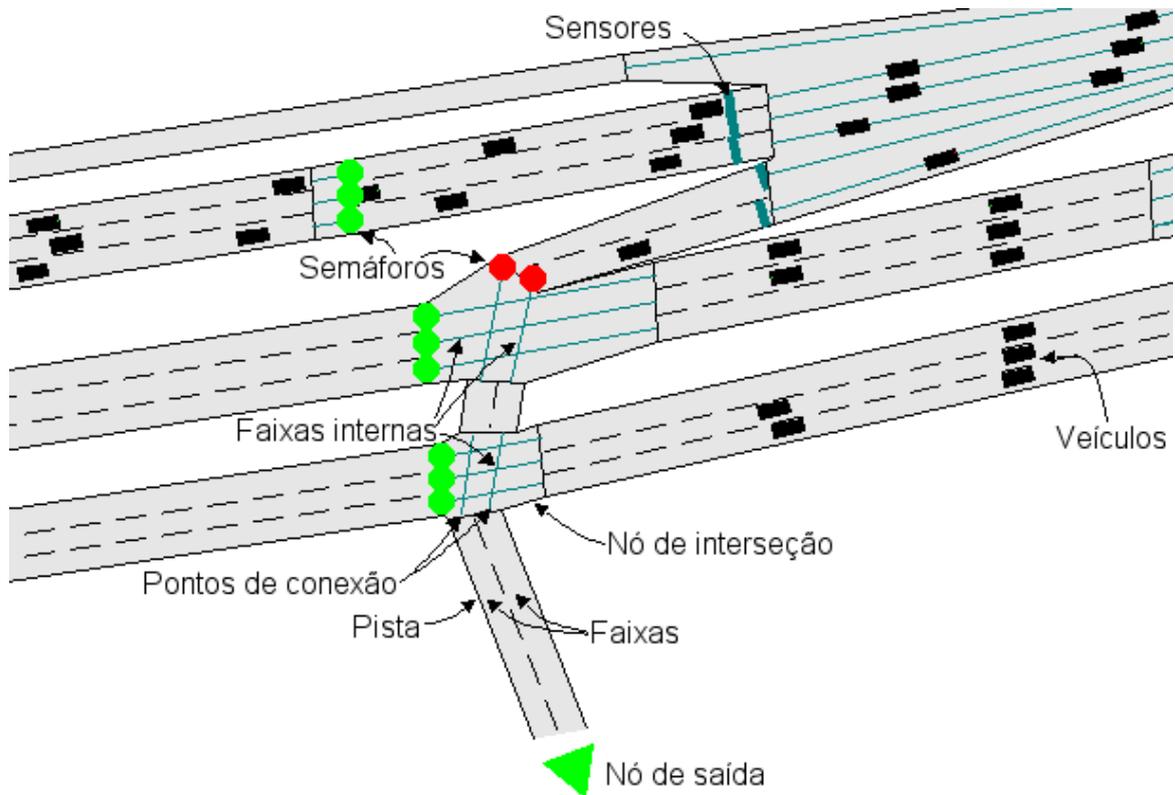


Figura 4.1: Elementos da modelagem com SITRA.

4.1.2 Modos de funcionamento do SITRA

Dispõe-se de dois modos de funcionamento para o SITRA:

- **o modo gráfico:** pode-se visualizar passo a passo o estado do tráfego e pode-se consultar os objetos gráficos durante a simulação animada. A escala de representação da malha viária pode ser alterada com a simulação em andamento; e
- **o modo não gráfico:** menor esforço computacional na simulação, quando se deseja apenas o resultado final.

Ainda que SITRA possua um modo gráfico, a interface com o usuário durante a modelagem da malha viária e na avaliação dos resultados é toda feita por arquivos textos (ASCII) com características determinadas pelo fabricante. É também através destes arquivos que programas externos se comunicam com o simulador.

4.1.3 Modelo de Tráfego

Para a realização das simulações, serão feitos ajustes apropriados nos parâmetros do modelo de tráfego do simulador. Para compreensão das necessidades dos ajustes e como eles refletem no comportamento da simulação, esta sub-seção apresenta brevemente o modelo de tráfego [34] do simulador SITRA.

O modelo de tráfego foi desenvolvido de maneira a assegurar compatibilidade entre a modelagem microscópica e a modelagem macroscópica.

Na abordagem macroscópica deseja-se determinar o fluxo q , a velocidade espacial média v e a densidade k . Estas variáveis estão relacionadas pela expressão:

$$q = k \cdot v \quad (4.1)$$

A modelagem macroscópica leva em consideração medidas de campo, de onde se observa que:

$$q|_{k=k_m} = q_m \quad (4.2)$$

$$\left. \frac{\partial q}{\partial k} \right|_{k=k_m} = 0 \quad (4.3)$$

onde k_m é a densidade quando o fluxo atinge o valor máximo q_m .

Quando a densidade é muito baixa a velocidade individual de cada veículo não está relacionada com a densidade, estando apenas restrita pelo limite de velocidade da pista V_l . Assim, a Equação (4.1) passa a ser $q = k \cdot V_l$ e:

$$q|_{k=0} = 0 \quad (4.4)$$

$$\left. \frac{\partial q}{\partial k} \right|_{k=0} = V_l. \quad (4.5)$$

A densidade não pode exceder um valor máximo k_{jam} que é a densidade quando a pista está congestionada e todos os veículos estão parados. Assim:

$$q|_{k=k_{jam}} = 0 \quad (4.6)$$

SITRA utiliza uma modificação do modelo de Helly [34] de seguimento veicular para obter a

aceleração \ddot{x} no tempo $t + T$ de um veículo $n + 1$ que segue um veículo n :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = C_1 \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + C_2 \cdot [x_n(t) - x_{n+1}(t) - d] \quad (4.7)$$

onde C_1 é o parâmetro de controle da velocidade, C_2 é o parâmetro de controle do *headway* e d é o *headway* desejado.

Em regime permanente, a distância entre cada par de veículos é a mesma e então:

$$k = \frac{1}{d}, \quad (4.8)$$

e a velocidade de todos os veículos é constante, isto é, $\dot{x}_n = v, \forall n$.

Para compatibilidade com o modelo macroscópico, o *headway* desejado é dado por:

$$d = \frac{v}{V_{\max} - v} \cdot \lambda + l \quad (4.9)$$

onde λ é um valor constante.

Utilizando as Equações (4.1) e (4.8), e introduzindo a velocidade limite V_l e a densidade k_0 , a partir da qual a velocidade passa a estar relacionada com a densidade, obtém-se o seguinte modelo velocidade-densidade:

$$\begin{aligned} v &= V_l && \text{para } k < k_0 \\ v &= \frac{\left(\frac{1}{k} - l\right) V_{\max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l} && \text{para } k \geq k_0 \text{ e } k \leq k_{\text{jam}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

O modelo de fluxo derivado é:

$$\begin{aligned} q &= k \cdot V_l && \text{para } k < k_0 \\ q &= \frac{(1 - k \cdot l) V_{\max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l} && \text{para } k \geq k_0 \text{ e } k \leq k_{\text{jam}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Para compatibilidade de modelos ainda é necessário que:

$$\lambda = l \cdot \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (4.12)$$

com $\alpha = k_m / K_{\text{jam}} = l \cdot k_m$, e:

$$V_{\max} = \frac{q_m \cdot l}{\alpha^2}. \quad (4.13)$$

A Figura 4.2 mostra duas curvas correspondentes aos modelos de velocidade-densidade e fluxo, dados pelas Equações (4.10) e (4.11) respectivamente. Os dados utilizados para obtenção destas curvas foram $q_m = 0,25$ veh/s, $\alpha = 0,32$, $V_l = 13,8$ m/s, $l = 7$ m e $V_{\max} = 17,1$ m/s, implicando em $\lambda = 31,6$ m.

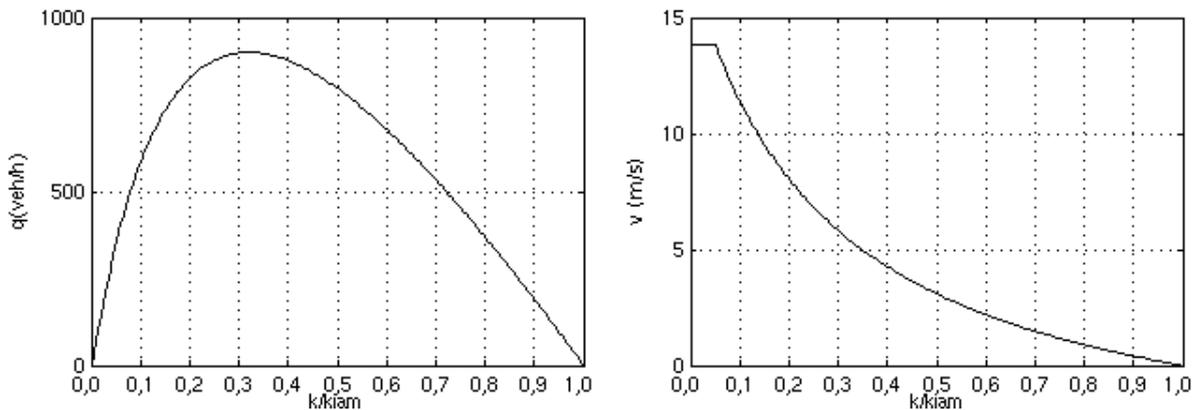


Figura 4.2: Exemplo de aplicação do modelo de tráfego do SITRA.

4.2 Malha viária simulada

A malha viária simulada representa uma arterial com cinco interseções e 1,8 km de extensão. A Figura 4.3 mostra o aspecto geral da malha simulada.

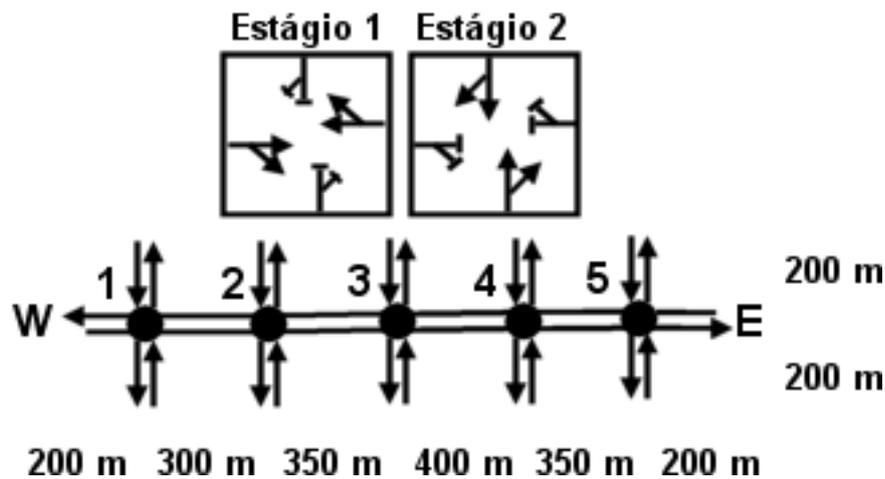


Figura 4.3: Aspecto geral da malha viária simulada.

É uma via arterial de mão dupla com duas faixas em cada sentido. Em todas as interseções chegam duas pistas transversais, uma de S e a outra de N, com uma faixa. Todas as pistas têm fluxo de saturação de 1800 veh/h por faixa. A velocidade máxima permitida é de 80 km/h. A figura apresenta também as distâncias entre interseções e os estágios possíveis. As distâncias entre interseções,

número de interseções e velocidade máxima permitida foram baseadas em uma via arterial real. As demais escolhas, procuram caracterizar uma via arterial em que predomina o fluxo de veículos pela arterial, com menor volume nas transversais e com a possibilidade de conversão à esquerda e/ou à direita.

Os parâmetros do modelo de tráfego foram escolhidos de maneira a tentar obter um valor alto para k_0 já que, em sistemas de progressão, deseja-se operar abaixo deste valor onde a velocidade não varia com o fluxo (ver Figura 4.2, onde $k_0 \simeq 0,05$). Os dados utilizados foram $q_m = 1800$ veh/h/faixa, $V_l = 80$ km/h, $l = 6$ m e $V_{\max} = 120$ km/h. O fluxo encontrado para $k = k_0$ foi $q|_{k=k_0} = 1121,5$ veh/h/faixa. A velocidade média dos veículos na arterial é de 72 km/h quando não há fluxo nas transversais e não há semaforização, devido a outros parâmetros do modelo, como coeficiente multiplicador da velocidade e seu desvio padrão. Esta velocidade foi a adotada para determinação das larguras de banda. Simulações realizadas (não apresentadas aqui) mostraram que o desempenho de um plano a tempos fixos sofreu pouca influência com relação à escolha da velocidade.

A escolha do fluxo total entrando na via foi feita de tal maneira que o fluxo por faixa se mantivesse menor que $q|_{k=k_0} = 1121,5$ veh/h. Desta forma, na curva velocidade concentração, estaria se operando no platô. A distribuição base foi de 85 % do volume base (o que entra em uma via da arterial mais o que entra em uma via transversal) para as entradas na arterial e 15 % nas entradas transversais. Devido as variações provocadas nas simulações, tanto nas taxas de conversão, como nos fluxos, esta proporção sofreu variações. Assim, há o predomínio de fluxo de veículos na via arterial, como é o desejado.

4.3 Simulações e resultados

Foram realizados cinco conjuntos de simulações. Todos os conjuntos de simulações foram realizados aplicando três estratégias diferentes, uma para cada simulação do conjunto:

1. estratégia de controle a planos de **tempo fixo** otimamente ajustados pelos métodos de Webster [44] (ciclo e porcentagens de verde) e ML [35] (defasagens). As mudanças de planos foram programadas procurando o melhor desempenho desta estratégia;
2. estratégia de controle em tempo-real **TUC** com os módulos de controle de porcentagens de verde e controle de defasagens ativados (Conjuntos de Simulações 1, 2 e 3), e com os módulos de controle de porcentagens de verde, controle de ciclo e controle de defasagens ativados (Con-

juntos de Simulações 4 e 5). Os planos nominais utilizados foram obtidos pela aplicação dos métodos de Webster e ML; e

3. estratégia de controle **TUC-ML**. Como a estratégia de controle TUC, mas com o módulo de controle de defasagens desativado e substituído por um módulo que aplica em tempo-real o método ML para o ajuste de defasagens.

Todas as simulações contaram com vinte minutos de inicialização em que o fluxo foi mantido constante com o valor desejado para o início da simulação. Desta maneira eliminou-se o período em que a rede está vazia e permitiu-se que a estratégia TUC já estivesse operando com valores de controle diferentes dos nominais ao início da coleta de dados.

Para a utilização do método de Webster foi considerado que o tempo perdido $L = 10$ s. Como SITRA faz muito pouco aproveitamento do tempo de amarelo, o tempo de amarelo (3 s) e de vermelho total (2 s) para ambas as fases foram computados como tempo perdido.

Os resultados apresentados neste capítulo aparecem na forma de tabelas. Gráficos correspondentes podem ser consultados no Apêndice E.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo das simulações realizadas.

4.3.1 Conjunto de Simulações 1

O objetivo deste conjunto de simulações é poder observar exclusivamente o fenômeno da progressão veicular na arterial. Para este fim não há conversões à direita ou à esquerda em nenhuma das interseções e portanto, não há interferência de filas residuais provocadas por veículos provenientes de pistas transversais.

As simulações duraram 60 minutos, incluindo os 20 minutos de aquecimento. Os fluxos totais de 1774 veh/h nas entradas da pista arterial e 313 veh/h nas entradas das pistas transversais foram mantidos constantes. Com fluxos idênticos em todas as aproximações, os tempos semaforicos são iguais para todas as interseções.

O plano a tempos fixos utilizado está especificado na Tabela 4.2. As estratégias TUC e TUC-ML tiveram seus controladores de ciclo desativados e o ciclo ótimo de Webster (60 s) idêntico ao plano a tempos fixos foi utilizado.

A Tabela 4.3 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações 1. As três estratégias tiveram desempenho similar, com Tempo Fixo apresentando melhor desempe-

Tabela 4.1: *Resumo das simulações realizadas.*

Conj. de Simul.	Fluxo	Conversões	Módulos de Controle	Objetivo
1	Fluxo constante de 1774 veh/h nas entradas da pista arterial e de 313 veh/h nas entradas das pistas transversais.	Não há conversões à direita ou à esquerda em nenhuma das interseções.	Porcentagens de verde e defasagem.	Observar o fenômeno da progressão veicular na arterial sem a interferência de filas residuais provocadas por veículos provenientes de pistas transversais.
2	Fluxo constante de 1774 veh/h nas entradas da pista arterial e os fluxos diferenciados nas entradas das pistas transversais (ver Tabela 4.5).	Igual ao Conjunto de Simulações 1.	Porcentagens de verde e defasagem.	Observar o fenômeno da progressão veicular na arterial, com fluxos diferentes em cada uma das transversais, intensificando o efeito dos tempos semafóricos na determinação da largura de banda máxima.
3	Igual ao Conjunto de Simulações 2.	As pistas transversais sofrem 15% de conversão à direita e na arterial ver Tabela 4.9.	Porcentagens de verde e defasagem.	Observar o fenômeno da progressão veicular na arterial, que passa a ser afetado por filas residuais devido às conversões de pistas transversais.
4	Fluxo variado em todas as entradas (ver Figura 4.5 e Tabela 4.13).	Igual ao Conjunto de Simulações 3.	Porcentagens de verde, ciclo e defasagem.	Observar o fenômeno da progressão veicular na arterial e o ajuste das variáveis de controle às variações de tráfego.
5	Fluxo variado em todas as entradas (ver Tabela 4.17).	Igual ao Conjunto de Simulações 3.	Porcentagens de verde, ciclo e defasagem.	Observar o desempenho do sistema de controle em tempo real comparado a planos a tempos fixos.

Tabela 4.2: *Plano a tempos fixos para o Conjunto 1.*

	Plano Fixo
Tempo de ciclo (s)	60
Tempo de verde da arterial (s)	37
Tempo de verde da secundária (s)	13
Conjunto de sincronização (ciclos)	[0,5 0,0 0,0 0,5 0,0]
Defasagem (s)	[41 11 11 41 11]

no. Como não há conversões nem variações de fluxo, o cenário simulado é extremamente favorável ao Tempo Fixo otimamente ajustado utilizado. Comparando apenas TUC e TUC-ML, TUC-ML teve melhor desempenho em todos os critérios, exceto pelo número de paradas que foi menor com TUC.

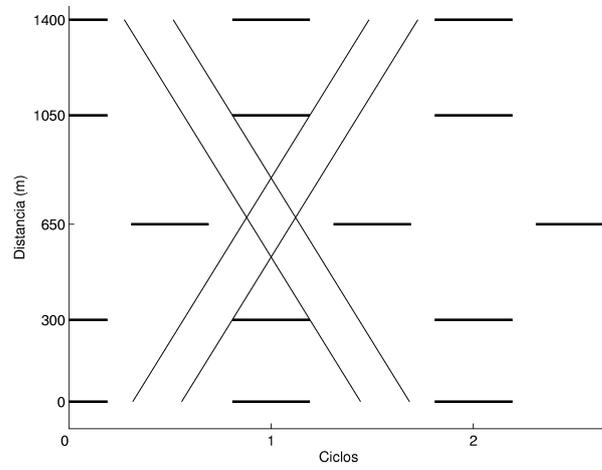
Tabela 4.3: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1.

Intervalo de Tempo (min.)	20-60		
Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
Velocidade média (km/h)	33,25	31,60	32,00
Tempo total de viagem (h)	151,31	159,27	157,10
Distância total percorrida (km)	5030,53	5032,53	5027,70
Número de paradas/veh	0,69	0,80	0,83
Tempo parado (s/veh)	8,04	9,27	8,66

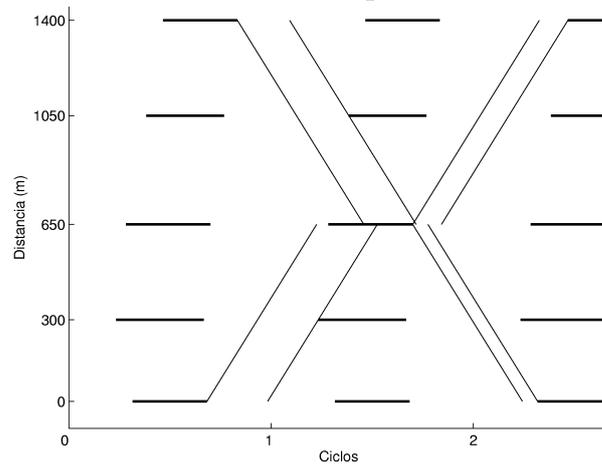
A Tabela 4.4 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 1. No sentido O-L, TUC-ML teve melhor desempenho que TUC em todos os critérios. Foi comparável ao Tempo Fixo em termos de velocidade média e tempo de viagem e teve melhor desempenho do que esta estratégia nos demais critérios. No sentido L-O, Tempo Fixo teve melhor desempenho em todos os critérios. TUC-ML desempenhou melhor que TUC apenas no critério tempo parado. Analisando ambos os sentidos simultaneamente, Tempo Fixo tem melhor desempenho em todos os critérios. TUC-ML teve melhor desempenho que TUC em todos os critérios, exceto pelo número de paradas. Reforça-se aqui que o cenário simulado é favorável à estratégia Tempo Fixo.

O desbalanceamento entre os resultados nos dois sentidos da pista arterial é esperado e pode ser observado nas demais simulações. Apesar da aparente simetria de um diagrama espaço-tempo com bandas máximas e iguais, a progressão em cada sentido sofre interferências diferentes devido à posição da banda em relação às extremidades dos tempos de vermelho, devido a filas residuais e às distâncias entre semáforos em cada sentido, que são diferentes. Por exemplo na Figura 4.4(c) o primeiro veículo da fila na Interseção 1 (Distância 0) tem parte de seu trajeto representado na figura pela linha tracejada. Este veículo que está indo da Interseção 1 para Interseção 5 (Distância 1400), ao receber verde, inevitavelmente (considerando que trafega na velocidade especificada) irá parar na Interseção 2 e a seguir na Interseção 5. O primeiro veículo da fila na Interseção 5, percorrendo o sentido contrário, irá parar na Interseção 4 e a seguir na Interseção 3.

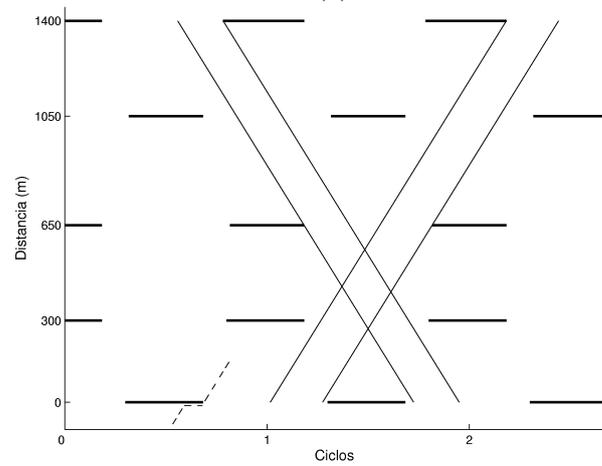
A Figura 4.4 mostra os diagramas espaço-tempo para as três estratégias. A banda Tempo Fixo é de 0,2417 ciclos ou 14,50 s. A estratégia TUC claramente não provoca banda e as “bandas” sugeridas na figura são apenas para referência. Finalmente TUC-ML apresenta a mesma largura de banda que o tempo fixo, mas com outro conjunto. Observar que no caso de TUC-ML as bandas nos dois sentidos



(a) Tempo Fixo



(b) TUC



(c) TUC-ML

Figura 4.4: Diagramas espaço-tempo do Conjunto de Simulações 1.

Tabela 4.4: Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 1 (p/veh).

Intervalo de Tempo (min.)		20-60		
Sentido	Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
O-L	Velocidade média (km/h)	34,82	33,24	34,71
	Tempo de viagem (s)	188,53	198,63	188,84
	Número de paradas	1,00	1,07	0,96
	Tempo parado (s)	7,31	8,19	6,18
L-O	Velocidade média (km/h)	36,53	34,40	33,46
	Tempo de viagem (s)	179,90	192,00	197,10
	Número de paradas	0,72	0,95	1,18
	Tempo parado (s)	5,92	7,57	7,38
Ambos os sentidos	Velocidade média (km/h)	35,68	33,81	34,08
	Tempo de viagem (s)	184,18	195,30	193,01
	Número de paradas	0,86	1,01	1,07
	Tempo parado (s)	6,61	7,88	6,79

não estão exatamente iguais, pois foram utilizados os valores de defasagem implementados (sofreram arredondamento para ficarem inteiros). Nos conjuntos de simulações seguintes a não formação de banda observada na Figura 4.4(b) se repete. Dependendo do caso, varia o número de interseções que uma banda consegue cruzar e em poucos casos se obtém uma banda que passa por todas as interseções, mas em apenas um sentido e com largura muito pequena.

4.3.2 Conjunto de Simulações 2

O objetivo deste conjunto de simulações é observar exclusivamente a progressão veicular na arterial, mas com fluxos diferentes em cada uma das transversais, de maneira a intensificar o efeito dos tempos semafóricos na determinação da largura de banda máxima e na progressão veicular.

As simulações foram realizadas nos mesmos moldes do Conjunto de Simulações 1, portanto, sem conversões à esquerda ou à direita, com alterações nos volumes das pistas transversais para obter temporizações diferentes nas interseções. O fluxo de 1774 veh/h nas entradas da pista arterial foi mantido e os fluxos nas pistas transversais ficaram conforme exposto na Tabela 4.5. O plano a tempos fixos utilizado está especificado na Tabela 4.6. As estratégias TUC e TUC-ML tiveram seus controladores de ciclo desativados e o ciclo ótimo de Webster (70 s) idêntico ao plano a tempos fixos foi utilizado.

Tabela 4.5: Fluxo nas pistas arteriais para o Conjunto de Simulações 2.

Interseção	1	2	3	4	5
Fluxo (veh/h)	313	400	280	313	370

Tabela 4.6: Plano a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 2.

Interseção	Plano Fixo				
	1	2	3	4	5
Tempo de ciclo (s)	70	70	70	70	70
Tempo de verde da arterial (s)	44	41	46	44	42
Tempo de verde da secundária (s)	16	19	14	16	18
Conjunto de sincronização (ciclos)	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5
Defasagem (s)	48	49	12	13	49

A Tabela 4.7 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações 2. A alteração dos fluxos nas pistas transversais aproximou os resultados das três estratégias, evidenciando que Tempo Fixo tende a piorar seu desempenho quando o cenário é menos favorável, mesmo que os planos tenham sido ajustados de maneira ótima. TUC-ML teve a maior velocidade média, seguido de Tempo Fixo. TUC teve o menor número de paradas seguido de Tempo Fixo, mas ao custo de paradas mais demoradas. TUC-ML teve tempo parado menor que TUC, mas maior que Tempo Fixo.

Tabela 4.7: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2.

Intervalo de Tempo (min.)	20-60		
Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
Velocidade média (km/h)	29,32	29,09	29,77
Tempo total de viagem (h)	172,82	174,13	170,25
Distância total percorrida (km)	5067,29	5065,35	5068,33
Número de paradas/veh	1,31	1,20	1,35
Tempo parado (s/veh)	10,36	11,80	11,19

A Tabela 4.8 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 2. TUC-ML teve a maior velocidade média e o menor tempo de viagem. Neste dois critérios, Tempo Fixo desempenhou melhor que TUC apenas no sentido L-O. No sentido O-L TUC teve menor número de paradas, seguido de TUC-ML, com Tempo Fixo tendo um número de paradas significativamente maior. No sentido L-O Tempo Fixo teve o menor número de paradas, seguido por TUC-ML. Con-

siderando ambos os sentidos, TUC-ML teve melhor desempenho seguido de TUC. TUC-ML teve o menor tempo parado. TUC teve menor tempo parado no sentido O-L e maior no sentido O-L e em ambos os sentidos.

Tabela 4.8: Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 2 (p/veh).

Intervalo de Tempo (min.)		20-60		
Sentido	Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
O-L	Velocidade média (km/h)	27,48	28,51	28,97
	Tempo de viagem (s)	241,68	235,83	229,39
	Número de paradas	4,18	3,12	3,20
	Tempo parado (s)	14,03	13,79	11,58
L-O	Velocidade média (km/h)	34,70	34,12	34,89
	Tempo de viagem (s)	189,59	195,35	188,83
	Número de paradas	0,94	1,30	0,96
	Tempo parado (s)	7,43	10,27	6,97
Ambos os sentidos	Velocidade média (km/h)	31,06	31,29	31,89
	Tempo de viagem (s)	215,86	215,80	209,38
	Número de paradas	2,58	2,22	2,10
	Tempo parado (s)	10,76	12,27	9,31

4.3.3 Conjunto de Simulações 3

Neste conjunto de simulações evolui-se o cenário, incorporando taxas de conversão. Desta maneira a progressão veicular passa a ser afetada por filas residuais devido às conversões de pistas transversais. Os fluxos chegando pela arterial em cada interseção também não serão mais iguais para todas as interseções.

As simulações foram realizadas nos mesmos moldes do Conjunto de Simulações 2, modificando-se apenas as taxas de conversão. Neste conjunto, as aproximações de pistas transversais de todas as interseções sofrem 15% de conversão à direita. Na arterial, para evitar um esvaziamento, as conversões à direita são como na Tabela 4.9. As taxas de conversão foram escolhidas de maneira a manter a arterial com um fluxo maior e com poucos veículos na arterial provenientes de conversões de pistas transversais. Novos planos a tempos fixos foram calculados para cada interseção com base nos novos fluxos de veículos que chegam em cada interseção. Os novos planos estão especificados na Tabela 4.10. As estratégias TUC e TUC-ML tiveram seus controladores de ciclo desativados e o

ciclo ótimo de Webster (69 s) idêntico ao plano a tempos fixos foi utilizado.

Tabela 4.9: *Taxas de conversão à direita da arterial para o Conjunto de Simulações 3.*

Interseção	1	2	3	4	5
Taxa de conversão (%)	5	2	2	3	5

Tabela 4.10: *Plano a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 3.*

	Plano Fixo				
	1	2	3	4	5
Tempo de ciclo (s)	69	69	69	69	69
Tempo de verde da arterial (s)	44	40	45	44	42
Tempo de verde da secundária (s)	15	19	14	15	19
Conjunto de sincronização (ciclos)	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5
Defasagem (s)	47	49	12	12	48

A Tabela 4.11 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações 3. A inclusão das taxas de conversão e os fluxos diferenciados na pistas transversais tornam o cenário mais desfavorável para a estratégia a Tempos Fixos, ainda que calculada otimamente. TUC-ML teve melhor desempenho que TUC, este por sua vez melhor desempenho que Tempo Fixo em todos os critérios, exceto pelo tempo parado. Tempo Fixo teve menor tempo parado, seguido de TUC-ML e TUC.

Tabela 4.11: *Resultados globais do Conjunto de Simulações 3.*

Intervalo de Tempo (min.)	20-60		
Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
Velocidade média (km/h)	31,00	31,50	31,87
Tempo total de viagem (h)	162,34	161,83	157,21
Distância total percorrida (km)	5032,77	5096,90	5010,18
Número de paradas/veh	0,99	0,98	0,93
Tempo parado (s/veh)	9,87	11,75	11,08

A Tabela 4.12 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 3. No sentido O-L TUC-MI teve melhor desempenho em todos os critérios seguido por TUC. No sentido L-O TUC teve melhor desempenho em todos os critérios seguido por Tempo Fixo, exceto pelo tempo parado. Neste sentido TUC teve tempo parado significativamente maior que TUC-ML e Tempo Fixo, este último com o menor valor. Em ambos os sentidos TUC-ML teve o melhor desempenho em todos

os critérios, seguido de TUC. TUC teve pior desempenho que Tempo Fixo apenas no tempo parado.

Tabela 4.12: Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 3.

Intervalo de Tempo (min.)		20-60		
Sentido	Estratégia	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
O-L	Velocidade média (km/h)	30,28	31,75	34,56
	Tempo de viagem (s)	217,23	207,94	190,71
	Número de paradas	1,94	1,55	1,14
	Tempo parado (s)	10,32	9,82	6,97
L-O	Velocidade média (km/h)	35,39	37,51	35,08
	Tempo de viagem (s)	185,97	175,40	188,23
	Número de paradas	1,10	1,10	1,11
	Tempo parado (s)	6,82	8,55	7,03
Ambos os sentidos	Velocidade média (km/h)	32,83	34,57	34,83
	Tempo de viagem (s)	201,64	191,97	189,46
	Número de paradas	1,52	1,33	1,13
	Tempo parado (s)	8,57	9,20	7,00

4.3.4 Conjunto de Simulações 4

Neste conjunto de simulações provoca-se uma variação no volume de veículos chegando na malha viária. A variação no volume é aplicada de forma crescente procurando representar um aumento de volume baixo para um volume alto, como ocorre por exemplo no pico da manhã. Desta maneira observa-se o ajuste das variáveis de controle, porcentagens de verde, ciclo e defasagem, às variações de tráfego, enquanto planos a tempos fixos, mesmo que otimamente ajustados não acompanharão as variações.

Inicia-se com um fluxo idêntico ao utilizado no Conjunto de Simulações 3. Este fluxo é mantido por 35 minutos, dos quais 20 minutos são para aquecimento. A seguir o fluxo é aumentado até um valor máximo a cada 5 minutos por 15 minutos. Mantém-se o valor máximo por 15 minutos. A Figura 4.5 apresenta o perfil da variação do fluxo na arterial. Perfil análogo é aplicado nas pistas transversais. Os fluxos utilizados são apresentados na Tabela 4.13. As taxas de conversão deste conjunto foram mantidas como no Conjunto de Simulações 3. Os planos a tempos fixos calculados para os dois valores de regime estão especificados na Tabela 4.14. A troca de planos ocorre no instante de tempo de 45 minutos que é o instante de tempo intermediário no período em que ocorre a variação do fluxo.

As estratégias TUC e TUC-ML tiveram seus controladores de ciclo ativados, e utilizaram um plano nominal com ciclo de 60 s.

Tabela 4.13: Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 4 (veh/h).

Intervalo de Tempo (min.)	0-35	35-40	40-45	45-50	50-65
Arterial O-L	1774	1843	1912	1981	2050
Arterial L-O	1774	1843	1912	1981	2050
Secundária 1 N-S	313	325	337	349	362
Secundária 1 S-N	313	325	337	349	362
Secundária 2 N-S	400	415	431	446	462
Secundária 2 S-N	400	415	431	446	462
Secundária 3 N-S	280	290	301	312	323
Secundária 3 S-N	280	290	301	312	323
Secundária 4 N-S	313	325	337	349	362
Secundária 4 S-N	313	325	337	349	362
Secundária 5 N-S	370	384	398	412	427
Secundária 5 S-N	370	384	398	412	427

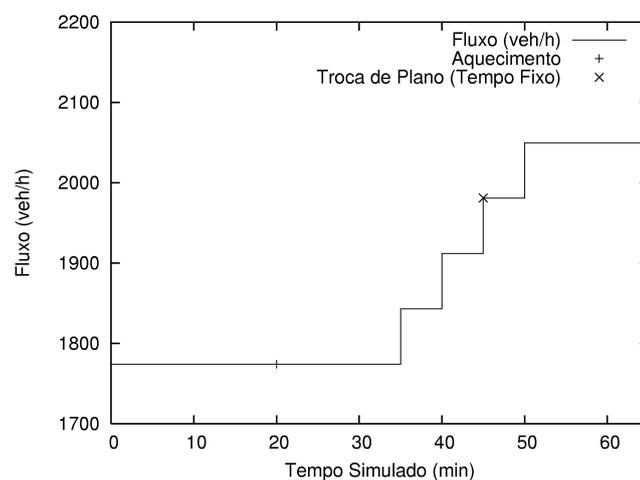


Figura 4.5: Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 4.

A Tabela 4.15 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações 4. No intervalo 20-35 TUC teve o melhor desempenho em todos os critérios, exceto pelo tempo parado que foi menor com Tempo Fixo. TUC-ML teve o pior desempenho em todos os critérios. No intervalo de tempo 35-50 TUC teve o melhor desempenho e TUC-ML o pior desempenho, em todos os critérios. No intervalo 50-65 TUC-ML teve melhor desempenho em todos os critérios. TUC teve melhor desempenho que Tempo Fixo em todos os critérios, exceto no tempo parado onde Tempo Fixo

Tabela 4.14: Planos a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 4.

Interseção	Plano Fixo 1					Plano Fixo 2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tempo de ciclo (s)	69	69	69	69	69	109	109	109	109	109
Tempo de verde da arterial (s)	44	40	45	44	42	73	68	75	73	70
Tempo de verde da secundária (s)	15	19	14	15	19	26	31	24	26	29
Conjunto de Sincronização (ciclos)	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
Defasagem (s)	47	49	12	12	48	72	75	71	18	19

desempenhou melhor. Com o aumento do fluxo espera-se uma queda no desempenho de sistemas de progressão. Ainda assim, TUC-ML teve o melhor desempenho.

A Tabela 4.16 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 4. No intervalo 20-35, TUC teve a maior velocidade média, seguida de Tempo Fixo, tanto nos sentidos O-L e L-O, como em ambos os sentidos. TUC teve o menor número de paradas seguido de Tempo Fixo, no sentido O-L e em ambos os sentidos, enquanto Tempo Fixo teve melhor desempenho neste critério no sentido L-O. TUC teve menor tempo parado, no sentido O-L e em ambos os sentidos, seguido de Tempo Fixo. No sentido L-O Tempo Fixo teve o menor tempo parado, seguido de TUC-ML.

No intervalo 35-50, sentido O-L e ambos os sentidos, TUC teve maior velocidade média, seguida de TUC-ML. TUC-ML teve maior velocidade média no sentido L-O, seguido de Tempo Fixo. TUC teve o menor número de paradas neste intervalo, seguido de TUC-ML nos sentidos L-O e em ambos os sentidos, e de Tempo Fixo no sentido O-L. TUC teve o menor tempo parado, seguido de TUC-ML. No intervalo 50-65, TUC-ML teve a maior velocidade média, seguido de TUC. TUC-ML também teve o menor número de paradas e o menor tempo parado no sentido L-O e em ambos os sentidos, enquanto TUC teve melhor desempenho nestes dois critérios no sentido O-L. Na arterial observa-se uma deterioração do sistema de progressão a tempo fixo com o aumento do volume, o que é esperado. Por outro lado, TUC-ML que também emprega um sistema de progressão passa a desempenhar melhor com o aumento do volume.

A Figura 4.6 mostra a evolução do Controle de Ciclo para as três estratégias utilizadas. O mau desempenho de TUC-ML no intervalo 20-35 pode ser atribuído ao elevado tempo de ciclo obtido pelo controlador de ciclo. Durante todo o período de mudança de fluxos (intervalo 35-50) o controle de ciclo de TUC-ML continuou elevado quando comparado com Tempo Fixo e TUC, tendo um desempenho pior que das outras estratégias. Como TUC operou com um ciclo próximo ao ótimo de Webster (Tempo Fixo) e adaptou-se no intervalo 35-50, percebe-se as vantagens do controle em tempo-real

TUC que obteve menor número de paradas e menor tempo parado. No intervalo 50-65, TUC-ML teve o melhor desempenho global e na arterial. Observa-se na segunda metade do tempo simulado valores baixos de ciclo para as estratégias de tempo-real, tomando-se como parâmetro o tempo de ciclo ótimo de Webster utilizado por Tempo Fixo. Poderia-se esperar que um ajuste nos ganhos do controlador de ciclo, para levar os tempos de ciclo mais rapidamente para valores próximos do tempo de ciclo de Webster, melhora o desempenho das estratégias de tempo-real. Em outras simulações realizadas, isto não foi observado entretanto.

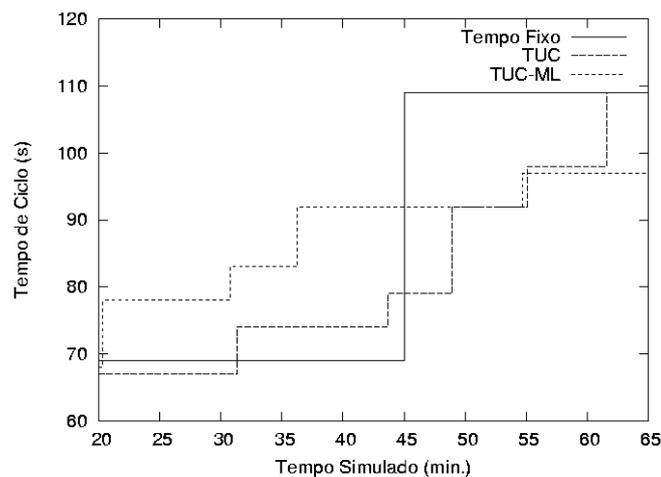


Figura 4.6: Tempo de Ciclo ao longo das simulações do Conjunto de Simulações 4.

4.3.5 Conjunto de Simulações 5

De maneira geral os planos a tempos fixos não estão bem ajustados às condições de tráfego vigentes. Neste conjunto, provoca-se uma variação no volume de veículos chegando na malha viária, de tal maneira que três planos diferentes sejam necessários. Aplica-se então um plano otimamente ajustado para um valor médio do fluxo, mas que não corresponde a nenhum dos três planos que seriam necessários. Assim, procura-se observar melhor as vantagens dos sistemas em tempo-real com relação aos sistemas a planos de tempos fixos.

Inicia-se com um fluxo idêntico ao utilizado no Conjunto de Simulações 3. Este fluxo é mantido por 35 minutos, dos quais 20 min são para aquecimento. A seguir o fluxo é modificado de forma variada em todas as pistas e mantido por 15 min, quando uma nova alteração é realizada e mantida por mais 15 minutos. Desta forma pretende-se observar também os efeitos das mudanças de porcentagens de verde. Os fluxos utilizados são apresentados na Tabela 4.17. As taxas de conversão deste conjunto de simulações foram mantidas como nos Conjuntos de Simulações 3 e 4. Este conjunto está dividido em duas aplicações da estratégia de Tempo Fixo. Na primeira aplicação serão utilizados três planos

a tempos fixos otimamente ajustados. Na segunda aplicação será utilizado um plano ajustado para valores médios do fluxo dos últimos 45 minutos de simulação. Os planos a tempos fixos calculados para os três valores de regime estão especificados na Tabela 4.18, que também apresenta um quarto plano calculado otimamente utilizando valores médios do fluxo dos três intervalos de tempo.

Tabela 4.17: Padrão de fluxo para o Conjunto de Simulações 5 (veh/h).

Intervalo de Tempo (min.)	0-35	35-50	50-65
Arterial O-L	1774	1857	1764
Arterial L-O	1774	1857	1754
Secundária 1 N-S	313	298	328
Secundária 1 S-N	313	298	348
Secundária 2 N-S	400	385	445
Secundária 2 S-N	400	385	420
Secundária 3 N-S	280	265	300
Secundária 3 S-N	280	265	315
Secundária 4 N-S	313	298	333
Secundária 4 S-N	313	298	348
Secundária 5 N-S	370	355	360
Secundária 5 S-N	370	355	405

Aplicação de Tempo Fixo com Planos Otimamente Ajustados, TUC e TUC-ML

Na aplicação de tempo fixo com planos otimamente ajustados, as trocas de plano aconteceram no mesmo instante em que ocorre a mudança dos fluxos nas entradas, nos instantes 35 minutos e 50 minutos. As estratégias TUC e TUC-ML tiveram seus controladores de ciclo ativados, e utilizaram um plano nominal com ciclo de 60 s.

A Tabela 4.19 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações 5. Tempo Fixo apresentado nesta tabela refere-se à aplicação dos três planos otimamente ajustados. No intervalo 20-35 TUC teve o melhor desempenho em todos os critérios, seguido de TUC-ML, exceto pelo tempo parado, que TUC teve o melhor desempenho, seguido de Tempo Fixo. No intervalo 35-50, TUC teve melhor desempenho em todos os critérios, seguido de Tempo Fixo. No intervalo 50-65, TUC teve a maior velocidade média, seguida de Tempo Fixo. O número de paradas foi menor para TUC, seguido de TUC-ML. Tempo Fixo teve o menor tempo parado, seguido de TUC.

A Tabela 4.20 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 5. Tempo

Tabela 4.18: Planos a tempos fixos para o Conjunto de Simulações 5.

Interseção	Plano Fixo 1					Plano Fixo 2					Plano Fixo 3					Plano Fixo 4				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tempo de ciclo (s)	69	69	69	69	69	71	71	71	71	71	75	75	75	75	75	71	71	71	71	71
Tempo de verde da arterial (s)	44	40	45	44	42	46	43	47	46	44	47	43	48	46	44	45	42	46	45	43
Tempo de verde da secundária (s)	15	19	14	15	19	15	18	14	15	17	18	22	17	19	21	16	19	15	16	18
Conjunto de sincronização (ciclos)	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0
Defasagem (s)	47	49	12	12	48	48	49	12	12	49	13	15	48	49	15	8	9	37	38	9

Tabela 4.19: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com três planos otimamente ajustados.

Intervalo de Tempo (min.)	20-35					35-50					50-65				
	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML	Tempo Fixo	TUC	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML	Tempo Fixo	TUC	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML	Tempo Fixo	TUC
Velocidade média (km/h)	31,15	33,82	31,44	30,48	31,99	30,48	31,99	29,45	30,64	32,01	30,64	32,01	29,95	30,64	32,01
Tempo total de viagem (h)	60,23	55,13	59,38	62,12	58,54	62,12	58,54	65,18	60,78	59,83	60,78	59,83	63,00	60,78	59,83
Distância total percorrida (km)	1876,16	1864,60	1866,73	1893,21	1872,46	1893,21	1872,46	1919,44	1862,53	1915,01	1862,53	1915,01	1886,84	1862,53	1915,01
Número de paradas/veh	1,11	0,84	0,96	1,22	1,01	1,22	1,01	1,32	0,96	0,88	0,96	0,88	0,92	0,96	0,88
Tempo parado (s/veh)	10,73	9,99	13,23	12,25	10,99	12,25	10,99	13,84	9,90	11,83	9,90	11,83	12,84	9,90	11,83

Fixo apresentado nesta tabela refere-se à aplicação dos três planos otimamente ajustados. No intervalo 20-35, TUC teve maior velocidade média. TUC-ML superou Tempo Fixo, neste critério, no sentido O-L e em ambos os sentidos. No sentido O-L TUC-ML teve o menor número de paradas, seguido de TUC, com Tempo Fixo tendo número de paradas pelo menos duas vezes maior. Por outro lado, no sentido L-O, Tempo Fixo obteve o menor número de paradas, seguidos de TUC. Em ambos os sentidos, TUC teve o menor número de paradas, seguido de TUC-ML, como número de paradas de Tempo Fixo aproximadamente 50% maior. TUC-ML teve menor tempo parado no sentido O-L e em ambos os sentidos, seguido de TUC. Tempo Fixo, seguido de TUC, teve menor tempo parado no sentido L-O.

No intervalo 35-50, TUC teve a maior velocidade média, seguida de Tempo Fixo. O número de paradas de TUC, neste intervalo foi menor, seguido de TUC-ML sentido O-L e em ambos os sentidos e de Tempo Fixo no sentido L-O. TUC-ML teve o menor tempo parado no sentido L-O e em ambos os sentidos, seguido de TUC. No sentido O-L TUC teve menor tempo parado, seguido de TUC-ML. No intervalo 50-65, TUC teve maior velocidade média no sentido O-L, seguido de Tempo Fixo. No sentido L-O, TUC-ML teve maior velocidade média seguido de TUC. Em ambos os sentidos, TUC teve maior velocidade média seguido de TUC-ML. Tempo Fixo teve o maior número de paradas e o maior tempo parado. Neste dois critérios, TUC-ML desempenhou melhor que TUC no sentido L-O e em ambos os sentidos, com TUC desempenhando melhor no sentido O-L.

Aplicação de Tempo Fixo com Plano Otimamente Ajustado para Valores Médios do Fluxo

O plano ajustado para valores médios é aplicado ao longo de toda a simulação e pretende representar um plano que não está perfeitamente ajustado às condições de tráfego vigentes. Entretanto, considerando-se as restrições estabelecidas, este ainda é um plano otimamente calculado. Comparando o Plano Fixo 4 com os demais planos fixos (ver Tabela 4.18) nota-se que no primeiro intervalo de simulação, a rede irá operar abaixo da capacidade. No segundo intervalo a rede irá operar aproximadamente na capacidade, pois o tempo de ciclo do Plano Fixo 4 é igual ao tempo de ciclo do Plano Fixo 2. No terceiro intervalo, irá operar acima da capacidade. O conjunto de sincronização do Plano Fixo 4 é igual apenas ao do Plano Fixo 3. Mesmo com a diferença nos conjuntos de sincronização, e também devido aos diferentes tempo de ciclo, as bandas não variam muito a sua largura para os quatro planos, 19,5 s, 21,5 s, 18,5 s e 20,5 segundos respectivamente. Os tempos de verde diferem pouco, pois como resultado da utilização de fluxos médios, ficaram em valores intermediários aos dos demais planos.

A Tabela 4.21 mostra os resultados globais do desempenho da rede para o Conjunto de Simulações

Tabela 4.20: Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com três planos otimamente ajustados.

Sentido	Estratégia	Intervalo de Tempo (min.)			35-50			50-65		
		Tempo Fixo	TUC	TUC-ML	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML	Tempo Fixo	TUC	TUC-ML
O-L	Velocidade média (km/h)	29,91	35,28	34,52	29,46	32,59	29,56	32,58	35,10	32,38
	Tempo de viagem (s)	220,11	185,00	189,74	223,46	202,93	222,69	201,32	186,99	202,53
	Número de paradas	2,27	1,06	0,94	2,24	1,51	2,02	1,25	1,00	1,21
	Tempo parado (s)	10,72	7,82	6,49	11,38	8,79	9,23	9,39	8,27	8,52
L-O	Velocidade média (km/h)	37,26	37,72	35,54	36,57	37,67	36,16	32,81	35,55	36,09
	Tempo de viagem (s)	175,69	174,36	187,96	181,53	178,95	186,57	201,14	185,52	183,70
	Número de paradas	0,70	0,89	1,21	1,18	1,14	1,27	1,71	1,19	0,93
	Tempo parado (s)	5,22	6,52	6,89	7,61	7,53	6,03	9,49	8,81	7,66
Ambos os sentidos	Velocidade média (km/h)	33,49	36,48	35,02	32,96	35,16	32,65	32,70	35,32	34,27
	Tempo de viagem (s)	198,42	179,75	188,86	202,83	190,82	205,78	201,23	186,28	192,96
	Número de paradas	1,50	0,98	1,07	1,72	1,32	1,67	1,48	1,09	1,07
	Tempo parado (s)	8,03	7,18	6,69	9,53	8,15	7,73	9,44	8,53	8,09

5 para Tempo Fixo otimamente ajustado para valores médios de fluxo. Nos intervalos 20-35 e 35-50, TUC teve maior velocidade média que Tempo Fixo Médio, que por sua vez superou TUC-ML. O número de paradas de Tempo Fixo Médio foi menor que TUC-ML, mas maior que TUC. Tempo Fixo Médio obteve o menor tempo parado. No intervalo 50-65, TUC e TUC-ML tiveram maior velocidade média e menor número de paradas que Tempo Fixo Médio, mas obtiveram maior tempo parado.

Tabela 4.21: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com um plano otimamente ajustado.

Intervalo de Tempo (min.)	20-35	35-50	50-65
Estratégia	Tempo Fixo		
Velocidade média (km/h)	32,54	30,76	29,00
Tempo total de viagem (h)	56,90	60,79	67,55
Distância total percorrida (km)	1851,70	1869,81	1959,19
Número de paradas/veh	0,85	1,07	1,19
Tempo parado (s/veh)	9,13	9,88	10,96

A Tabela 4.22 mostra os resultados na pista arterial para o Conjunto de Simulações 5 para Tempo Fixo otimamente ajustado para valores médios de fluxo. No intervalo 20-35, Tempo Fixo Médio teve velocidade média maior que Tempo Fixo no sentido O-L e em ambos os sentidos, mas menor velocidade no sentido L-O. Em nenhum destes casos, superou TUC ou TUC-ML. O número de paradas de Tempo Fixo Médio foi menor que Tempo Fixo no sentido O-L e ambos os sentidos, mas maior no sentido L-O. Parou mais que TUC e TUC-ML no sentido O-L e ambos os sentidos, mas parou menos que TUC-ML e mais do que TUC, no sentido L-O. O tempo parado de Tempo Fixo Médio, neste intervalo, foi maior apenas que TUC-ML no sentido O-L, maior que todas as estratégias no sentido L-O, e menor apenas que Tempo Fixo em ambos os sentidos.

No intervalo 35-50, Tempo Fixo Médio obteve a menor velocidade média. O número de paradas de Tempo Fixo Médio foi menor que Tempo Fixo e TUC-ML, mas maior que TUC no sentido O-L. No sentido L-O, Tempo Fixo médio teve pior desempenho, com TUC obtendo menor número de paradas, seguido de Tempo Fixo. Em ambos os sentidos, TUC teve o menor número de paradas, seguido de Tempo Fixo Médio e TUC-ML. O tempo parado foi maior do que TUC e TUC-ML, para Tempo Fixo Médio no sentido O-L e ambos os sentidos. No sentido L-O Tempo Fixo Médio, parou menos que TUC, mas parou mais que TUC-ML. No intervalo 35-50, Tempo Fixo Médio teve pior desempenho em todos os critérios.

O desempenho quando da utilização de apenas um plano, ajustado para valores médios de fluxo, mostrou que planos a tempos fixos são robustos às variações do tráfego quando operam em

Tabela 4.22: Resultados da arterial para o Conjunto de Simulações 5, Tempo Fixo com um plano otimamente ajustado.

		Intervalo de Tempo (min.)	20-35	35-50	50-65
Sentido	Estratégia	Tempo Fixo			
O-L	Velocidade média (km/h)	34,22	29,02	29,86	
	Tempo de viagem (s)	191,60	226,54	221,91	
	Número de paradas	1,09	1,57	1,85	
	Tempo parado (s)	7,46	10,33	10,00	
L-O	Velocidade média (km/h)	34,67	34,76	30,97	
	Tempo de viagem (s)	189,92	191,82	215,45	
	Número de paradas	1,13	1,44	1,99	
	Tempo parado (s)	7,52	7,36	10,87	
Ambos os sentidos	Velocidade média (km/h)	34,44	31,83	30,43	
	Tempo de viagem (s)	190,76	209,52	218,59	
	Número de paradas	1,11	1,51	1,92	
	Tempo parado (s)	7,49	8,87	10,45	

torno da capacidade. No intervalo 50-65 Tempo Fixo com um plano apresentou uma deterioração no desempenho. Ainda assim, as estratégias em tempo-real obtiveram um bom desempenho e espera-se desempenho ainda melhor no caso de planos ajustados em desacordo com as condições vigentes e quando variações nas proporções do tempo de verde e diferenças no tempo de ciclo sejam maiores.

A Figura 4.7 mostra a evolução do Controle de Ciclo para as três estratégias utilizadas inicialmente. A estratégia Tempo Fixo para fluxos médios operou com um ciclo de 71 s durante toda a simulação. Apesar de três mudanças de ciclo ocorrerem com Tempo Fixo, o controlador de ciclo de TUC modificou o tempo de ciclo apenas uma vez, antes mesmo da primeira mudança nos padrões de fluxo, após trinta minutos de simulação. O controle de ciclo de TUC-ML teve um comportamento que certamente prejudicou o desempenho desta estratégia. Houve um aumento do tempo de ciclo próximo ao tempo 20 min, seguido de uma redução minutos depois. TUC-ML operou acima do ciclo ótimo por toda a simulação, com uma redução acentuada ao final da simulação. Apesar de TUC ter operado com valores de tempo de ciclo abaixo do ciclo ótimo de Webster, teve melhor desempenho. TUC-ML operou a maior parte da simulação com um tempo de ciclo bastante grande prejudicando seu desempenho. No intervalo 50-65 TUC teve melhor desempenho, mesmo operando com uma valor de ciclo mais baixo. Com relação aos resultados na arterial TUC-ML teve menor número de paradas e menor tempo parado que TUC e um ciclo maior lhe permitiu dar boa progressão.

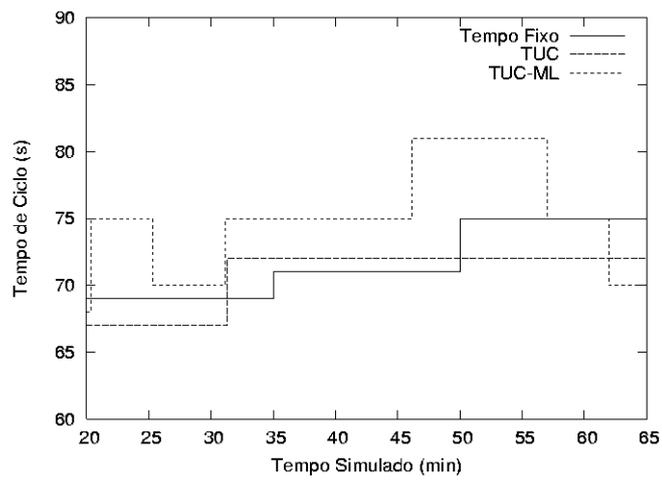


Figura 4.7: Tempo de Ciclo ao longo das simulações do Conjunto de Simulações 5.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

In any case we take the position here that, if engineers are going to use bandwidth systems, they should have the best.

J. D. C. Little, M. D. Kelson and N. H. Gartner [31]

Uma breve revisão de controle de tráfego coordenado foi realizada. O método ML [35] para sincronização de semáforos para obtenção de banda de largura máxima e a estratégia de controle em tempo real TUC [11] foram apresentados. A combinação de ambos resultou em uma estratégia de controle em tempo-real que calcula defasagens para obtenção de larguras máximas de banda.

Os resultados de simulação utilizando o simulador SITRA em uma arterial com cinco interseções mostraram que o método ML pode ser aplicado em tempo-real ao invés do módulo de controle de defasagem TUC, sem perdas no desempenho da malha viária, provendo melhor progressão na arterial.

Nas simulações realizadas, observou-se que no cenário sem variações (Conjunto de Simulações 1), favorável ao Tempo Fixo otimamente ajustado, TUC e TUC-ML tiveram um desempenho comparável a esta estratégia. Isto mostra que, de fato, as ferramentas metodológicas utilizadas na elaboração da estratégia TUC levaram a uma estratégia de controle eficiente. Em cenários com taxas de conversões diferentes em cada interseção e com fluxos veiculares diferentes em cada via transversal (Conjuntos de Simulações 2 e 3), mesmo com uso de planos a tempos fixos ótimos, TUC e TUC-ML desempenharam melhor que Tempo Fixo, e TUC-ML proveu melhor progressão que TUC. Nos cenários com variação do fluxo durante a simulação (Conjuntos de Simulações 4 e 5), TUC desempenhou, de maneira geral, melhor que TUC-ML. No Conjunto de Simulações 4, TUC-ML desempenhou melhor no intervalo de simulação 50-65, com o fluxo mais alto.

O desempenho de TUC e TUC-ML com relação ao Tempo Fixo nos Conjuntos de Simulações 4 e 5 não foi tão bom quanto esperado. TUC-ML também não teve ganhos significativos na progressão quando comparada com TUC nestes conjuntos de simulação. Os ajustes do controlador de ciclo não resultaram num controle de ciclo apropriado, via de regra apresentando ciclos em desacordo com o esperado pela fórmula de Webster. Um melhor estudo do ajuste do controlador de ciclo deve ser realizado. Em particular, o Conjunto de Simulações 5 não se mostrou apropriado para avaliação das estratégias, pois as variações de fluxo foram pouco significativas. As variações realizadas em duas transversais que chegam numa interseção foram diferentes e a piora no desempenho de uma foi compensada pela melhora no desempenho da outra, não afetando significativamente o desempenho do plano Tempo Fixo ajustado para fluxos médios. Os demais conjuntos de simulações mostraram que TUC-ML favorece a progressão veicular na arterial.

Dos resultados, observa-se também que o desempenho de Tempo Fixo é melhor no primeiro intervalo de tempo do que nos subsequentes. No primeiro intervalo, Tempo Fixo atua em estado de regime enquanto que nos demais é afetado pelas transições.

De maneira geral TUC tende a ter um número menor de paradas que Tempo Fixo mas ao preço de paradas mais longas.

Os resultados das simulações indicam que, em pistas arteriais em que se deseja progressão, TUC-ML pode ser utilizada em substituição a TUC sem perda de desempenho na malha viária. Isto seria desejável pois os motoristas e operadores desejam progressão. O objetivo do trabalho foi atingido, uma vez que obteve-se uma estratégia de controle de tráfego em tempo-real que realiza a coordenação semafórica por meio da maximização de largura de banda.

Por outro lado, ao implementar o método ML com TUC, perde-se algumas vantagens do controle realimentado do módulo de controle de defasagem original, como a baixa sensibilidade a erros nos parâmetros de configuração do controle (como distâncias entre interseções e velocidade média).

Além disso, a interface para simulação com o simulador SITRA pode ser utilizada para simulações da estratégia TUC com outras malhas viárias e da estratégia TUC-ML com outras vias arteriais. O desenvolvimento orientado a objetos facilita a continuidade do desenvolvimento desta interface para aplicação da estratégia TUC-ML em vias arteriais com interseções com mais de duas fases, e o teste de outras abordagens de cálculo da maximização de banda. O código da interface poderá também ser reutilizado no desenvolvimento da Central de Controle de Tráfego em Tempo-Real que está sendo implementada. A aplicação de TUC-ML em substituição a TUC em campo exigirá pouco esforço adicional, valendo o benefício de mais conforto para motoristas em vias arteriais.

Este trabalho foi também o primeiro no Departamento de Automação e Sistemas - UFSC a utilizar a estratégia TUC. Então todo o trabalho foi um processo de aprendizado de como utilizá-la. Além da interface da estratégia TUC com o simulador Sitra, e da elaboração da estratégia TUC-ML, este trabalho também serviu para ganhar experiência na utilização da estratégia TUC, fundamental para os desenvolvimentos que se seguem para aplicação em campo.

Os trabalhos futuros dividem-se em duas classes: os trabalhos teóricos/experimentais e os trabalhos de implementação em campo em uma via arterial real.

No contexto teórico/experimental, é necessária a avaliação de outros cenários e em outras vias arteriais com mais interseções, conversões à esquerda, etc. Este trabalho utilizou apenas as larguras de banda máximas e iguais. Experimentos com bandas desiguais, estimando-se em tempo real a proporção de banda para cada sentido da arterial, devem ser realizados. De maneira semelhante, pode ser implementado um modo para TUC-ML similar ao modo *auto-offset* de TUC. Os parâmetros de velocidade e largura de pelotões poderiam ser medidos ou estimados em tempo real para este fim. Outras técnicas, como MAXBAND e MULTIBAND, podem ser utilizadas, e pesquisa no sentido de simplificar a solução dos problemas modelados para estas técnicas está em andamento.

No contexto prático, este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Contreal, em andamento no Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina. Este projeto está desenvolvendo um controlador de tráfego em tempo-real (o sistema eletrônico) e uma central de controle de tráfego em tempo-real que fazem uso da estratégia TUC. Ao final do projeto, o sistema será implantado em campo, onde serão realizados experimentos em situações reais, inclusive com a estratégia TUC-ML. Para este fim, a implementação dos planos de transição nas mudanças de defasagem é necessária.

Apêndice A

Terminologia

Por se tratar de um trabalho de controle aplicado ao tráfego urbano, diversos conceitos e termos da engenharia de tráfego foram utilizados no decorrer deste trabalho. Este apêndice contém definições para os principais termos e conceitos. Estes apresentados em ordem alfabética e em alguns momentos fazem referência a outros conceitos e termos também presentes neste apêndice.

A.1 Aproximação

Uma via que chega em uma interseção. A Figura A.1 mostra duas interseções e seis vias de mão única e seus sentidos. As vias (a) e (d) são aproximações da interseção (1) e as vias (b) e (e) são aproximações da interseção (2). As vias (c), (f) e (g) podem eventualmente ser aproximações de interseções que não aparecem na figura.

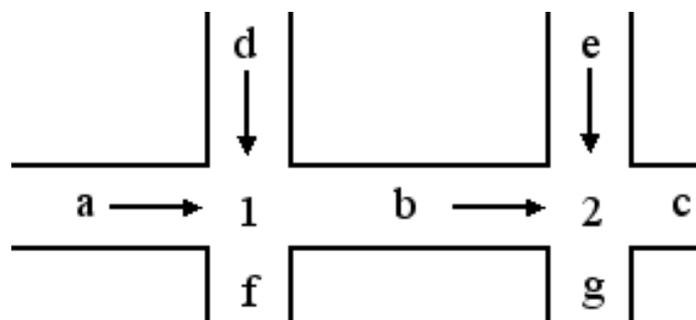


Figura A.1: Exemplo de aproximação em interseção.

A.2 Banda de verde

Ver “Largura da banda de verde”.

A.3 Capacidade (da interseção)

Número máximo de veículos que consegue cruzar a interseção durante um intervalo de tempo [8]. É dada por:

$$\text{capacidade} = s \frac{g_{ef}}{C} \quad (\text{A.1})$$

onde s é o fluxo de saturação, g_{ef} é o verde efetivo e C é o tempo de ciclo.

A.4 Concentração (k)

Número de veículos ocupando uma unidade de comprimento de uma pista num instante de tempo. Quando expressa em veíc/km é chamada de Densidade [24].

A.5 Coordenação

Gartner *et al.* [20, 21] considera coordenação a obtenção de defasagem para os semáforos dados porcentagens de verde de cada interseção e tempo de ciclo comum. E sincronização a obtenção simultânea de todas as variáveis de controle, defasagem, porcentagens de verde e tempo de ciclo comum. Neste trabalho os termos coordenação e sincronização são utilizados indistintamente.

A.6 Defasagem

Diferença de tempo entre o início de estágios pré-determinados de duas interseções semaforizadas consecutivas. É positiva se o estágio principal da interseção a jusante inicia após o estágio principal da interseção a montante, e negativa caso contrário. A Figura A.2 mostra a defasagem para três interseções. A defasagem da interseção 1 para a 2 é de 4 s, a defasagem da interseção 2 para a 3 é de 6 s e da interseção 1 para a interseção 3 é de 10 s.

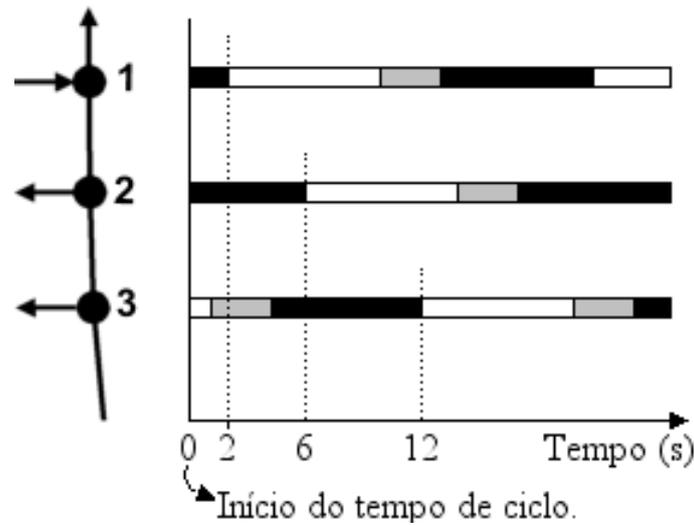


Figura A.2: Exemplo de defasagem de três interseções.

A.7 Densidade

Ver “Concentração”.

A.8 Estágio

Conjunto de indicações semafóricas (fases) de todas as aproximações de uma interseção em determinado instante de tempo. A Figura A.3 mostra uma interseção e seus quatro estágios. Um diagrama de tempo mostra que o Estágio 1, por exemplo, tem a Fase 1 em verde e a Fase 2 em vermelho. Do ponto de vista teórico, quando a Fase 1 está em amarelo e a Fase 2 está em verde configura-se o Estágio 2. Entretanto, na prática estágios de transição não são considerados, e são relevantes os Estágios 1 e 3. Os dois quadros na figura mostram os movimentos permitidos em cada estágio.

A.9 Fase

Indicação semafórica, seqüência de verde, amarelo e vermelho para uma aproximação. A Figura A.3 mostra duas fases para uma interseção com três aproximações. Por exemplo, a Fase 1 compreende tanto os movimentos oriundos da aproximação Oeste como da aproximação Leste e portanto é igual para as duas aproximações. Como ambas recebem a mesma indicação semafórica formam um grupo focal.

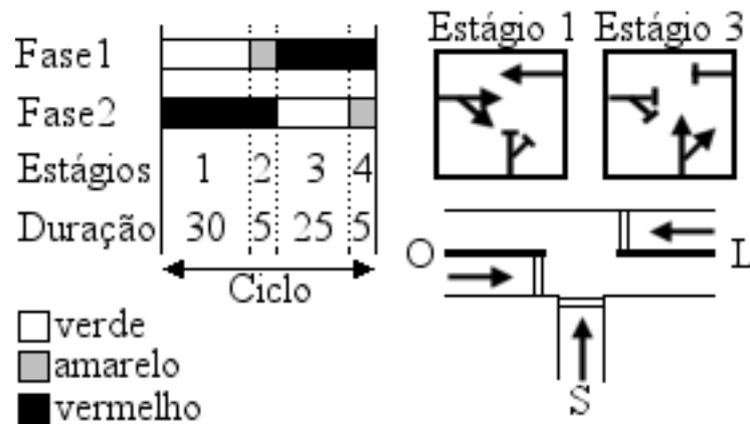


Figura A.3: Exemplo de ciclo, estágios e fases.

A.10 Fluxo (q)

Número de veículos (taxa) que passam um ponto durante um período de tempo especificado [24]. Normalmente é resultado de uma medida realizada em pouco tempo e transformada para uma unidade de tempo maior. Ver também “Volume”.

A.11 Fluxo de Saturação (s)

Taxa máxima de veículos em relação ao tempo, que seriam descarregados de uma via se esta contasse com uma fila de tamanho infinito e indicação semafórica verde durante todo o tempo. A Figura A.4 mostra num diagrama o fluxo de saturação.

A.12 Grau de Saturação (x)

É a relação entre o fluxo q e a capacidade de uma aproximação [8]:

$$x = \frac{q}{\text{capacidade}} = \frac{q}{s \frac{g_{ef}}{C}} = y \frac{C}{g_{ef}} \quad (\text{A.2})$$

onde q é o fluxo, s é o fluxo de saturação, g_{ef} é o verde efetivo, C é o tempo de ciclo e $y = q/s$ é a ocupação.

A.13 *Headway*

O *headway* [24] pode ser espacial ou temporal. *Headway* espacial é a distância entre dois veículos consecutivos se movimentando em uma mesma pista. *Headway* temporal é o intervalo de tempo entre a passagem de dois veículos consecutivos em uma mesma pista. Em ambos os casos a medida é feita tendo como referência pontos correspondentes nos dois veículos (por exemplo, pára-choques dianteiros). O *Headway* espacial também é chamado de “espaçamento”

A.14 **Largura de banda de verde**

É a distância temporal entre a linha imaginária do percurso de primeiro de último veículo que passam desimpedidos por todos os semáforos de uma via arterial. A banda de verde pode ocorrer em ambos os sentidos da via, e as larguras não são necessariamente iguais. A largura da banda de verde é definida com base em parâmetros da via e por meio da coordenação apropriada dos semáforos. As Figuras 2.1 e 2.3 mostram, respectivamente bandas de larguras iguais e bandas de larguras desiguais em uma via arterial com dez interseções e dois sentidos.

A.15 **Ocupação (y)**

A taxa de ocupação y de uma aproximação é a razão entre o fluxo de veículos (q) em uma via e o fluxo de saturação (s), isto é, $y = q/s$.

A.16 **Porcentagens de verde (frações de verde)**

Divisão do tempo total de verde de uma interseção entre seus estágios. Na Figura A.3 o tempo de verde total é de 55 s, sendo dividido em 30 s para a Fase 1 e 25 s para a Fase 2.

A.17 **Sincronização**

Ver “Coordenação”.

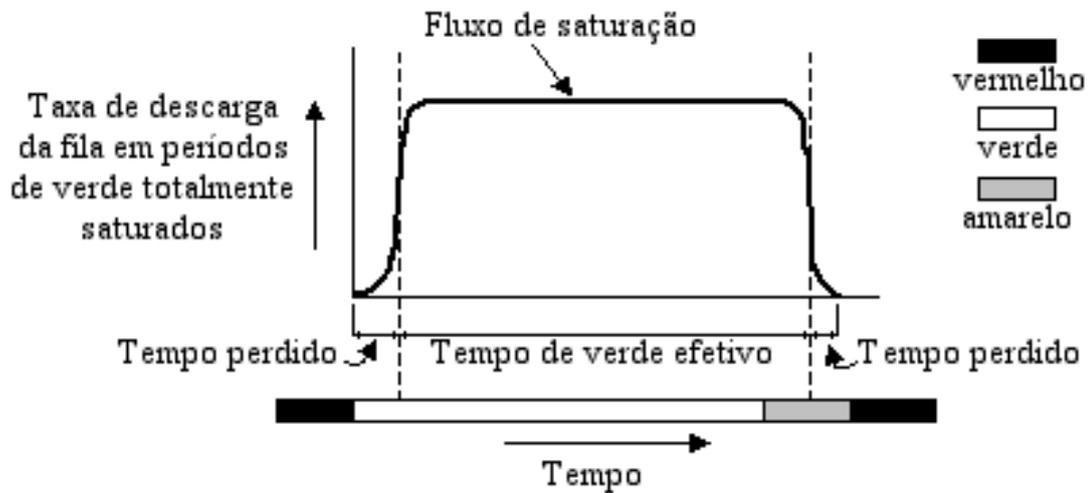


Figura A.4: Variação da descarga de veículos com verde totalmente saturado.

A.18 Tempo de Ciclo (C)

Também chamado de Ciclo, apenas. Corresponde ao tempo do início do estágio principal de uma interseção até o instante em que ele se inicia novamente, tendo ocorrido outros estágios neste período de tempo. Também é o tempo total para a completa seqüência de sinalização numa interseção [8]. A Figura A.3 mostra o diagrama de tempos de uma interseção. A interseção conta com quatro estágios (teóricos) e duas fases. No próximo ciclo, considerando uma temporização a tempos fixos, o diagrama se repete.

A.19 Tempo perdido (L)

O tempo perdido é obtido pela diferença de duas componentes: i) o tempo total de verde mais o tempo total de amarelo; e ii) tempo de verde não aproveitado devido ao atraso na partida dos veículos mais o tempo de amarelo que não é aproveitado devido à parada de veículos em virtude do sinal vermelho que está por vir. A Figura A.4 mostra num diagrama o tempo perdido.

A.20 Verde efetivo (g_{ef})

Tempo do ciclo em que os veículos transpõem a linha de parada. É obtido subtraindo-se o tempo perdido do tempo total de verde mais o tempo total de amarelo. A Figura A.4 mostra o verde efetivo.

A.21 Via (*Link*)

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

A.22 Volume

Volume é a taxa de veículos que passam em um ponto por um período longo de tempo (em uma hora, um dia). É resultado de medidas durante todo o período. Ver também “Fluxo”.

Apêndice B

Algoritmo do Método de Morgan e Little

O método de Morgan e Little [35] permite obter coordenação semaforica através da maximização de larguras de banda iguais. Velocidades de percurso diferentes em cada sentido e entre segmentos da arterial podem ser definidas. A largura das bandas máximas pode ser ajustadas de acordo com a largura de pelotões.

Para coordenar semáforos de maneira a obter bandas com largura máxima, é necessário primeiramente numerar os semáforos (interseções) em ordem de distância ao longo da arterial, $i = 1, 2, \dots, n$. O índice i cresce no sentido $i - j$. Os seguintes dados são necessários:

- o tempo de ciclo C comum a todas as interseções da arterial em segundos;
- os tempos de vermelho r_1, \dots, r_n em frações do ciclo;
- a posição dos semáforos (interseções) x_1, \dots, x_n ao longo da arterial em metros;
- as velocidades de percurso v_1, \dots, v_{n-1} entre os semáforos no sentido $i - j$ em metros por segundo;
- as velocidades de percurso $\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_{n-1}$ entre os semáforos no sentido $j - i$ em metros por segundo;
- largura de pelotões P no sentido $i - j$ em frações do ciclo;
- largura de pelotões \bar{P} no sentido $j - i$ em frações do ciclo;

O resultado final do método fornece:

- a largura das bandas máximas e iguais B em frações do ciclo; e
- o conjunto θ da coordenação entre os semáforos em frações do ciclo.

ou para o caso em que $P \neq \bar{P}$:

- a largura da banda máxima b no sentido $i - j$ em frações do ciclo;
- a largura da banda máxima \bar{b} no sentido $j - i$ em frações do ciclo; e
- o conjunto θ' da coordenação ajustada entre os semáforos em frações do ciclo.

Os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Calcular y_1, \dots, y_n :

$$y_1 = 0$$

$$y_i = y_{i-1} - \frac{1}{2}(r_i - r_{i-1}) + (x_i - x_{i-1}) \frac{1}{2C} \left[\frac{1}{v_{i-1}} + \frac{1}{\bar{v}_{i-1}} \right]$$

2. Calcular z_1, \dots, z_n :

$$z_1 = 0$$

$$z_i = z_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) \frac{1}{2C} \left[\frac{1}{v_{i-1}} - \frac{1}{\bar{v}_{i-1}} \right]$$

3. Calcular:

$$B = \max_i \min_j \max_{\delta \in \{0, \frac{1}{2}\}} [u_{ij}(\delta) - r_j]$$

onde

$$u_{ij}(\delta) = 1 - \text{man}(y_j - y_i - \delta)$$

e

$$\text{man}(x) = 1 - \lfloor x \rfloor$$

À medida que a maximização sobre δ é realizada, o valor que maximiza (um para cada j) pode ser armazenado em uma tabela temporária, $\delta_{i1}, \dots, \delta_{in}$. À medida que a maximização sobre i é realizada, o i que maximiza, por exemplo $i = c$, identifica o melhor conjunto, $\delta_{c1}, \dots, \delta_{cn}$, que deve ser guardado. Para os cálculos seguintes é também necessário armazenar os valores do conjunto u_{c1}, \dots, u_{cn} que corresponde ao conjunto, $\delta_{c1}, \dots, \delta_{cn}$. Isto significa que o valor de u_{ij} deve ser armazenado toda vez que um valor de δ_{ij} é armazenado.

4. Uma coordenação (conjunto de sincronização), $\theta_{c1}, \dots, \theta_{cn}$, para bandas máximas e iguais é calculada a partir de:

$$\theta_{cj} = \text{man}[z_j - z_c + \theta_{cj}]$$

A largura da banda máxima e igual em cada direção é $\max(0, B)$. Para ajustar a coordenação de acordo com o tamanho de pelotões o cálculo continua como a seguir:

5. Calcular $g = \min(1 - r_i)$.
6. Se $P = \bar{P}$ aceitar solução de bandas máximas e iguais.
7. Se $\bar{P} > P$, pular para o Passo 11, caso contrário continuar.
8. Se $P + \bar{P} \leq 2B$, fazer $b = \min[g, 2BP/(P + \bar{P})]$. Caso contrário, fazer $b = \min(P, g)$, a não ser que $P \geq 2B$, caso no qual deve-se fazer $b = g$.
9. Calcular $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ a partir de $\alpha_j = \max(u_{cj} - 1 + b - B, 0)$.
10. Calcular $\bar{b} = \max(2B - b, 0)$. Pular para o Passo 14.
11. Se $P + \bar{P} \leq 2B$, fazer $\bar{b} = \min[g, 2B\bar{P}/(P + \bar{P})]$. Caso contrário, fazer $\bar{b} = \min(\bar{P}, g)$, a não ser que $\bar{P} \geq 2B$, caso no qual deve-se fazer $\bar{b} = g$.
12. Calcular $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ a partir de $\alpha_j = \max(\bar{b} + r_j - u_{cj}, 0)$.
13. Calcular $b = \max(2B - \bar{b}, 0)$.
14. A coordenação ajustada, $\theta'_{c1}, \dots, \theta'_{cn}$, é calcula a partir de:

$$\theta'_{cj} = \text{man}(\theta_{cj} - \alpha_j)$$

e as larguras de banda são b no sentido $i - j$ e \bar{b} no sentido $j - i$.

Como o método fornece a coordenação tendo como referência os centros de vermelho, as defasagens finais Θ são obtidas fazendo:

$$\Theta_i = \left(\theta_{ci} + \frac{r_i}{2} \right) C, \quad i = 1, \dots, n$$

ou

$$\Theta_i = \left(\theta'_{ci} + \frac{r_i}{2} \right) C, \quad i = 1, \dots, n.$$

Apêndice C

Método de Webster para Temporização Semafórica

O método de Webster [44] permite determinar a temporização ótima de um plano a tempo fixo para uma interseção isolada do ponto de vista de minimização do atraso veicular. Uma fórmula para o cálculo aproximado do atraso veicular foi desenvolvida utilizando-se de ferramentas teóricas e de resultados empíricos. Detalhes do desenvolvimento do método não serão abordados aqui, mas apenas um procedimento explicando como deve ser aplicado. Um exemplo da aplicação do método extraído de [44] também é apresentado.

C.1 Procedimento para aplicação do método de Webster

O plano obtido pelo método de Webster considera um período em que o fluxo está variando aleatoriamente em torno de um valor médio. O procedimento extraído de [44] é como segue:

1. Estimar o fluxo q_i e o fluxo de saturação s_i para cada aproximação i da interseção.
2. Calcular a razão $y = q/s$ (ocupação) para cada aproximação e selecionar o maior valor de y para cada fase da interseção.
3. Somar os valores y escolhidos de cada fase de forma a obter $Y = \sum_{i=1}^n y_i$, onde n é o número de fases da interseção.
4. Com base nos tempos estabelecidos de fases para pedestre, tempos de vermelho total e etc. estimar o tempo perdido R .

5. Calcular o tempo de ciclo pela equação:

$$c_0 = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} \quad (\text{C.1})$$

onde L é tempo perdido total por ciclo e dado por $L = nl + R$, onde l é o tempo perdido por fase devido ao atraso nas partidas e não aproveitamento do tempo de amarelo, e R é o tempo de vermelho geral (todas as fases recebem vermelho).

6. Subtrair o tempo perdido total L do tempo de ciclo c_0 para obter o tempo de verde disponível e dividi-lo na razão dos valores de y , isto é:

$$g_1 = \frac{y_1}{Y}(c_0 - L) \quad (\text{C.2})$$

...

$$g_n = \frac{y_n}{Y}(c_0 - L). \quad (\text{C.3})$$

7. Adicionar l segundos para cada tempo de verde efetivo, g_1, \dots, g_n , e subtrair o tempo de amarelo para definir os tempos de verde do plano.

C.2 Exemplo de aplicação

Considere a interseção da Figura C.1 com quatro aproximações e duas fases.

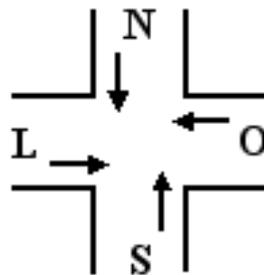


Figura C.1: Interseção exemplo.

1. A Tabela C.1 apresenta os dados que foram medidos na interseção.
2. Calculando a razão $y = q/s$, obtém-se $y_N = 0,250$, $y_S = 0,225$, $y_L = 0,300$ e $y_O = 0,250$. Para a fase $N - S$ fica $y_{N-S} = 0,250$ e para a fase $L - O$ fica $y_{L-O} = 0,300$.
3. Somando os valores de y de cada fase: $Y = y_{N-S} + y_{L-O} = 0,250 + 0,300 = 0,550$.

	Norte	Sul	Leste	Oeste
q (veíc/h)	600	450	900	750
s (veíc/h)	2400	2000	3000	3000
l (s)	2 (por fase)			
R (s)	3 (por fase)			
Tempo de amarelo (s)	3 (por fase)			

Tabela C.1: Dados do exemplo.

4. Neste exemplo, R é igual a soma dos tempos de amarelo e de vermelho total para cada fase, $R = 12$.

5. Com $L = nl + R = 2 \cdot 2 + 12 = 16$. Assim, o tempo de ciclo c_0 fica

$$c_0 = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} = \frac{1,5 \cdot 16 + 5}{1 - 0,550} = \frac{29}{0,450} = 64 \text{ s.}$$

6. O tempo total de verde efetivo disponível é $c_0 - L = 64 - 16 = 48 \text{ s}$, e o verde efetivo de cada fase será:

$$g_{N-S} = \frac{y_{N-S}}{Y} (c_0 - L) = \frac{0,250}{0,550} \cdot 48 = 21,82 \approx 22 \text{ s}$$

$$g_{L-O} = \frac{y_{L-O}}{Y} (c_0 - L) = \frac{0,300}{0,550} \cdot 48 = 26,18 \approx 26 \text{ s.}$$

7. Adicionando l e subtraindo o tempo de amarelo dos tempos efetivos de verde, os tempos de verde do plano ficam:

$$g'_{N-S} = 22 + 2 - 3 = 21$$

$$g'_{L-O} = 26 + 2 - 3 = 25.$$

Apêndice D

Sistemas de Controle de Tráfego Urbano em Tempo-Real

There is considerable disagreement over the benefits, if any, that adaptive control provides.

R. M. Garbacz [16]

Diversos sistemas de controle de tráfego urbano em tempo-real foram pesquisados e desenvolvidos [36]. Estes sistemas buscam suprir deficiências do controle a tempos fixos. Com o passar do tempo os padrões de tráfego se modificam, e os planos fixos se tornam obsoletos se não forem reajustados. Além do mais não reagem a situações inesperadas do tráfego e podem não haver planos fixos já programados para determinada situação.

Os três benefícios principais do controle em tempo-real são a redução diária de cerca de 10% no atraso veicular e número de paradas sob condições normais de operação, acomodação de padrões de tráfego incomuns e não planejados, e adaptação às variações dos padrões de tráfego ao longo do tempo [16]. Os benefícios do controle em tempo-real dependem dos objetivos pretendidos com sua aplicação. A diminuição do número de paradas, do atraso veicular, emissão de poluentes e consumo de combustível é possível através do controle em tempo-real. A progressão em vias arteriais por outro lado, nem sempre é obtida pelos sistemas de controle, mas é facilmente obtida através de sistemas a tempos fixos.

Nem toda malha viária exige controle em tempo real para obter um bom desempenho. Para que a implantação de um sistema de controle em tempo real tenha benefícios é necessário que seja

dado à ele flexibilidade. Restrições prévias na configuração de estágios (como por exemplo, longas fases para pedestres) e de outros parâmetros, podem limitar o desempenho do sistema. Para avaliar os benefícios de um controle em tempo-real deve-se considerar também os recursos despendidos na capacitação, instalação e manutenção dos equipamentos de campo e no ajuste fino dos controladores [16].

Os sistemas de controle de tráfego em tempo-real são divididos em duas categorias [43], os cíclicos e os acíclicos. Os cíclicos são aqueles em que o tempo é distribuído periodicamente a cada fase e operam com os conceitos de ciclo, defasagem e porcentagens de verde; a duração do período é chamada de tempo de ciclo. Os acíclicos não se baseiam nestes conceitos e decidem a cada intervalo de controle (tipicamente, em torno de 4s) se o estado do semáforo é mantido ou trocado, determinando assim que fases têm direito de passagem. As seções seguintes explicam de maneira geral como sistemas dos dois grupos funcionam. Detalhamento adicional sobre os sistemas mais conhecidos é dado, com ênfase à maneira como cada um deles realiza a coordenação semaforica. A Tabela D.1 apresenta um resumo dos métodos que serão abordados.

Tabela D.1: *Resumo dos principais sistemas de controle de tráfego em tempo real.*

	Nome	Período (T)	Coordenação	Cálculo
ACÍCLICOS	ALLONS-D	$5 \leq T \leq 15$	Explícita	Local
	CRONOS	12 s	Implícita	Local
	OPAC	5 s	Explícita	Local
	PRODYN	5 s	Implícita	Local
	RHODES/REALBAND	1 s	Explícita	Local
CÍCLICOS	SCATS	Tempo de Ciclo	Explícita	Local
	SCOOT	Tempo de Ciclo	Explícita	Local
	TUC	Tempo de Ciclo	Explícita	Global

D.1 Sistemas Acíclicos

Os sistemas acíclicos, em geral, usam técnicas de otimização e predição em conjunto com a técnica de horizonte deslizante. A Figura D.1 ilustra o funcionamento da técnica de horizonte deslizante para três períodos (tipicamente, de em torno de 4s) consecutivos. Utilizando um modelo de tráfego e as medidas dos sensores, a cada período de controle, n períodos de controle futuros são simulados e uma árvore de decisão é construída. A simulação considera todas as possibilidades de mudança de sinal e as restrições de verdes mínimos e máximos. É realizada durante o período

de controle vigente para que a decisão seja aplicada no período seguinte. O horizonte deslizante é reconstruído a cada período. Apesar de testar todas as possibilidades, uma vez encontrada a solução ótima, apenas a do período seguinte é aplicada. Para os períodos futuros, um novo horizonte com informações mais recentes será contruído. O tamanho do horizonte n , o tempo de um período e a técnica de busca no espaço de soluções variam de sistema para sistema.

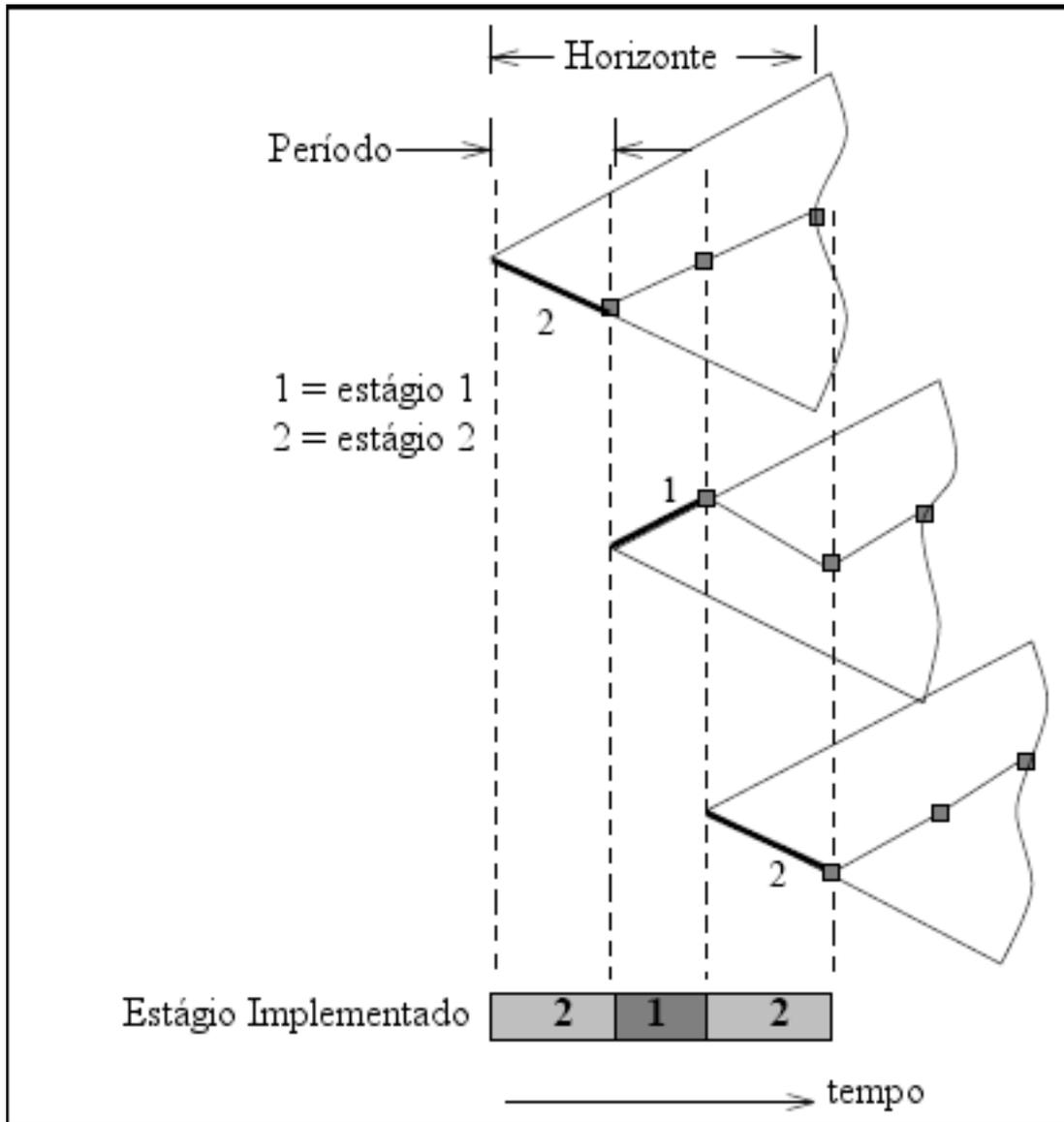


Figura D.1: Horizonte deslizante (adaptada de [37]).

A Figura D.2 mostra uma árvore para uma interseção com apenas dois estágios. Cada caminho possível pelos ramos da árvore mostra uma das possíveis soluções para um horizonte de cinco períodos. Cada arco representa um estágio. Os ramos que não aparecem foram removidos pois não respeitam alguma restrição como, por exemplo, tempo mínimo de verde. Nas folhas (nós finais) estão

o custo de cada solução. A solução ótima está destacada e indica que a melhor decisão é permanecer no mesmo estágio por pelo menos mais um período.

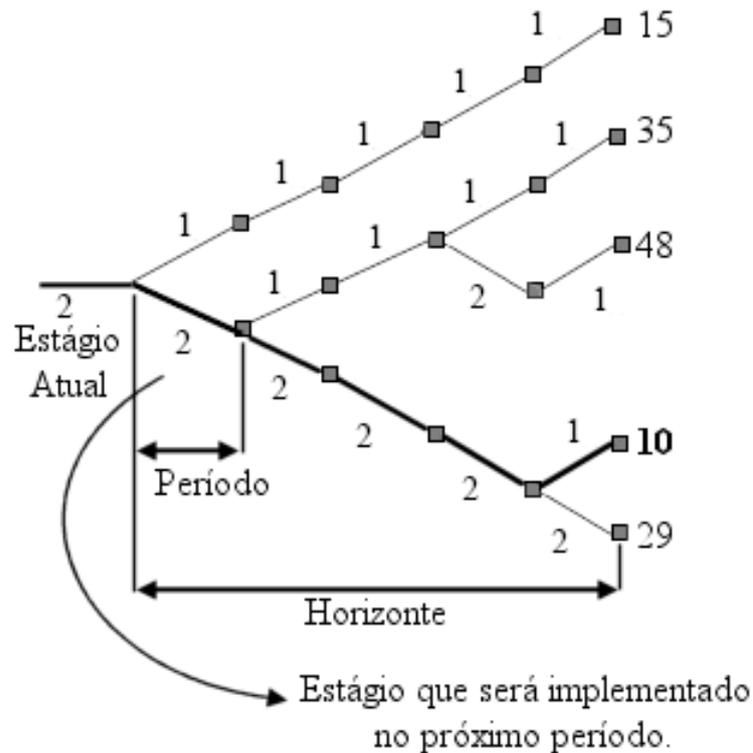


Figura D.2: Espaço de soluções.

A principal desvantagem dos sistemas acíclicos é o fato de o espaço de soluções ser combinatório. Por esse motivo, estes sistemas costumam ser descentralizados e atuam localmente. A atuação local não proporciona explicitamente a coordenação semafórica, que acaba sendo gerada através de níveis de controles mais altos e globais.

A seguir serão apresentados os sistemas ALLONS-D, CRONOS, OPAC, PROLYN e RHODES/REALBAND.

D.1.1 ALLONS-D

ALLONS-D (*Adaptive Limited Lookahead Optimization of Network Signals - Decentralized Version*) é uma estratégia para o controle em tempo-real descentralizado de tráfego urbano [40]. Baseia-se em um método de Programação Dinâmica de Horizonte Deslizante para determinar a sequência ótima de mudança dos estágios em uma interseção. Tem como objetivo minimizar o atraso veicular total nas aproximações de cada interseção de uma dada malha viária. Cada interseção possui um controlador que, para realizar a otimização semafórica, necessita do tamanho atual de filas

e das chegadas futuras em suas aproximações. Qualquer seqüenciamento de estágios e valores de porcentagens de verde são permitidos desde que atendam aos valores mínimos e máximos de verde e às restrições de segurança e proporcionalidade. Prioridade para quaisquer tipos de veículos e para ocupações altas em determinados fluxos é possível. Permite também prioridade para veículos de transporte coletivo [38].

Num primeiro momento [40], ALLONS-D não implementava explicitamente a coordenação semafórica. Sua estrutura altamente centralizada não considerava vias a montante de interseções vizinhas. Considerava apenas vias a jusante de interseções vizinhas em direção à interseção controlada. Portanto, comandos explícitos de coordenação não eram emitidos. A obtenção de coordenação implícita era atribuída à coleta de dados das aproximações, à predição de chegadas obtidas através das contagens, e do baixo valor dos intervalos do horizonte (tipicamente entre 5 e 15 segundos) [38, 40]. Entretanto, estudos de desempenho em relação à coordenação não foram apresentados.

Num segundo momento [38], ALLONS-D sofreu modificações de maneira a induzir explicitamente a coordenação semafórica em arteriais que resulte em semaforização progressiva. Uma nova estrutura em duas camadas (Figura D.3), de forma a obter otimização semafórica para toda a rede, foi adotada. Utilizou-se um método de coordenação semafórica com o intuito de se obter atraso global menor e/ou sinais progressivos. Esta mesma estrutura possibilita a redução de tempos de viagem para rotas de ônibus de transporte coletivo. Como em uma malha viária com várias interseções a otimização local em cada interseção não implica em um ótimo para toda a rede, procurou-se uma maneira de levar ótimos locais em direção ao ótimo global.

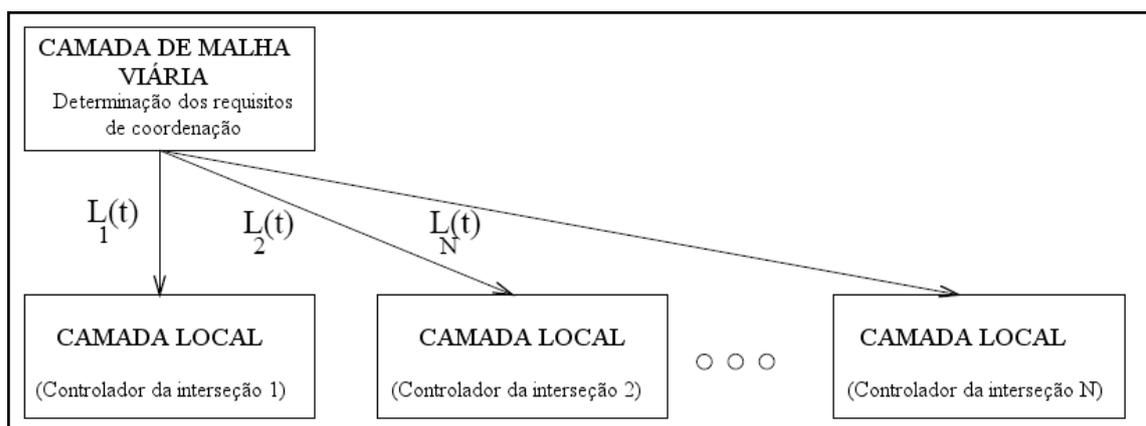


Figura D.3: Estrutura em duas camadas de ALLONS-D (adaptada de [37]).

Esta nova estrutura hierárquica tem, na camada local (*local layer*), ALLONS-D como descrito até a implementação desta nova estrutura. Na camada de malha viária (*network layer*) são determinados os requisitos de coordenação $L(t)$ que são enviados para a camada local. Estes requisitos, que

podem ser variantes no tempo, são definidos como diretivas que favorecem um estágio em relação à outro usando pesos [37, 39]. Assim, uma interseção atribui maior peso ao atraso de um determinado estágio em relação aos demais. Aplica-se este conceito à função objetivo do ALLONS-D. Estes requisitos implicam que a camada de malha viária tenha conhecimento ou seja capaz de prever padrões do fluxo e taxas de fluxo [37].

Resultados [37, 38] em uma arterial com três interseções mostram que o desempenho do sistema é melhor quando comparada com o controle descentralizado com pesos unitários para todas os estágios. Este, por sua vez, teve resultados melhores ou compatíveis com temporização fixa coordenada ajustada exaustivamente através de simulações. Resultados positivos também são relatados em arterial com cinco interseções e em malha em grade coordenada com auto-estrada [39].

D.1.2 CRONOS

A estratégia CRONOS (*ContROl of Networks by Optimization of Switchovers*) [2] é estruturada de maneira a permitir a modelagem de estados supersaturados, o uso de sensores que forneçam informações a respeito das condições do tráfego nas vias e nas interseções, e o uso de um método de otimização para o controle de várias interseções de maneira coordenada. O controle ótimo é especificado a partir de um critério de otimização obtido ao longo de um horizonte de tempo de aproximadamente um minuto, com períodos de quatro segundos. Este critério, o número total de veículos nas vias controladas, é obtido com base em um modelo de tráfego, um modelo da malha viária e das medidas em tempo-real. Estágios não são pré-definidos; apenas restrições de tempo e de correlação de estado para os semáforos [3]. A atuação ocorre a cada doze segundos com a determinação de novos tempos de verde e defasagens.

São utilizadas as medidas do número de veículos nas vias a montante e nas vias a jusante de interseções controladas, o número de veículos em fila nestas vias, o número de chegadas em cada período para cada via controlada entrando na malha controlada e o número de conversões à esquerda estocados em cada interseção controlada. A cada período, o número de veículos nas vias é atualizado com novas medidas, com as partidas calculadas e chegadas previstas. A inclusão das vias a jusante das interseções no modelo e a representação de filas horizontais permite considerar, durante a otimização, o efeito de bloqueio de interseções por filas. CRONOS permite a medição por processamento de imagens através da utilização de câmaras de vídeo.

A otimização é realizada utilizando o algoritmo de *Box* descrito em [29], que permite obter um ótimo global ou no mínimo um bom ótimo local, converge rapidamente para uma interseção,

tem complexidade polinomial (n^2) com o número de interseções, permitindo o controle de diversas interseções de forma coordenada (de 5 a 10, tipicamente [3]).

O algoritmo de *Box* baseia-se em uma técnica de busca sequencial eficiente na resolução de problemas com funções objetivo não-lineares multivariáveis sujeitas a restrições de desigualdades não-lineares e não exige derivadas. A formulação em linguagem matemática é a seguinte:

$$\begin{aligned} & \max f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{Sujeito a: } g_k \leq x_k \leq h_k, \quad k = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

As variáveis implícitas x_{n+1}, \dots, x_m são funções dependentes das variáveis dependentes explícitas x_1, x_2, \dots, x_n . Os limites superior e inferior h_k e g_k são constantes ou são funções das variáveis independentes.

Testes de simulação [2] em uma malha viária com três interseções adjacentes mostram que CRONOS obteve como solução ótima uma onda verde nesta malha muito próxima à onda verde ótima. Se a onda verde ótima for introduzida inicialmente no algoritmo de otimização ela é reproduzida durante todo o período de testes. Testes em campo [3] que comparam CRONOS com outras duas estratégias (AUTONOME e PARCIVAL), apresentaram bons resultados, mas considerações específicas a respeito de coordenação não foram realizadas.

D.1.3 OPAC

OPAC (*Optimization Policies for Adaptive Control*) [17] é uma estratégia de controle de tráfego em tempo-real descentralizada, baseada na técnica de horizonte deslizante, com desempenho próximo ao ótimo teórico que requer apenas dados obtidos de detetores veiculares em todas as vias a montante da interseção [18]. OPAC realiza de maneira distribuída e dinâmica a otimização de atraso e número de paradas com restrição apenas para os tempos mínimos e máximos de duração de verde [23].

OPAC passou por um processo evolutivo [23] até se obter um algoritmo adequado para implementação em tempo real. O primeiro algoritmo desenvolvido, OPAC-1, utiliza a técnica de programação dinâmica. O segundo algoritmo desenvolvido, OPAC-2, é uma simplificação do primeiro e otimiza sequencialmente. O terceiro algoritmo, ROPAC, faz o uso da técnica de horizonte deslizante. Finalmente, para implementação em tempo real, implementou-se o OPAC-RT. Diversos testes foram realizados com duas versões (1.0 e 2.0) do OPAC-RT em interseções isoladas [23], com perspectivas de melhorias a respeito de coordenação semafórica, já que o modelo OPAC permite a comunicação entre controladores de interseções vizinhas.

OPAC-RT 3.0 trouxe várias melhorias em relação às versões anteriores, permitindo a utilização em outras situações que não interseções isoladas e otimização de mais estágios, entre outras. Destaca-se a modelagem algorítmica de um mecanismo para coordenação de interseções adjacentes [22]. Testes com esta versão foram realizados em uma malha viária com quinze interseções, compreendendo duas arteriais de mão dupla, uma com seis e outra com cinco interseções. Os resultados mostram que OPAC apresenta melhorias no desempenho em arteriais, especialmente quando saturadas, e em interseções isoladas.

Quando operando de modo coordenado [22] além de restrito pelos tempos mínimos e máximos de verde, OPAC também tem como restrição a duração do ciclo virtual (*virtual cycle length*) e a defasagem, que são atualizados com base em dados obtidos em tempo real. Esta melhoria que permite ao usuário optar pela coordenação/sincronização deu origem o OPAC-4, chamado *Virtual-Fixed-Cycle* OPAC (VFC-OPAC). Este nome se deve ao fato de que ciclo a ciclo o ponto de referência, ou ponto de referência de ciclo local, é permitido variar em torno dos pontos de referência fixos ditados pelo tamanho do ciclo virtual e pela defasagem. Isto permite a sincronização de fases, terminando antes ou se prolongando para melhor lidar com as condições dinâmicas do tráfego.

VFC-OPAC consiste em uma arquitetura de três camadas (Figura D.4). A primeira, camada de controle local, implementa o procedimento de horizonte deslizante do OPAC-3, e calcula continuamente as seqüências ótimas de chaveamento para o horizonte projetado restritas ao VFC comunicados pela terceira camada. A segunda, camada de coordenação, otimiza a defasagem em cada interseção uma vez por ciclo. E a terceira, camada de sincronização, calcula o VFC para toda a rede em períodos definidos pelo usuário, sendo possível calcular diferentes VFCs para diferentes grupos de interseções. Ao longo do tempo, VFC e defasagem são modificados para se ajustarem às condições atuais de tráfego.

D.1.4 PRODYN

PRODYN [15] controla as indicações semafóricas em períodos de cinco segundos. A decisão para o próximo período é tomada com base nas medidas de fluxo do período que o antecede. Um detetor veicular localizado na via a jusante da interseção anterior é utilizado para prever as chegadas nas linhas de parada para os próximos 75 segundos (tamanho do horizonte deslizante). Um detetor localizado 50 m a montante da linha de parada é utilizado para realizar as medidas utilizadas na estimação do tamanho de fila vertical. PRODYN não considera o espaço ocupado pelos veículos na pista, os carros acumulam-se sobre o mesmo espaço, como se fossem empilhados, portanto chama-se fila vertical, e não fila horizontal. PRODYN minimiza o atraso total durante o horizonte utilizando um

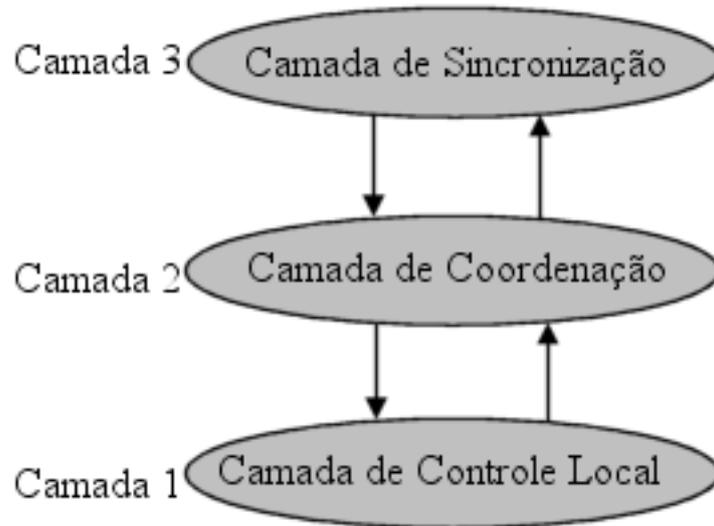


Figura D.4: Estrutura VFC-OPAC em três camadas (adaptada de [22]).

modelo de tráfego baseado em equações de estado e um critério terminal associado ao estado ao final do horizonte, utilizando *Forward Dynamic Programming*. Apenas a decisão para o primeiro período do horizonte é aplicada e o procedimento se repete para um novo horizonte.

A estrutura de controle do PRODYN é descentralizada. Quando um controlador de uma determinada interseção termina a otimização para o horizonte, simula as saídas da interseção relativas ao controle ótimo para todos os passos do horizonte. Estas saídas computadas das saídas das vias e de taxas de conversão determinadas *offline* são enviadas em uma mensagem para os controladores de cada interseção a jusante. Estes controladores utilizarão estas mensagens no próximo período para obter melhor previsão de chegadas. Em interseções muito afastadas (mais de 200 m) são utilizados valores médios, e em interseções muito próximas (menos de cinco segundos em velocidade de cruzeiro) valores médios são utilizados para prever o último período do horizonte. De acordo com Porche *et. al* [40], PRODYN procura explicitamente a obtenção de coordenação entre interseções adjacentes pois contabiliza o custo de interseções vizinhas com base nos últimos planos otimizados para elas.

D.1.5 RHODES/REALBAND

A filosofia do sistema RHODES [25] é utilizar e responder às variações estocásticas do tráfego. Para responder proativamente a estas variações, RHODES faz uso de modelos estocásticos. A arquitetura RHODES é baseada na decomposição do problema de controle/estimação em três níveis (Figura D.5). A saber: (1) controle de interseção; (2) controle de fluxo de malha; (3) controle de carregamento da malha. O nível mais baixo, controle de interseção, faz as previsões de fluxo, escolha de

estágio e sua duração, baseado no fluxo observado, nas restrições de coordenação, nos fluxos preditos e restrições tipicamente estabelecidas pelo operador. Estas decisões são tomadas segundo-a-segundo.

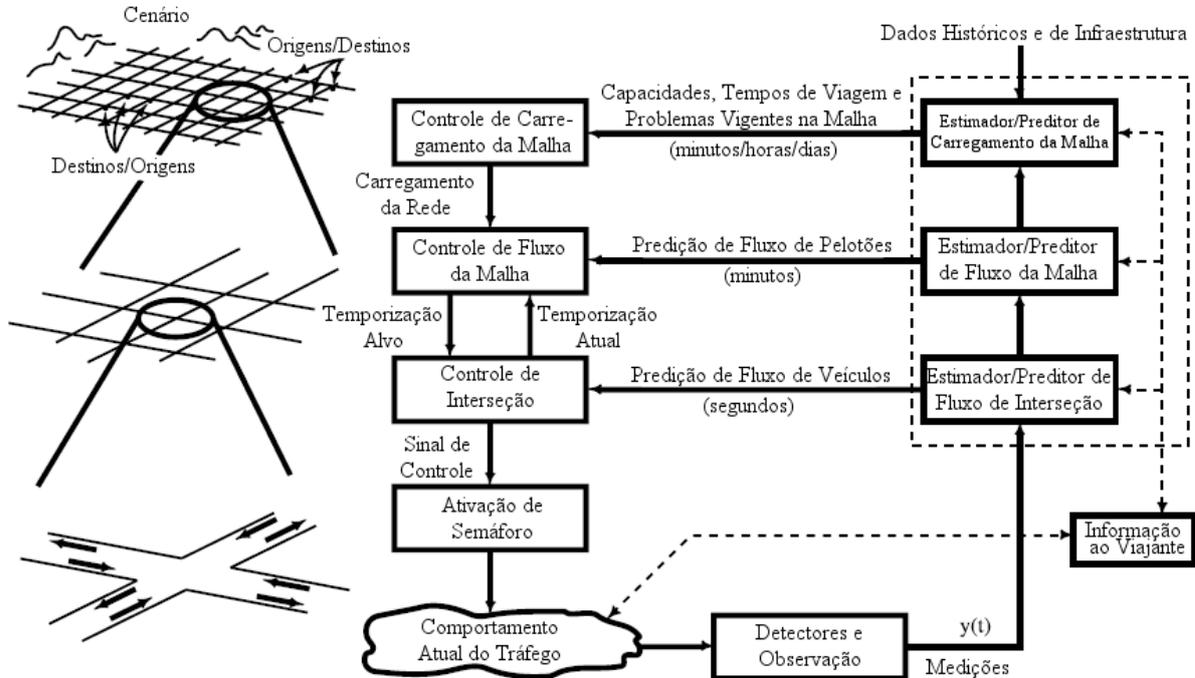


Figura D.5: Estrutura do sistema RHODES (adaptada de [25]).

No nível intermediário, previsões de fluxos de pelotões são utilizadas para estabelecer as restrições de coordenação para cada interseção da malha. Estas decisões são tomadas periodicamente em intervalos de 200 a 300 segundos dependendo das características da rede.

No nível mais alto, controle de carregamento da malha, são preditas as demandas gerais ao longo de grandes períodos de tempo, tipicamente uma hora. Estas demandas são utilizadas proativamente para determinar o tamanho futuro de pelotões. Sistemas avançados de informação ao viajante e *dynamic traffic assignment* podem ser utilizados neste nível. Enquanto o primeiro fornece as informações para que o usuário decida-se sobre qual rota tomar, o segundo sugere a rota que deve ser seguida pelo usuário.

Além desta decomposição hierárquica do problema de controle/estimação, o controle é espacialmente distribuído. As funções do nível de controle de interseção podem ser distribuídas em cada interseção controlada, exigindo comunicação entre as interseções. Obviamente, a implementação centralizada é possível, a um maior custo computacional e fazendo mau uso das tecnologias disponíveis.

O protótipo RHODES [25] consiste de cinco módulos: lógica de otimização de interseção, lógica de previsão de fluxo em arcos, lógica de otimização do fluxo na malha, lógica de previsão do fluxo de pelotões e lógica de estimação de parâmetros e estados. A lógica de otimização de

interseção e a lógica de previsão de fluxo nos arcos juntas formam a lógica de controle de interseção. A lógica de otimização de fluxo na malha e a lógica de previsão do fluxo de pelotões juntas formam o lógica de controle de malha. A Figura D.6 esquematiza o protótipo.

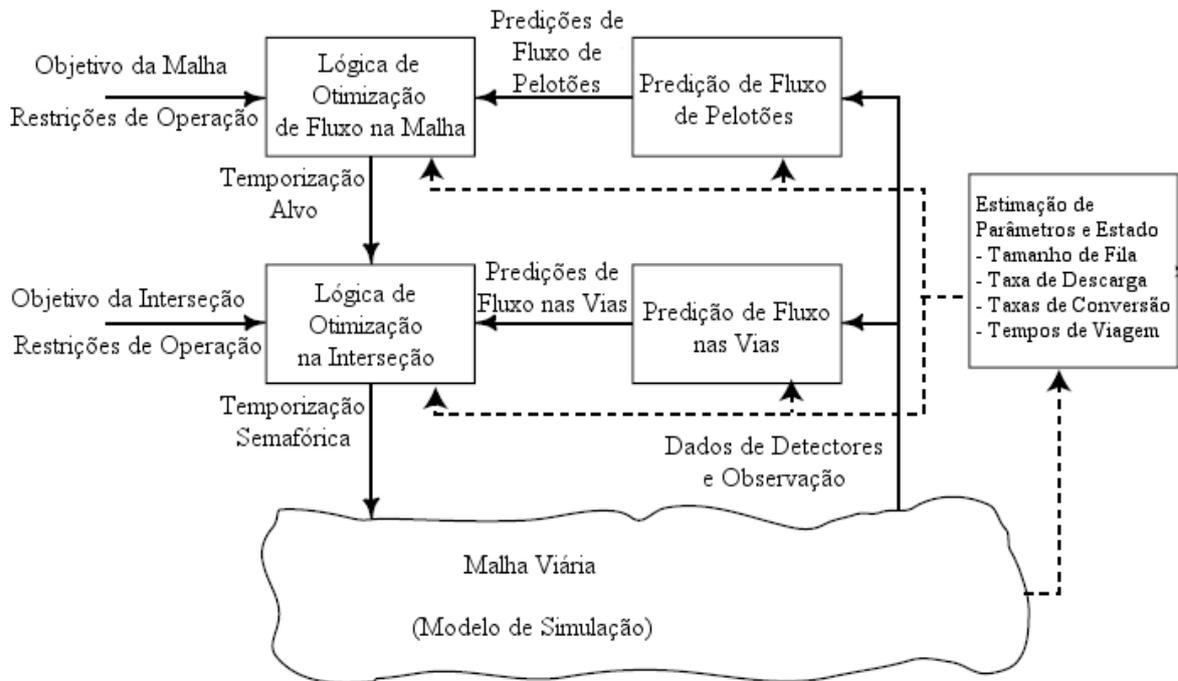


Figura D.6: Módulos do protótipo RHODES (adaptada de [25]).

As estratégias de controle de malha e de controle de interseção são integradas permitindo que bandas de coordenação restrinjam a lógica de otimização de interseção para assegurar que pelotões chegando recebam a largura de banda alocada para coordenação. A lógica de otimização de interseção ajusta os instantes de início e fim do estágio atual baseado nas chegadas de veículos observadas e previstas para melhor utilizar a capacidade da interseção.

A lógica de controle de interseção resolve um problema de programação dinâmica baseado na estratégia de horizonte deslizante (45-60 s) para encontrar a seqüência ótima de estágios e duração dos mesmos.

A lógica de controle de malha é composta de dois componentes que trabalham fortemente relacionados. A lógica de previsão de fluxo de pelotões é um modelo simplificado de simulação de tráfego que considera as aproximações em uma subrede. Este modelo é utilizado como avaliador da função objetivo ou como estimador de desempenho da rede para a lógica de otimização. A lógica de otimização da malha é baseada em um modelo chamado REALBAND [7]. REALBAND procura gerar bandas de progressão baseada nos pelotões atuais em uma malha. A largura e velocidade de uma banda de progressão são determinadas como as que resultam no melhor desempenho para a malha.

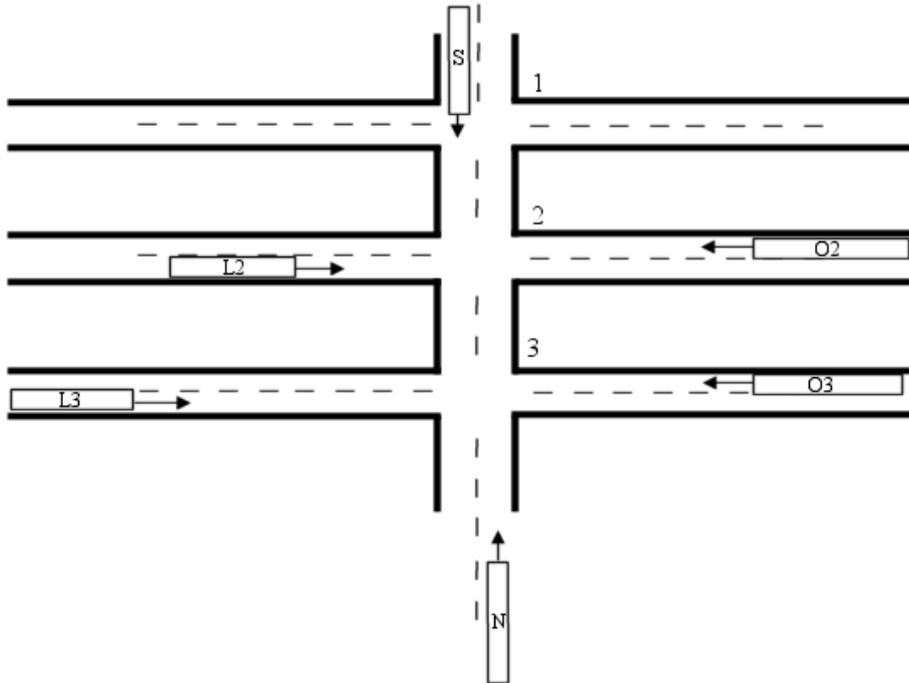


Figura D.7: Exemplo para ilustrar REALBAND (adaptada de [25]).

A idéia básica do REALBAND pode ser entendida considerando o seguinte exemplo. Considere a malha viária da Figura D.7 com vários pelotões viajando em diferentes direções. Pelotões são definidos a partir de dados observados de detectores com uma densidade de fluxo acima de um nível pré-estabelecido por um período de tempo. São caracterizados em termos de veículos e velocidades. Cada pelotão pode ter uma velocidade e um tamanho. Quando dois ou mais pelotões têm chegadas previstas em uma interseção requisitando estágios diferentes, é dito que ocorre um conflito.

A Figura D.8 exemplifica conflitos que podem ocorrer. Uma árvore de decisão é então construída onde cada ramo da árvore representa uma possível resolução do conflito. A árvore de decisão é terminada quando cada ramo tiver sido explorado ao longo de um horizonte pré-definido, algo como 200-300 segundos. REALBAND avalia, utilizando a lógica de previsão de fluxo de pelotões, o desempenho de cada ramo da árvore de decisão. Quando todos os ramos tiverem sido explorados, uma decisão é tomada baseada no ramo com o melhor desempenho estimado. As decisões REALBAND são utilizadas como restrições para a lógica de controle de interseção. Quando a lógica de controle de interseção começa o seu horizonte deslizante de otimização, o conjunto de decisões factíveis é requerido a acomodar as resoluções de conflito REALBAND, com exceção de que a lógica de controle de interseção pode ajustar os instantes de início e final do estágio baseado na observação de pelotões locais.

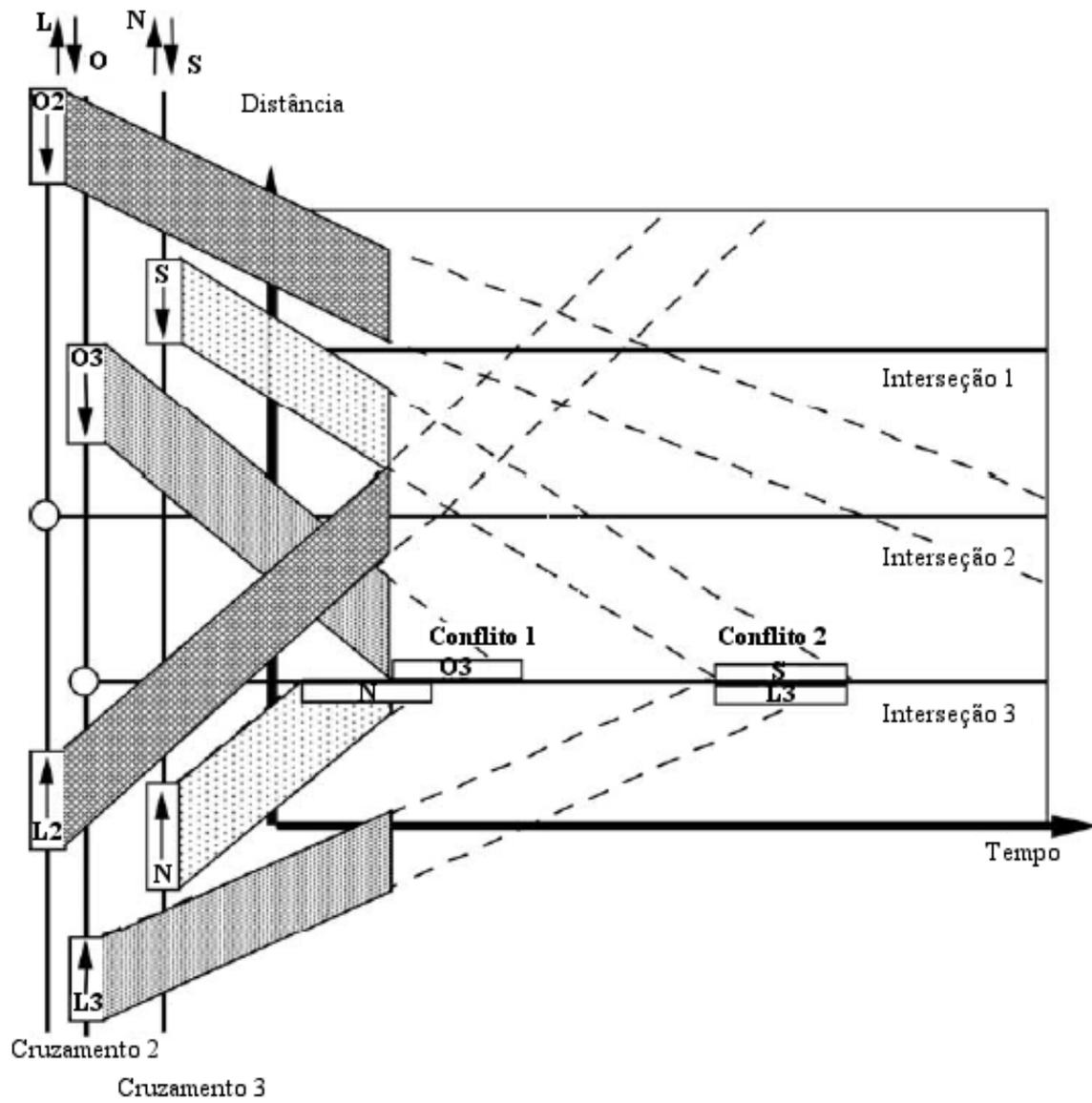


Figura D.8: Bandas REALBAND (adaptada de [25]).

D.2 Sistemas Cíclicos

Exceto pelo fato de operarem com os conceitos de ciclo, defasagem e porcentagens de verde, estes sistemas não seguem uma técnica em comum para seu funcionamento como é o caso do horizonte deslizante nos sistemas acíclicos. Serão apresentados os sistemas SCATS e SCOOT, e algumas de suas peculiaridades. A estratégia de controle TUC foi apresentada em detalhes no Capítulo 3

D.2.1 SCATS

SCATS [33] (*Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System*) foi desenvolvido com o propósito de coordenar os semáforos nas principais arteriais da cidade de Sydney. O controle procura otimizar o número de paradas e o atraso veicular através do controle ciclo-a-ciclo de porcentagens de verde, defasagem e ciclo. SCATS, diferentemente dos demais sistemas, não utiliza um modelo de tráfego subjacente para realizar simulações e decidir como efetuar o controle.

Possui uma estrutura distribuída com habilidade de comunicação entre seus elementos. Cada região pode ser composta por até 120 controladores. Um computador central apenas monitora o desempenho da região e o estado dos equipamentos. Os controladores locais de cada região são agrupados em sistemas e sub-sistemas. Sistemas não interagem entre si pois não estão geograficamente relacionados. Subsistemas interagem entre si e podem ser ligados para compor sistemas.

Os subsistemas são os elementos básicos de controle no nível “estratégico” e compreendem de uma a dez interseções. Com base nas variações de demanda e capacidade, os valores apropriados de porcentagens de verde, defasagem e ciclo para cada subsistema e a defasagem entre subsistemas, são escolhidos pelo algoritmo estratégico de controle. As interseções dentro de um mesmo sub-sistema operam com o mesmo tamanho de ciclo. Laços indutivos adquirem dados em todas as aproximações logo após a faixa de retenção. Laços definidos como estratégicos são utilizados pelo controle estratégico, enquanto os demais são utilizados para o controle local (pular um estágio, encurtar o verde, etc.).

O parâmetro de tráfego mais importante para o funcionamento de SCATS surge de um conceito análogo ao de grau de saturação. É definido como a razão entre o tempo de verde efetivamente utilizado e o tempo de verde disponível. A medição do tempo de verde efetivamente utilizado leva em consideração o *headway* esperado entre veículos.

O tempo de ciclo de um subsistema é função do mais alto grau de saturação medido neste subsistema no ciclo anterior. As mudanças no tamanho de ciclo estão limitadas a $\pm 6s$. Para cada

subsistema quatro tempos de ciclo são pré-determinados, tempo de ciclo mínimo C_{\min} e máximo C_{\max} , tempo médio de ciclo CS com o qual boa coordenação bidirecional é obtida, e tempo de ciclo de extensão CX , valor sobre o qual qualquer tempo adicional de ciclo será transferido para determinada fase, chamada fase de extensão (controle local). Regras definem como cada um destes tempos de ciclo são utilizados.

Quatro planos base de porcentagens de verde são fornecidos para cada interseção e são escolhidos em cada sub-sistema com base nos requisitos da interseção crítica deste. Uma fase tem que ser definida como fase de extensão. Estes planos também definem a sequência normal das fases, a qual pode variar de plano para plano, e opções para cada fase que controlam a transferência de tempo inutilizado (por exemplo, pular uma fase). Exceto pela fase de extensão, que tem que ser definida em termos de porcentagem do ciclo, pode-se definir os tempos de verde de cada fase em segundos. As variações nos tempos de ciclo determinam as variações nos tempos de verde. Fases determinadas em segundos recebem uma reduzida proporção do ciclo, fases determinadas em porcentagem do tempo de ciclo recebem uma proporção constante até que o tempo de ciclo de extensão seja atingido, quando então, todo tempo adicional de ciclo é transferido para a fase de extensão.

Uma vez por ciclo é realizada uma votação para o plano de porcentagens de verde. Dois votos para um mesmo plano em três ciclos consecutivos elegem aquele plano. O controle de porcentagens de verde concomitantemente com o controle de tempo de ciclo procuram equalizar o grau de saturação em todas as aproximações.

Cinco planos base de defasagem interna (entre interseções do mesmo subsistema) e outros cinco externos (entre sub-sistemas) são fornecidos. Os planos internos de defasagem possuem a relação em segundos entre o zero do contador de ciclo e o fim de determinada fase. Para os internos, a mesma idéia se aplica, mas com relação a uma interseção no sub-sistema adjacente. A defasagem em segundos é independente do tamanho de ciclo, mas pode ser modificada em função do ciclo para permitir mudanças em filas e velocidade nas vias em períodos de tráfego intenso.

Tipicamente, dois planos definem defasagens ótimas para padrões de fluxo predominantes em uma direção, podendo ser modificados em função do tamanho de ciclo de acordo com a expressão:

$$p' = p[1 + A \cdot g(C)], \quad (D.1)$$

onde p' é a defasagem modificada em segundos, p é a defasagem base, A é um fator de modificação de defasagem especificado podendo ser positivo ou negativo, e $g(C)$ é uma função do tamanho do ciclo onde $g(C) = 0$ quando $C = C_{\max}$ e $g(C) = 1$ quando $C \leq 0.75C_{\max}$.

Dos cinco planos de defasagem, um opera apenas com o tempo de ciclo mínimo C_{\min} e outro apenas dentro da $CS < C < CS + 10$. Os outros três são escolhidos por um algoritmo de votação. Uma vez por ciclo um voto de plano de defasagem é calculado. Quatro votos para o mesmo plano em cinco ciclos consecutivos resultam na seleção deste plano.

A defasagem externa não necessariamente acarreta na ligação de dois sub-sistemas, o que acontece apenas se condições de ligação existirem. A independência entre o controle de porcentagens de verde e defasagens permite ao todo a escolha entre 20 planos diferentes, que podem variar dentro da faixa de duração do ciclo especificada.

D.2.2 SCOOT

SCOOT [27, 41] (*Split, Cycle, and Offset Optimisation Technique*) é um sistema de controle em tempo-real de tráfego urbano com o objetivo de reduzir atraso veicular, número de paradas e níveis de congestionamento abaixo dos obtidos pelos melhores sistemas de tempo fixo, de eliminar a necessidade de atualizar planos fixos, e de prover informações para gerenciamento do tráfego. O método SCOOT se baseia em diversos conceitos do método TRANSYT para tempo fixo, inclusive o critério de otimização.

SCOOT procura minimizar a soma das filas médias na área controlada. Leva em consideração também o número de paradas. Um fator de ponderação balanceia a importância de filas e número de paradas. O atraso dos veículos em filas e o número de paradas são traduzidos em termos financeiros. Este critério de otimização é chamado *Performance Index - PI* (Índice de Desempenho).

Laços indutivos estão localizados em todas as aproximações de interseções controladas, tão longe da linha de parada da aproximação em que se encontra quanto possível. Os dados são coletados em tempo real e armazenados em *Cyclic Flow Profiles - CFP* por via. Os dados coletados em tempo real dispensam a entrada de dados pré-definidos como fluxos médios e tempos de cruzeiro, necessários para a utilização do TRANSYT. Os CFPs são a medida média do fluxo em um sentido de veículos que passaram por determinado ponto da via, em intervalos de quatro segundos. Contêm a informação necessária para coordenar pares adjacentes de semáforos e para o cálculo das porcentagens de verde. Para cada via, o modelo de tráfego do SCOOT conhece as indicações semaforicas, velocidades de cruzeiros e fluxos de saturação pré-estabelecidos. Prevê assim o tamanho corrente da fila e seu final. É utilizado então pelos otimizadores para avaliar alternativas de controle e encontrar a melhor temporização, através de simulações.

O sistema SCOOT possui um conjunto de temporizações que se não fossem alterados pelos

otimizadores seriam efetivamente um plano de tempo fixo. SCOOT utiliza frequentes alterações incrementais de porcentagens de verde, defasagens e ciclo diminuindo os transientes e controlando os sinais com um plano que evolui ao longo do tempo.

Poucos segundos antes de cada mudança de estágio o otimizador de porcentagens de verde estima se mudanças devem ser feitas antecipadamente, como programado, ou posteriormente. O otimizador de porcentagens de verde implementa qualquer alteração que vá minimizar o grau máximo de saturação nas aproximações de uma determinada interseção. Qualquer alteração realizada nas durações de verde é temporária, e para cada alteração temporária, uma alteração permanente e menor é feita no plano.

O otimizador de defasagem opera em cada interseção a cada ciclo. A informação no *cyclic flow profile* é utilizada para estimar se uma alteração na defasagem vai melhorar ou não, a progressão total do tráfego nas ruas que estão imediatamente a montante e a jusante da interseção. Um índice de desempenho utilizando atraso, número de paradas e nível de congestionamento é utilizado.

SCOOT opera em sub-áreas de sinais com tempo de ciclo comum de maneira a manter a coordenação semaforica. O otimizador de ciclo pode variar o ciclo de cada sub-área em incrementos de poucos segundos em intervalos de no mínimo 2,5 minutos. Cada sub-área tem seu tempo variado independentemente das demais entre limites inferior e superior previamente estabelecidos. O tempo de ciclo do SCOOT é variado para assegurar que a interseção com maior volume na sub-área possa operar, se possível, a uma grau máximo de saturação de 90%. É possível operar com dois ciclos com meio tempo de ciclo de duração .

O nível de congestionamento, medido pelo modelo em cada via, é utilizado para modificar as decisões dos otimizadores de porcentagens de verde e defasagem. O tempo de verde pode ser aumentado para reduzir os níveis de congestionamento, e as defasagens em uma via podem ser melhoradas para reduzir o risco de bloqueio em interseções a montante.

Apêndice E

Gráficos de Resultados

Este apêndice apresenta na forma de gráficos os resultados obtidos nas simulações que foram apresentadas no Capítulo 4.

E.1 Conjunto de Simulações 1

Esta seção apresenta os gráficos dos resultados obtidos no Conjunto de Simulações 1, tanto os resultados globais como os resultados na via arterial.

E.1.1 Resultados Globais

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.1-E.5, correspondem à Tabela 4.3 do Capítulo 4.



Figura E.1: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Velocidade Média (km/h).



Figura E.2: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Total de Viagem (h).

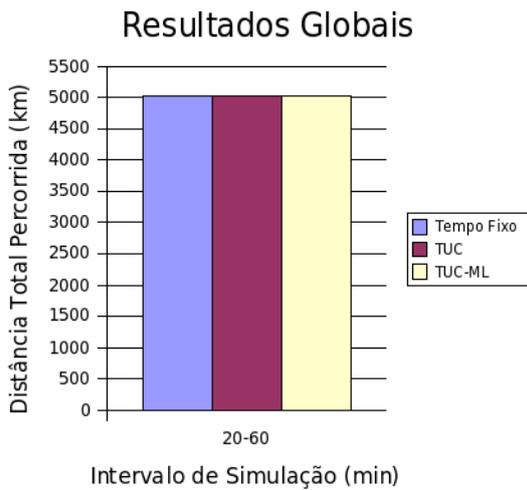


Figura E.3: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Distância Total Percorrida (km).

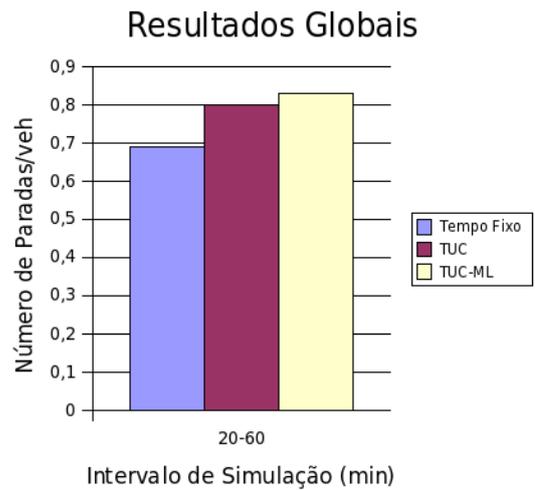


Figura E.4: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Número de Paradas/veh.

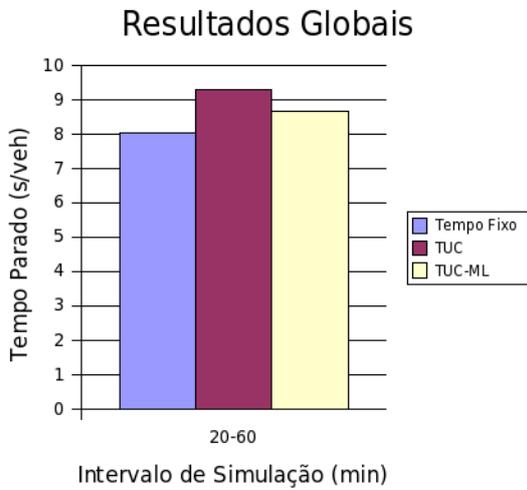


Figura E.5: Resultados globais do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Parado (s/veh).

E.1.2 Resultados da Arterial

Os resultados da via arterial aqui apresentados nas Figuras E.6-E.9, correspondem à Tabela 4.4 do Capítulo 4.

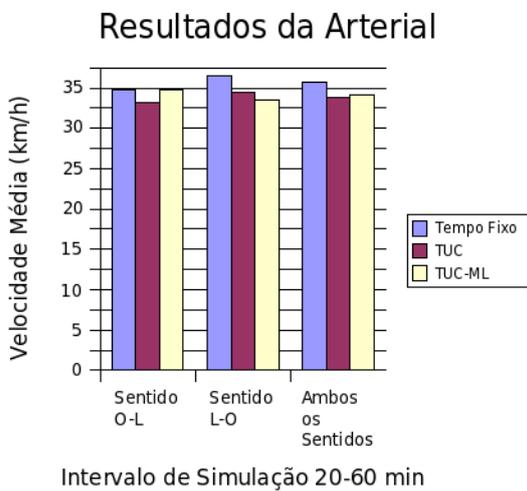


Figura E.6: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Velocidade Média (km/h).

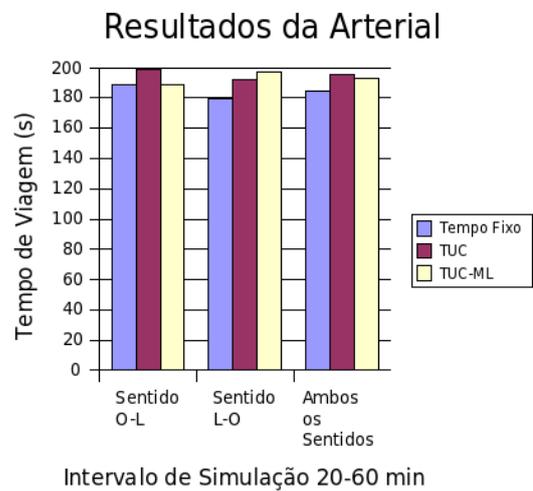


Figura E.7: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Tempo de Viagem (s).

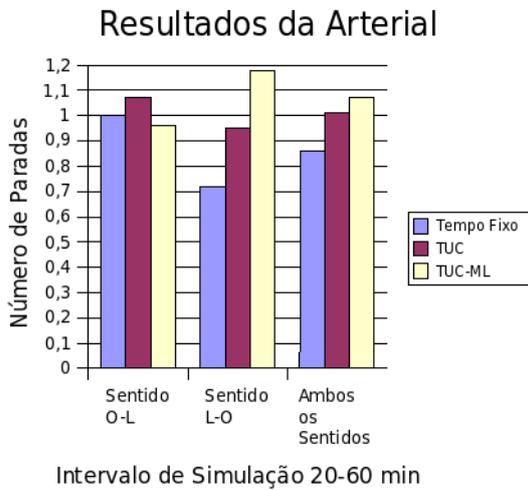


Figura E.8: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Número de Paradas.

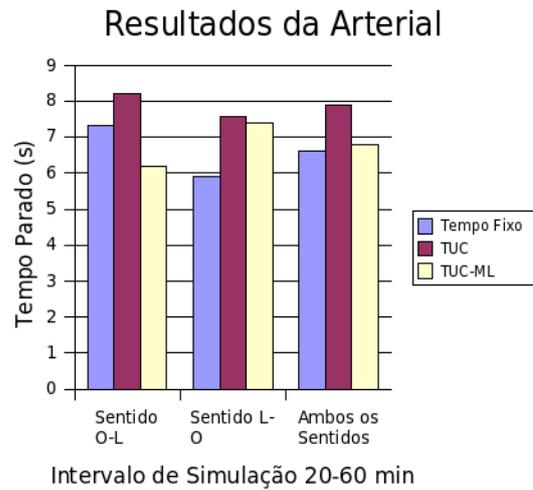


Figura E.9: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 1 - Tempo Parado (s).

E.2 Conjunto de Simulações 2

Esta seção apresenta os gráficos dos resultados obtidos no Conjunto de Simulações 2, tanto os resultados globais como os resultados na via arterial.

E.2.1 Resultados Globais

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.10-E.14, correspondem à Tabela 4.7 do Capítulo 4.



Figura E.10: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Velocidade Média (km/h).

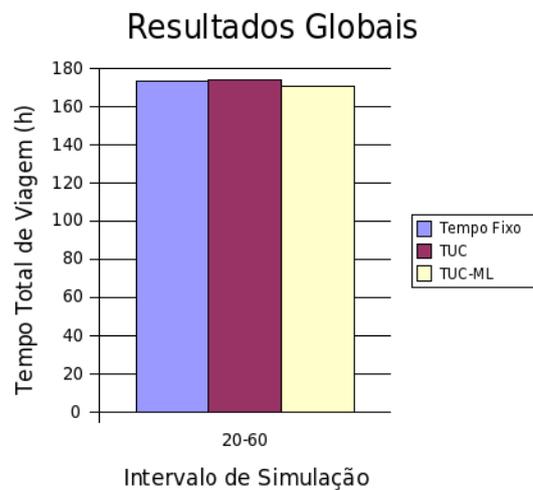


Figura E.11: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Total de Viagem (h).



Figura E.12: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Distância Total Percorrida (km).

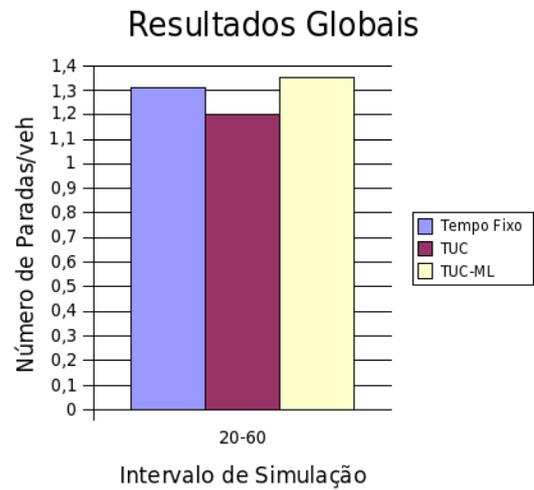


Figura E.13: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Número de Paradas/veh.

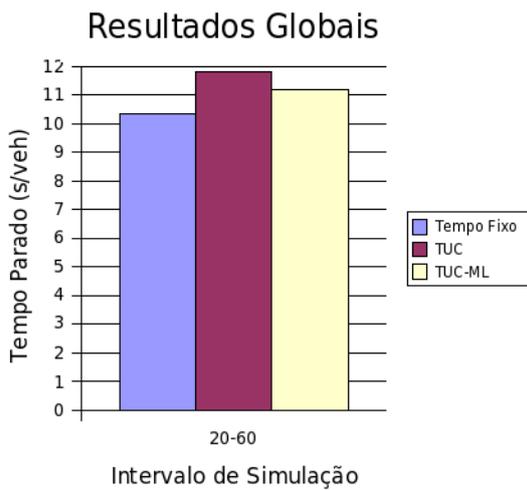


Figura E.14: Resultados globais do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Parado (s/veh).

E.2.2 Resultados da Arterial

Os resultados da via arterial aqui apresentados nas Figuras E.15-E.18, correspondem à Tabela 4.8 do Capítulo 4.

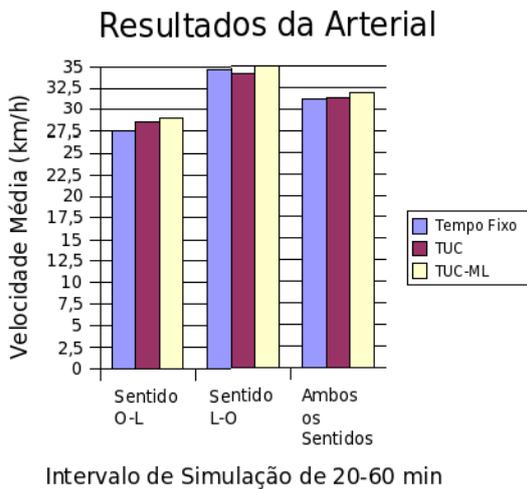


Figura E.15: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Velocidade Média (km/h).

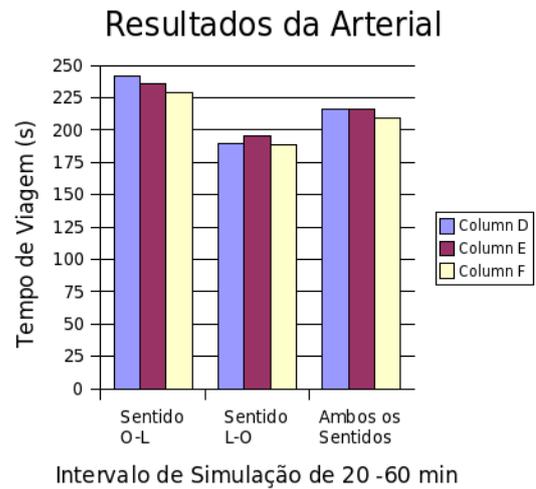


Figura E.16: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Tempo de Viagem (s).

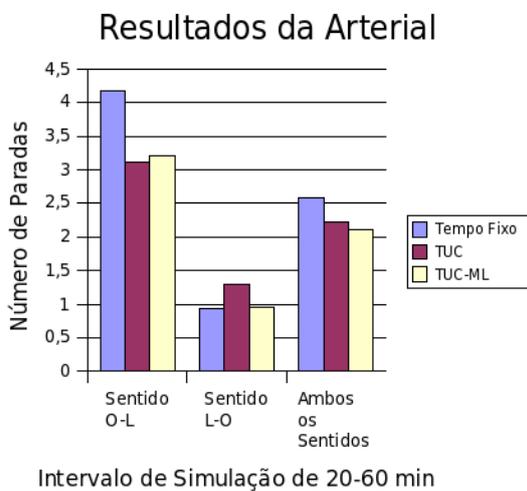


Figura E.17: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Número de Paradas.

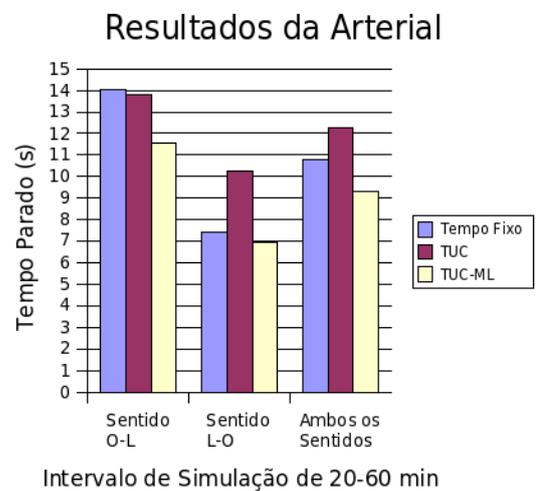


Figura E.18: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 2 - Tempo Parado (s).

E.3 Conjunto de Simulações 3

Esta seção apresenta os gráficos dos resultados obtidos no Conjunto de Simulações 3, tanto os resultados globais como os resultados na via arterial.

E.3.1 Resultados Globais

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.19-E.23, correspondem à Tabela 4.11 do Capítulo 4.

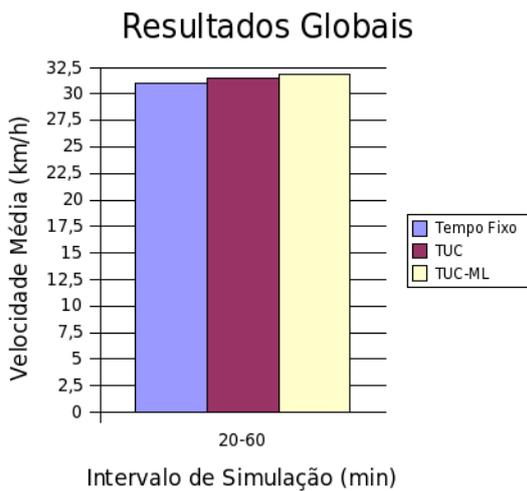


Figura E.19: Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Velocidade Média (km/h).

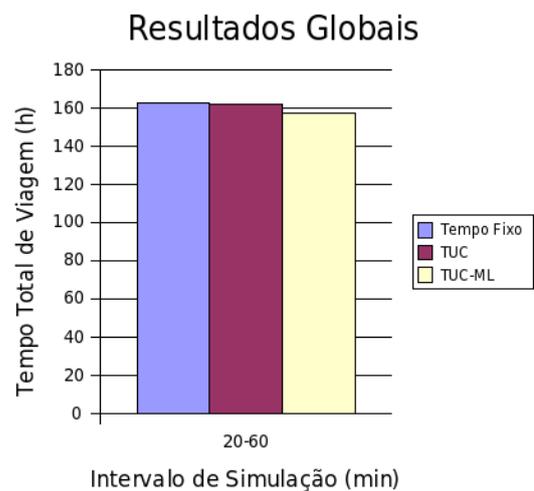


Figura E.20: Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Total de Viagem (h).



Figura E.21: Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Distância Total Percorrida (km).



Figura E.22: Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Número de Paradas/veh.

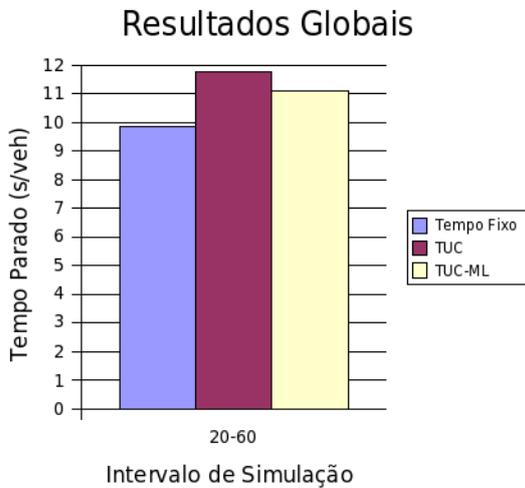


Figura E.23: Resultados globais do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Parado (s/veh).

E.3.2 Resultados da Arterial

Os resultados da via arterial aqui apresentados nas Figuras E.24-E.27, correspondem à Tabela 4.12 do Capítulo 4.

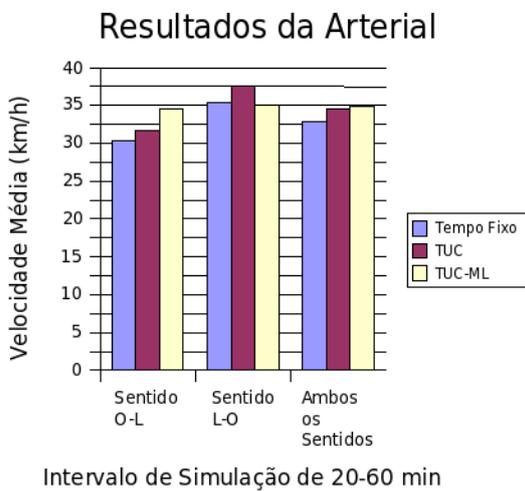


Figura E.24: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Velocidade Média (km/h).

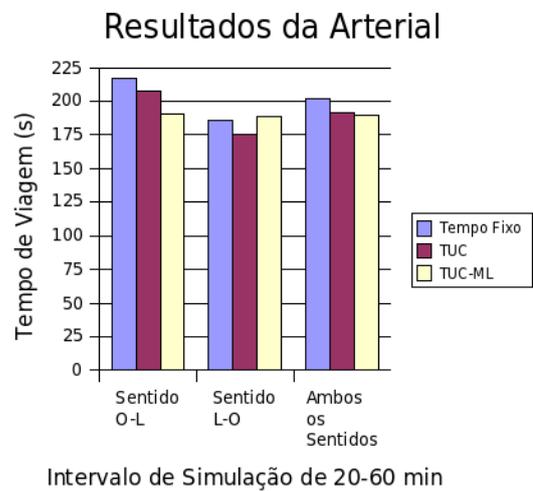


Figura E.25: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Tempo de Viagem (s).

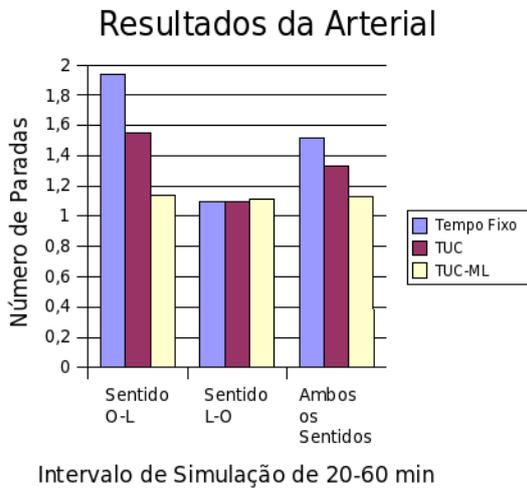


Figura E.26: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Número de Paradas.

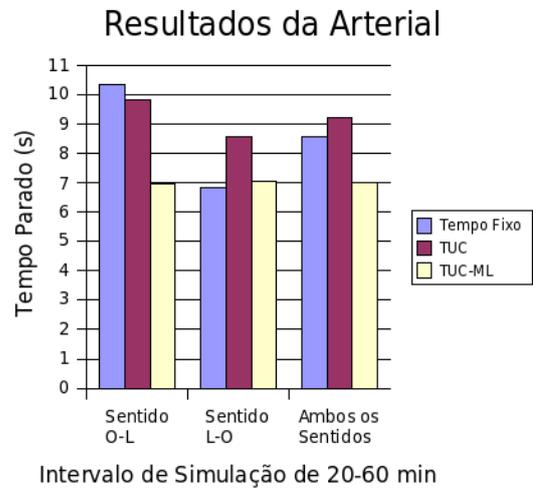


Figura E.27: Resultados da arterial do Conjunto de Simulações 3 - Tempo Parado (s).

E.4 Conjunto de Simulações 4

Esta seção apresenta os gráficos dos resultados obtidos no Conjunto de Simulações 4, tanto os resultados globais como os resultados na via arterial.

E.4.1 Resultados Globais

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.28-E.32, correspondem à Tabela 4.15 do Capítulo 4.

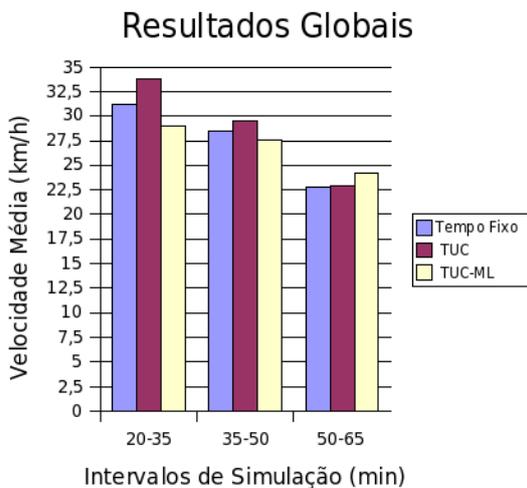


Figura E.28: Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).

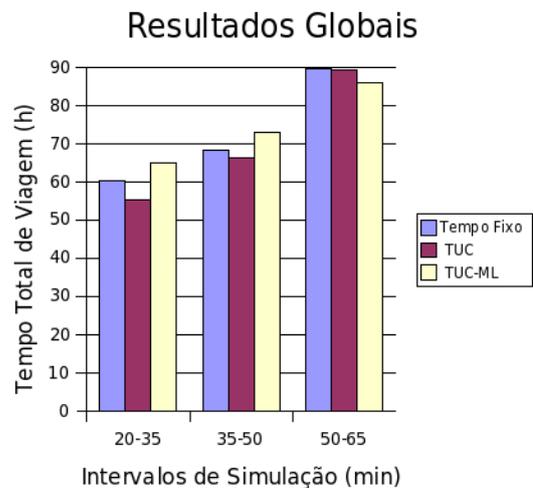


Figura E.29: Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Total de Viagem (h).

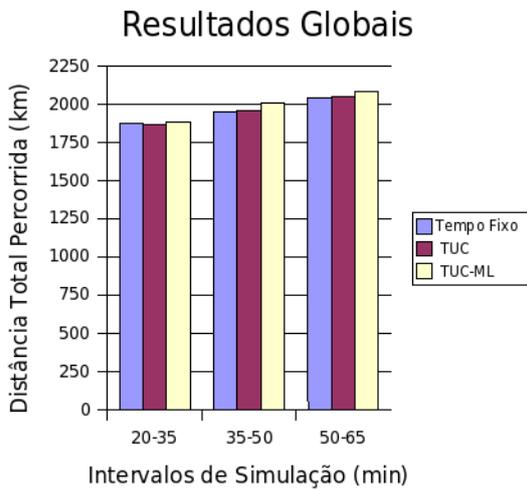


Figura E.30: Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Distância Total Percorrida (km).

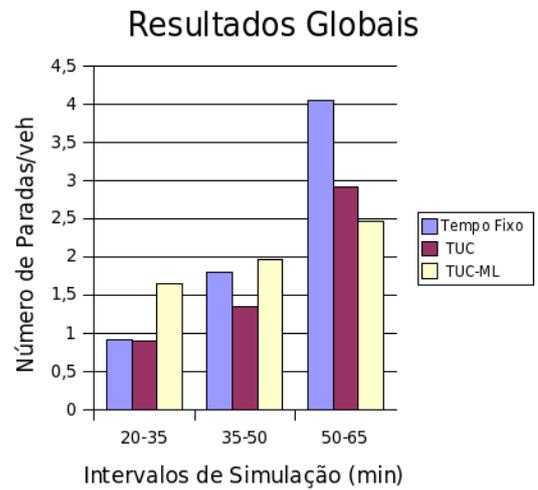


Figura E.31: Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas/veh.

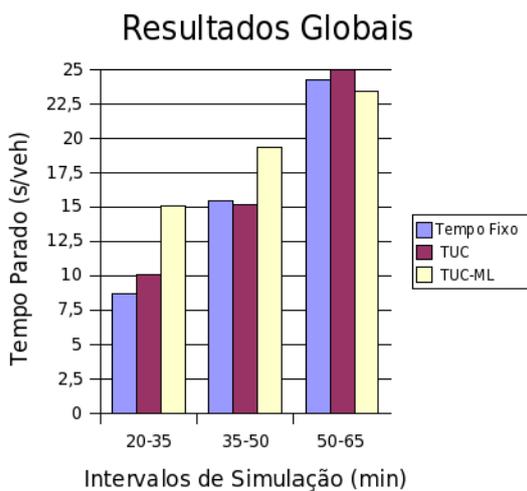


Figura E.32: Resultados globais do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s/veh).

E.4.2 Resultados da Arterial

Os resultados da via arterial aqui apresentados nas Figuras E.33-E.44, correspondem à Tabela 4.16 do Capítulo 4.

Resultados da Arterial Sentido O-L

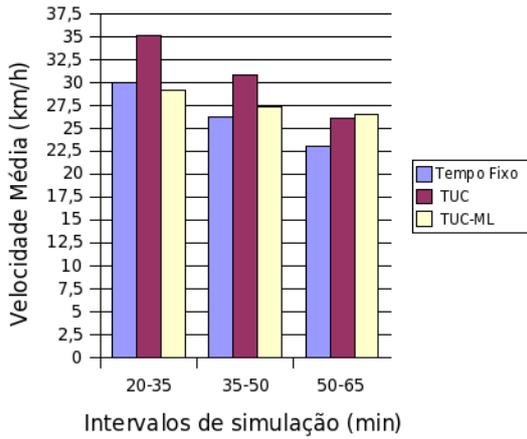


Figura E.33: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).

Resultados da Arterial Sentido O-L

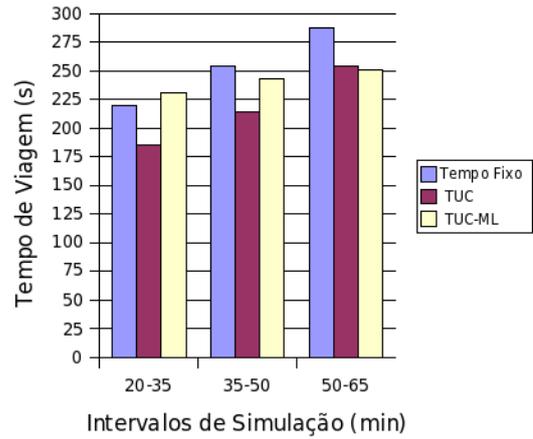


Figura E.34: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).

Resultados da Arterial Sentido O-L

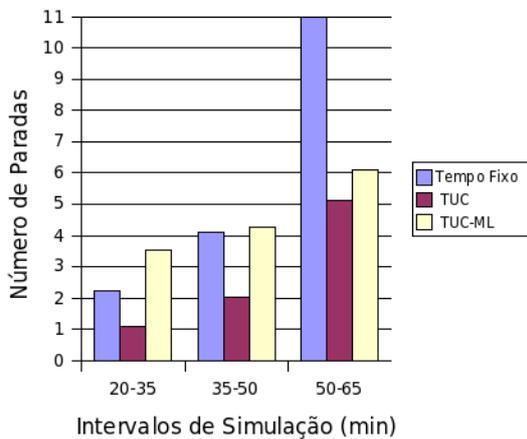


Figura E.35: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.

Resultados da Arterial Sentido O-L

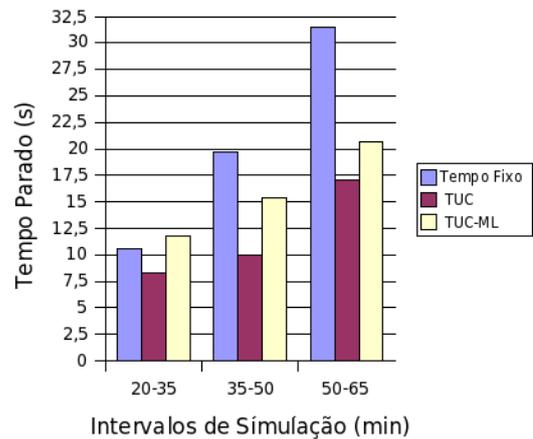


Figura E.36: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).

Resultados da Arterial Sentido L-O

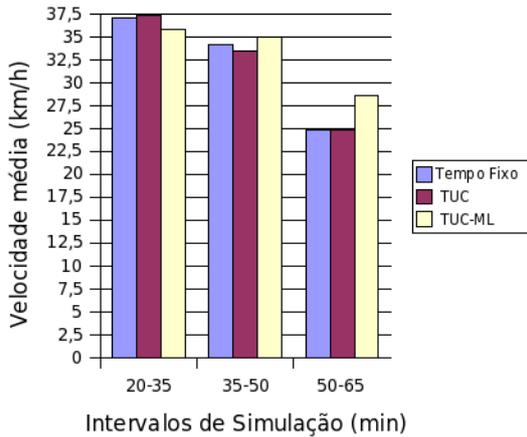


Figura E.37: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).

Resultados da Arterial Sentido L-O

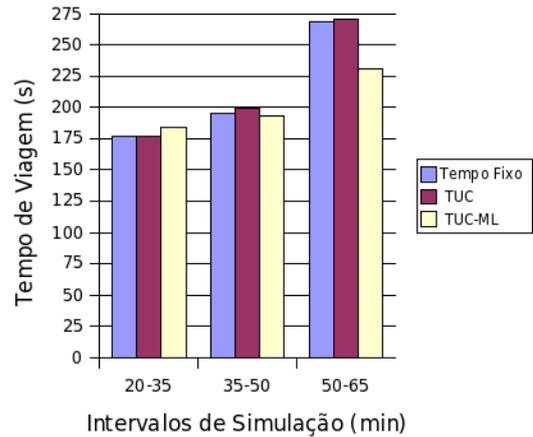


Figura E.38: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).

Resultados da Arterial Sentido L-O

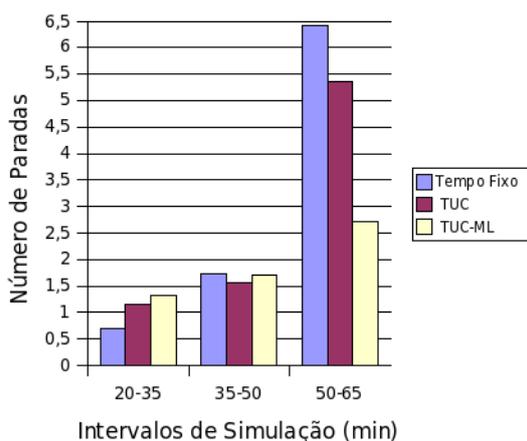


Figura E.39: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.

Resultados da Arterial Sentido L-O

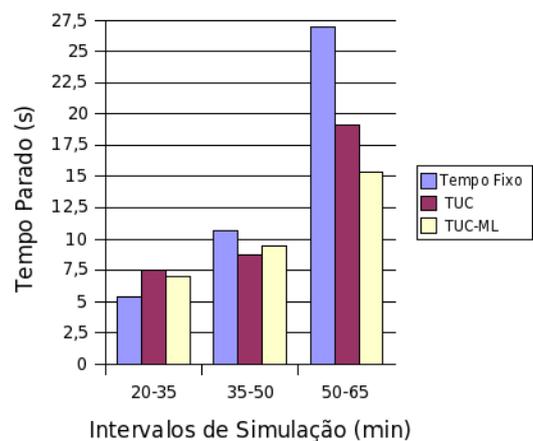


Figura E.40: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).

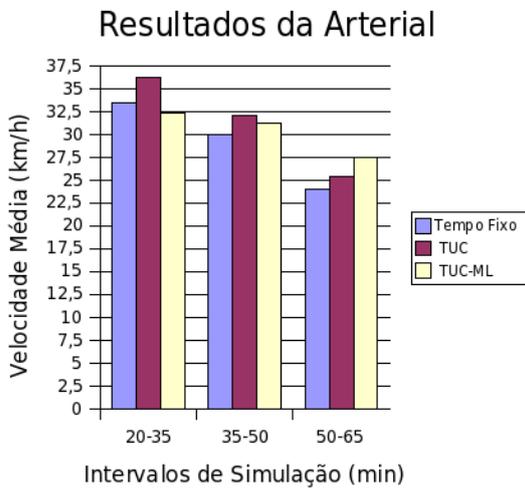


Figura E.41: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Velocidade Média (km/h).

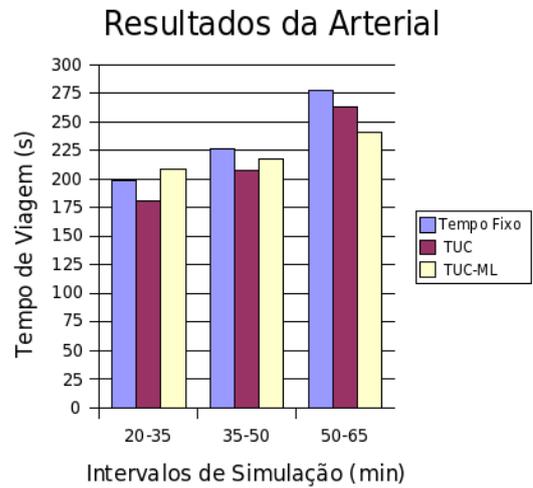


Figura E.42: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Tempo de Viagem (s).

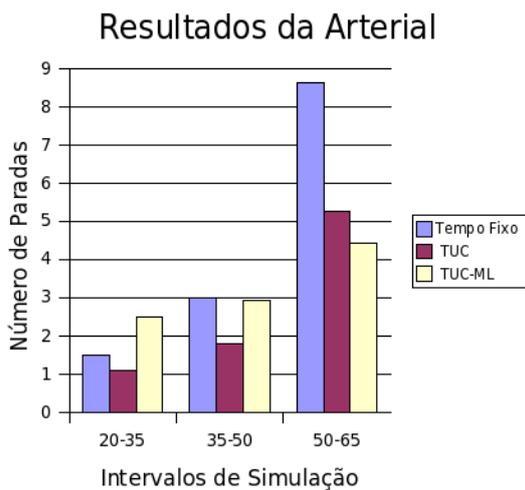


Figura E.43: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Número de Paradas.

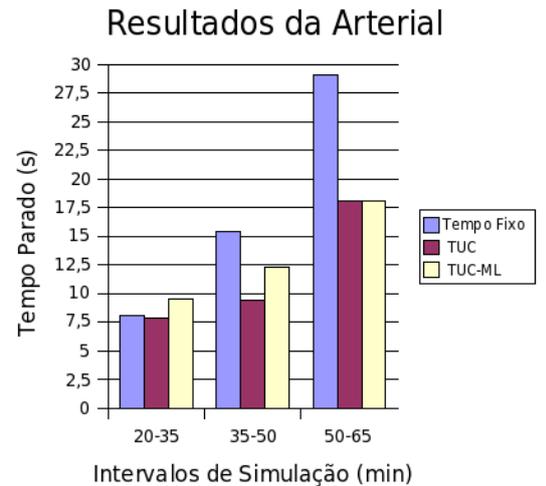


Figura E.44: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 4 - Tempo Parado (s).

E.5 Conjunto de Simulações 5

Esta seção apresenta os gráficos dos resultados obtidos no Conjunto de Simulações 5, tanto os resultados globais como os resultados na via arterial.

E.5.1 Resultados Globais

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.45-E.49, correspondem às Tabela 4.19 e 4.21 do Capítulo 4.

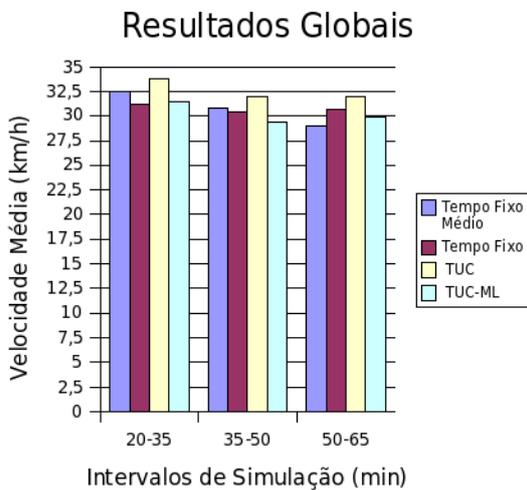


Figura E.45: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).

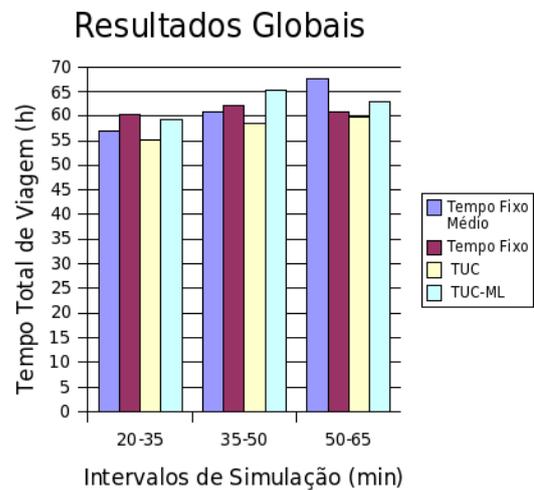


Figura E.46: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Total de Viagem (h).

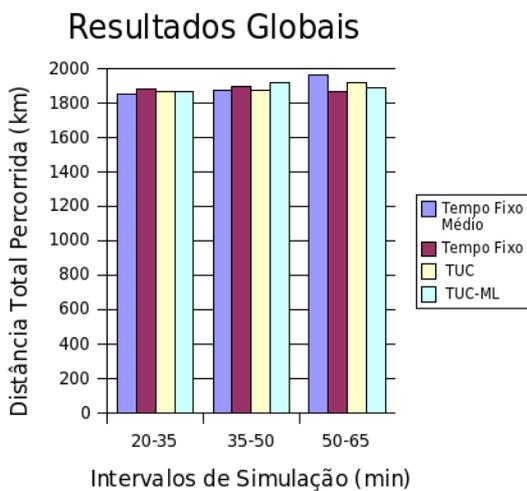


Figura E.47: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Distância Total Percorrida (km).

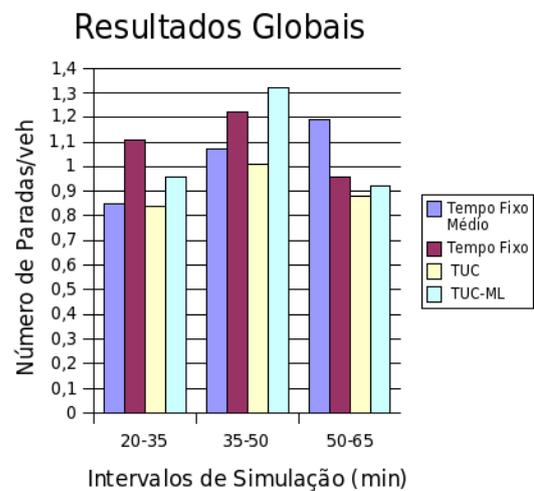


Figura E.48: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas/veh.

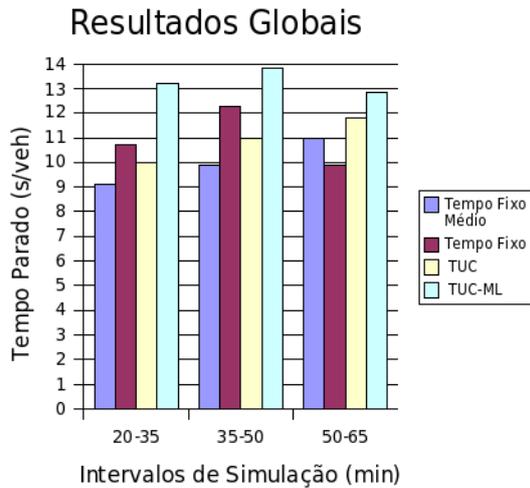


Figura E.49: Resultados globais do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s/veh).

E.5.2 Resultados da Arterial

Os resultados globais aqui apresentados nas Figuras E.50-E.61, correspondem às Tabela 4.20 e 4.22 do Capítulo 4.

Resultados da Arterial Sentido O-L

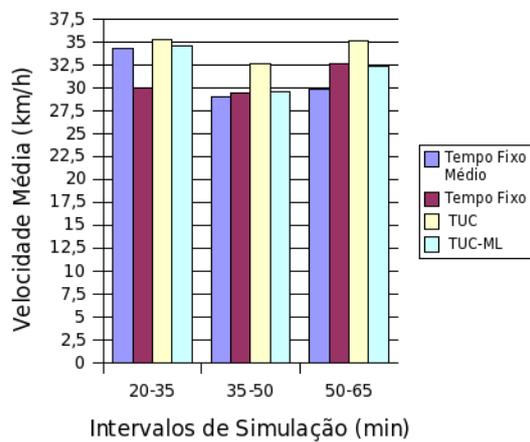


Figura E.50: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).

Resultados da Arterial Sentido O-L

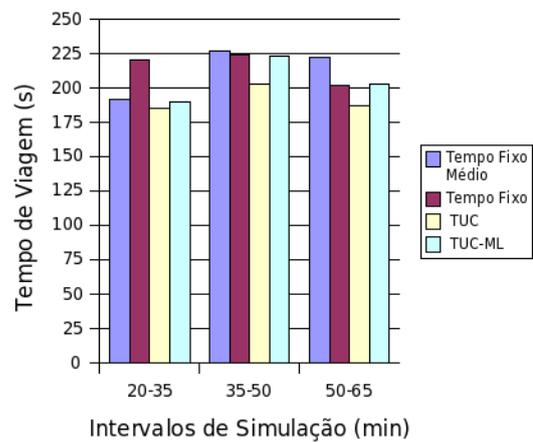


Figura E.51: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).

Resultados da Arterial Sentido O-L

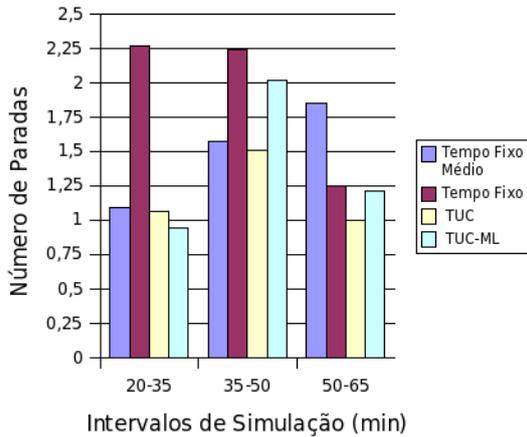


Figura E.52: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.

Resultados da Arterial Sentido O-L

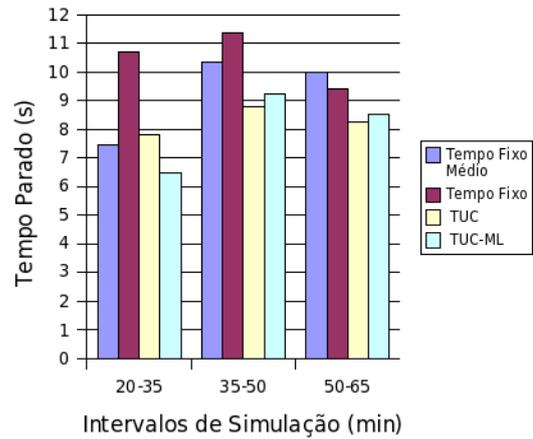


Figura E.53: Resultados da arterial sentido O-L do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).

Resultados da Arterial Sentido L-O

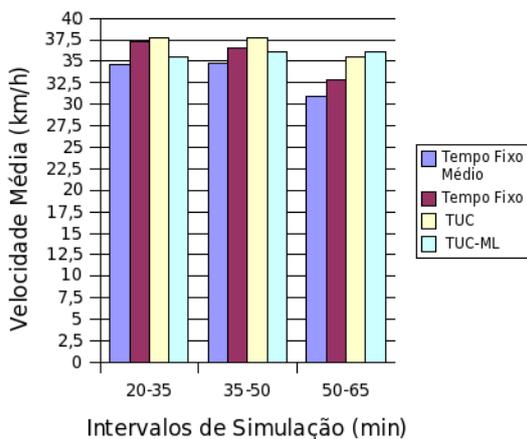


Figura E.54: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).

Resultados da Arterial Sentido L-O

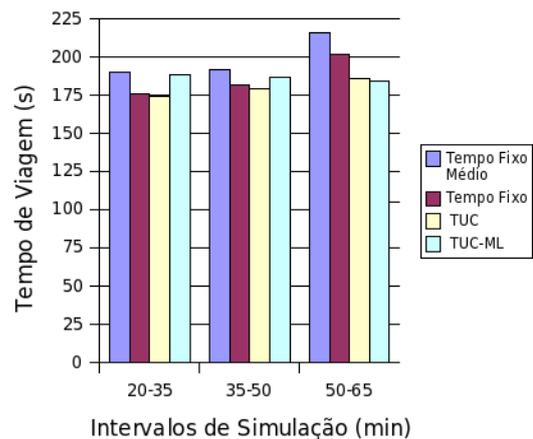


Figura E.55: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).

Resultados da Arterial Sentido L-O

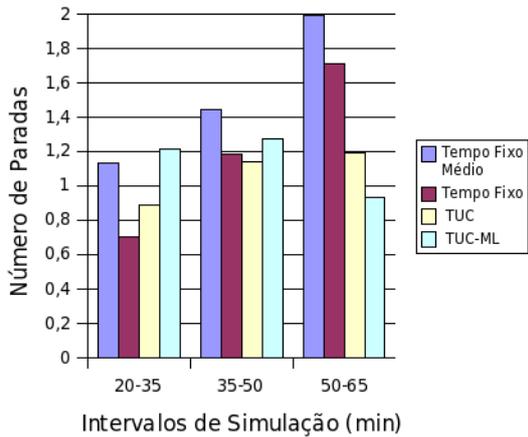


Figura E.56: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.

Resultados da Arteria Sentido L-O

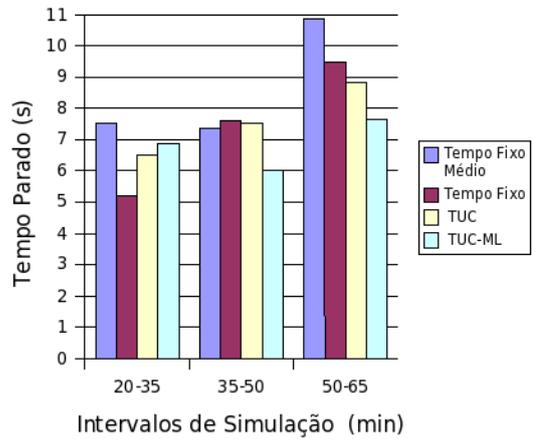


Figura E.57: Resultados da arterial sentido L-O do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).

Resultados da Arterial

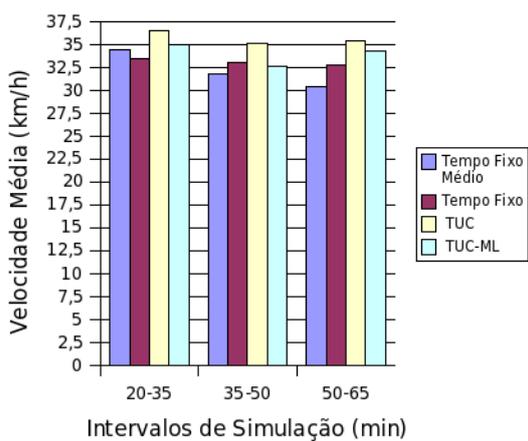


Figura E.58: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Velocidade Média (km/h).

Resultados da Arterial

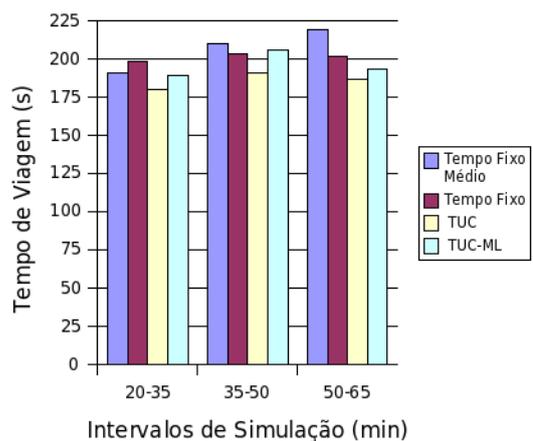


Figura E.59: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Tempo de Viagem (s).

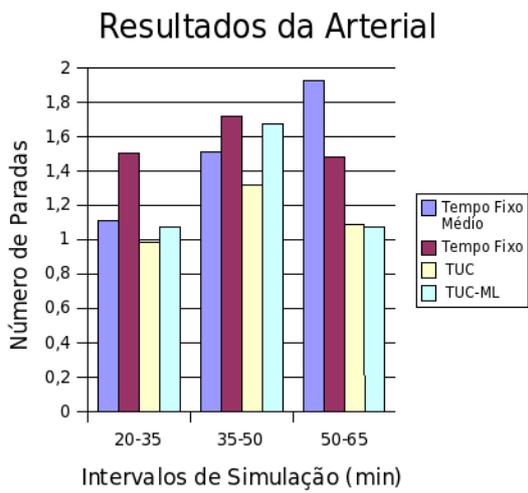


Figura E.60: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Número de Paradas.

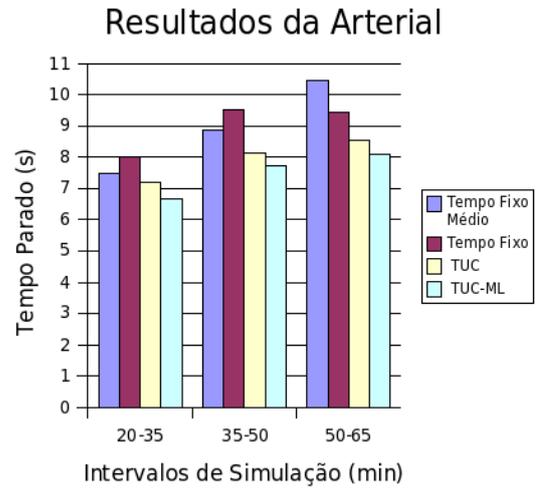


Figura E.61: Resultados da arterial em ambos os sentidos do Conjunto de Simulações 5 - Tempo Parado (s).

Referências Bibliográficas

- [1] C. Bielefeldt, Diakaki C., and M. Papageorgiou. TUC and the SMART NETS project. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pages 55–60, 2001.
- [2] F. Boillot, J. M. Blossville, J. B. Lesort, V. Motyka, M. Papageorgiou, and S. Sellam. Optimal signal control of urban traffic networks. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, pages 75–79. IEEE, 1992.
- [3] F. Boillot, S. Midenet, and J. C. Pierrelée. Real-life CRONOS evaluation. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Road Transport Information and Control*, pages 182–186, London, 2000. IEEE.
- [4] E. C-P. Chang, S. L. Cohen, C. Liu, N. A. Chaudhary, and C. Messer. MAXBAND-86: Program for optimizing left-turn phase sequence in multiarterial closed networks. *Transportation Research Record*, 1181:61–67, 1988.
- [5] S. L. Cohen. Concurrent use of MAXBAND and TRANSYT signal timing programs for arterial signal optimization. *Transportation Research Record*, 906:81–84, 1982.
- [6] M. R. Crabtree, R. A. Vincent, and S. Harrison. *APPLICATION GUIDE 28 - TRANSYT/10 USER GUIDE*. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1996.
- [7] P. Dell’Olmo and P. B. Mirchandi. REALBAND: An approach for real-time coordination of traffic flows on networks. *Transportation Research Record*, 1494:106–116, 1995.
- [8] DENATRAN. *Serviços de Engenharia: Manual de semáforos*. Ministério da Justiça. Conselho Nacional de Trânsito. Departamento Nacional de Trânsito, Brasília, 1979.
- [9] C. Diakaki. *Integrated control of traffic flow in corridor networks*. PhD thesis, Department of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1999.
- [10] C. M. Diakaki, M. Papageorgiou, and Aboudolas. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice*, 10:183–195, 2002.

- [11] C. M. Diakaki, Dinopoulou V., K. Aboudolas, M. Papageorgiou, E. Ben-Shabat, E. Seider, and A. Leibov. Extensions and new applications of the traffic signal control strategy TUC. *Transportation Research Record*, 1856:202–216, 2003.
- [12] P. Dorato, C. Abdallah, and V. Cerone. *Linear-Quadratic Control: An introduction*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1995.
- [13] C. B. Dutra and S. H. Demarchi. Coordenação semafórica através do método de maximização da banda verde. In *Anais do XVIII Congresso da ANPET*, pages 503–514, Florianópolis, SC, 2004. ANPET.
- [14] C. B. Dutra and S. H. Demarchi. SBAND: Implementação em planilha eletrônica de um método para maximização da banda verde em vias semaforizadas. In *Anais do XVIII Congresso da ANPET*, pages 69–76, Florianópolis, SC, 2004. ANPET.
- [15] J. L. Farges, L. Khoudour, and J. B. Lesort. PRODYN: On site evaluation. In *Proceedings of the 3rd IEE Conference on Road Traffic Control*, pages 62–66, London, 1990. IEEE.
- [16] R. M. Garbacz. Adaptive signal control: What to expect. Disponível em: <<http://209.68.41.108/itslib/AB02H473.pdf>>. Acesso em: março 2005, Publicado em 2003.
- [17] N. H. Gartner. Development and testing of a demand-responsive strategy for traffic signal control. In *Proceedings of the 1982 American Control Conference*, pages 578–583, 1982.
- [18] N. H. Gartner. OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. *Transportation Research Record*, 906:75–81, 1983.
- [19] N. H. Gartner, S. F. Assman, F. Lasaga, and D. L. Hou. MULTIBAND - a variable-bandwidth arterial progression scheme. *Transportation Research Record*, 1287:212–222, 1990.
- [20] N. H. Gartner, J. D. C. Little, and H. Gabbay. Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming part I: The network coordination problem. *Transportation Science* 9, pages 321–343, november 1975.
- [21] N. H. Gartner, J. D. C. Little, and H. Gabbay. Optimization of traffic signal settings by mixed-integer linear programming part II: The network synchronization problem. *Transportation Science* 9, pages 344–363, november 1975.
- [22] N. H. Gartner, F. J. Pooran, and C. M Andrews. Implementation of the OPAC adaptive strategy in a traffic signal network. In *the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pages 195–200, Oakland, 2001. IEEE.

- [23] N. H. Gartner, P. J. Tarnoff, and C. M. Andrews. Evaluation of optimized policies for adaptive control strategy. *Transportation Research Record*, 1324:105–114, 1991.
- [24] D. L. Gerlough and M. J. Huber. Traffic flow theory: a monograph. Special Report 195, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1975.
- [25] K. L. Head, P. B. Mirchandani, and S. Shelby. The RHODES prototype: a description and some results. In *77th Transportation Research Board Annual Meeting*, pages 1–12, Tucson, 1998.
- [26] M. Hisai. *Transportation and Traffic Theory*, chapter Delay-Minimizing Control and Bandwidth-Maximizing Control of Coordinated Traffic Signals by Dynamic Programming, pages 301–318. (N. H. Gartner and N. H. M. Wilson, eds.) Elsevier, New York, 1987.
- [27] P. B. Hunt, D. I. Robertson, R. D. Bretherton, and M. C. Royle. The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique. *Traffic Engineering and Control*, 23:190–199, 1982.
- [28] P. P. Jovanis and J. A. Gregor. Coordination of actuated arterial traffic signal systems. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 112(4):416–432, 1986.
- [29] J. L. Kuester and J. H. Mize. *Optimization Techniques with Fortran*. McGraw-Hill Book Company, 1973.
- [30] J. D. C. Little. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming. *Operations Research*, 14:568–594, 1966.
- [31] J. D. C. Little, M. D. Kelson, and N. H. Gartner. MAXBAND: A program for setting signals on arteries and triangular networks. *Transportation Research Record*, 795:40–46, 1981.
- [32] J. D. C. Little, B. V. Martin, and J. T. Morgan. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth. *Highway Research Record*, 118:21–47, 1966.
- [33] P. R. Lowrie. The Sydney co-ordinated adaptive traffic system - principles, methodology algorithms. In *Proceedings of the IEE international conference on road traffic signalling*, pages 67–70, London, 1982.
- [34] L. Magne, S. Rabut, and J. F. Gabard. Towards an hybrid macro-micro traffic flow simulation model. In *INFORMS Spring 2000 Conference*, Salt Lake City, Utah, U. S. A., 2000.
- [35] J. T. Morgan and J. D. C. Little. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth. *Operations Research*, 14:568–594, 1964.

- [36] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, and Y. Wang. Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12):2043–2067, December 2003.
- [37] I. Porche and S. Lafortune. Adaptive look-ahead optimization of traffic signals. Disponível em: <<http://www.engin.umich.edu/itsa/ajournal/ajournal.ps>>. acesso em: março 2005, Ann Arbor: The University of Michigan, 1997. 32 p.
- [38] I. Porche and S. Lafortune. Dynamic traffic control: decentralized and coordinated methods. In *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 930–935, Boston, 1997. IEEE.
- [39] I. Porche and S. Lafortune. Coordination of local adaptive traffic signal controllers. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 1833–1837, Philadelphia, 1998. AACC.
- [40] I. Porche, M. Sampath, R. Sengputa, Y.-L. Chen, and S. Lafortune. A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signal. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications*, pages 582–589, Dearborn, 1996. IEEE.
- [41] D. I. Robertson and R. D. Bretherton. Optimizing networks of traffic signals in real time - the SCOOT method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(1):11–15, 1991.
- [42] SODIT. *Manuel Utilisateur: Logiciel SITRA*. Société pour le Développement de l'Innovation dans les Transports, Toulouse, FR, mars edition, 2002.
- [43] K. Tavlidakis and N. C. Voulgaris. Development of an autonomous adaptive traffic control system. In *ESIT'99 - The European Symposium on Intelligent Techniques*, 1999.
- [44] F. V. Webster. Traffic signal settings. Road research technical paper no. 39, Department of Scientific and Industrial Research. Road Research Laboratory, London, UK, 1969.