



COPPE/UFRJ

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DAS DEFASAGENS DE CORREDORES ARTERIAIS

Luiz Carlos Ferreira Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Rio de Janeiro
Setembro/2010

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DAS DEFASAGENS DE CORREDORES ARTERIAIS

Luiz Carlos Ferreira Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.

Prof. Licinio da Silva Portugal, D.Sc.

Prof. Paulo César Marques da Silva, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2010

Lopes, Luiz Carlos Ferreira

Método de Otimização das Defasagens de Corredores Arteriais / Luiz Carlos Ferreira Lopes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIV, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 131-140.

1. Sincronismo de Corredores de Tráfego. 2. Gerenciamento de Tráfego. Ribeiro, Paulo Cezar Martins. I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

DEDICATÓRIA

A meus pais,
por tudo,
principalmente,
minha mãe

AGRADECIMENTOS

A Luiza, minha filha.

Ao meu professor orientador Paulo Cezar Martins Ribeiro, pela orientação e incentivo.

Ao Professores do PET, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do PET, atenciosos indiscriminadamente, fizeram nossa passagem pelo Programa mais fácil. Em especial, Dona Helena, Jane e Reinaldo.

Aos meus colegas da CET-RIO, em especial Maurício Fernandes Bargut, Henrique Torres e Rodolfo Barbosa Moreira, pela amizade, incentivo, contribuição, opinião e por me auxiliar sempre que precisei.

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

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DAS DEFASAGENS DE CORREDORES ARTERIAIS

Luiz Carlos Ferreira Lopes

Setembro/2010

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O interesse de melhorar a circulação do tráfego, devido aos problemas de ausência de sincronismo nos corredores de tráfego é de grande importância, dada a quantidade de externalidades que provocam. A movimentação adequada dos veículos, de forma contínua e coordenada, permitiria reduzir o tempo de viagem e a quantidade de paradas, evitando, desta forma, bloqueios de cruzamentos e congestionamentos. O objetivo desta pesquisa é apresentar um método computacional para otimização das defasagens de corredores arteriais, com a intenção de melhorar a fluidez das correntes de tráfego, refletindo em um aumento da velocidade média e redução dos gastos de combustível, além de promover a segurança e possibilitar um maior conforto aos usuários do sistema viário.

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

OPTIMIZATION METHOD OF OFFSETS CORRIDORS ARTERIES

Luiz Carlos Ferreira Lopes

September/2010

Advisor: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Department: Transport Engineering

The interest on improving traffic circulation, due to problems of timing in the absence of transport corridors, has a great importance due to the amount of externalities they cause. The proper handling of vehicles in a continuous and coordinated movement would reduce travel time and number of stops, thus avoiding blocking intersections and congestion. The objective of this research is to present a computational method to optimize the offsets of arterial corridors, with the intention of improving the traffic flows, resulting in an increase in the average speed and reduce fuel costs, and promote security and enable a greater comfort for road users.

ÍNDICE

I	INTRODUÇÃO	1
I.1	Considerações Iniciais	1
I.2	Objetivo e Justificativa	2
I.3	Estrutura do Trabalho	3
II	CONTROLE SEMAFÓRICO	5
II.1	Considerações Iniciais	5
II.2	Considerações Sobre Semáforos	6
II.2.1	Histórico	7
II.2.2	Importância	8
II.2.3	Conceitos Básicos	9
II.2.4	Equipamentos Semafóricos	10
II.2.5	Arranjo Físico	12
II.2.6	Plano de Sinalização Semafórica	13
II.3	Controle Coordenado em Interseções Semaforizadas	14
II.3.1	Controle Isolado	15
II.3.2	Controle Coordenado	17
II.3.3	Controle Centralizado	19
II.4	Medidas de Desempenho de Interseções Controladas	24
II.5	Sistemas de Controle de Tráfego	26
II.6	Considerações Finais	27
III	COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA	28
III.1	Considerações Iniciais	28
III.2	Evolução dos Critérios	29
III.2.1	Sistema Simultâneo	29
III.2.2	Sistema Alternado	29
III.2.3	Sistema Progressivo (“Onda Verde”)	30
III.3	Técnicas de Coordenação	31
III.4	Métodos de Maximização da Banda Verde	34
III.4.1	Definições Básicas	35

III.4.2	Procedimento Convencional	37
III.4.3	Diagrama Espaço - Tempo	38
III.4.4	<i>Half-Integer Synchronization</i>	40
III.4.5	Interferência de BOOKS/BLEYL	43
III.4.6	<i>PASSER-Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine</i>	44
III.4.7	MAXBAND - <i>Maximal Bandwidth Program</i>	46
III.4.8	MULTIBAND - <i>Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme</i>	49
III.5	Métodos de Minimização de Atrasos e Paradas	50
III.5.1	COMBINATION	51
III.5.2	TRANSYT - <i>Traffic Network Study Tool</i>	51
III.5.3	MITROP - <i>Mixed-Integer Traffic Optimization Program</i>	56
III.5.4	INTEGRATION	57
III.5.5	SCOOT (<i>Split Cycle and Offset Optimisation Technique</i>)	60
III.5.6	SIRI	61
III.6	Métodos Combinados	65
III.6.1	PASSER II / TRANSYT 6	66
III.6.2	MAXBAND / TRANSYT-7F (versão 8)	66
III.6.3	TEAPAC	67
III.6.4	COMBAND (MAXBAND / MITROP)	70
III.6.5	TSIS – NETSIM	71
III.7	Resumo dos Métodos Computacionais para Coordenação Semafórica	74
III.8	Considerações Finais	76
IV	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	77
IV.1	Introdução	77
IV.2	Essência do Método Proposto	78
IV.3	Método Analítico para Determinar o Tempo Padrão de Progressão	80
IV.4	Maximização da Banda Verde em Corredores Semaforizados	81
IV.5	Método Proposto para Maximizar Larguras de Bandas	83
IV.5.1	Cálculo da Máxima Largura para Bandas Iguais em Ambos Sentidos	86
IV.5.2	Determinação da Interseção Crítica	89
IV.5.3	Determinação de Bandas Distintas	89
IV.6	Sincronização Semafórica Utilizando o Método Proposto	92

IV.6.1	Defasagens para Larguras de Bandas Iguais em Ambos os Sentidos	92
IV.6.2	Cálculo da Defasagem de Programação	94
IV.7	Diagrama Espaço-Tempo	95
IV.8	Método Proposto	96
IV.9	Considerações Finais	102
V	ESTUDO DE CASO	104
V.1	Considerações Iniciais	104
V.2	Escolha da Área de Estudo	104
V.3	Levantamento das Características Físicas e Operacionais	108
V.4	Aplicação do Método na Área de Estudo	110
V.4.1	Otimização da Área de Estudo Através do Método Proposto	111
V.4.2	Avaliação dos Resultados Obtidos pelo Método	116
V.5	Avaliação do Método Proposto	119
V.5.1	Codificação da Rede Viária	120
V.5.2	Simulação da Área em Estudo	124
V.6	Avaliação do Método Proposto Através do TSIS-NETSIM	125
V.7	Considerações Finais	126
VI	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	128
VI.1	Considerações Iniciais	128
VI.2	Conclusão	128
VI.3	Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1	Instalação Típica Recomendada pela CET SP	13
Figura II.2	Arquitetura do Sistema Centralizado em Tempo Real	22
Figura II.3	Ilustração da Medida de Atraso	26
Figura III.1	Situação Desejada Para Coordenação Entre Interseções	31
Figura III.2	Diagrama Espaço x Tempo	33
Figura III.3	Variáveis Utilizadas no Método de Maximização da Banda Verde	36
Figura III.4	Diagrama Espaço-Tempo de um Corredor Viário Hipotético	39
Figura III.5	Possíveis Posições dos Centros dos Vermelhos	41
Figura III.6	Quatro Padrões para Fases de Conversão à Esquerda	45
Figura III.7	Representação Gráfica das Variáveis Envolvidas no Modelo	48
Figura III.8	Modelo TRANSYT	52
Figura III.9	Exemplo de um Perfil Cíclico de Tráfego	53
Figura III.10	Modelagem do Comportamento do Tráfego no TRANSYT	54
Figura III.11	Tela Principal do SIRI	63
Figura III.12	Fluxograma do TEAPAC	70
Figura IV.1	Diagrama de Banda Verde Típico com Faixas Bidirecionais	84
Figura IV.2	Diagrama Espaço-Tempo para uma Arterial com Bandas Iguais Máximas em ambos Sentidos	87
Figura IV.3	Diagrama Espaço-Tempo para uma Arterial com Bandas Máximas Desiguais	91
Figura IV.4	Diagrama de Bandas com Faixas Verdes Bidirecionais para os Sentidos $i-j$ e $j-i$	95
Figura IV.5	Tela Inicial do Método para Entrada dos Dados	97
Figura IV.6	Tela do Método para Cálculo da Banda e Interseção Crítica	98
Figura IV.7	Tela do Método para Cálculo da Defasagem	99
Figura IV.8	Diagrama elaborado pelo Método para o Exemplo Hipotético	100
Figura IV.9	Fluxograma do Método Proposto	101
Figura V.1	Identificação das Principais Vias da Área de Estudo	106
Figura V.2	Localização Espacial da Auto Estrada Lagoa-Barra	106
Figura V.3	Trânsito nas Imediações da Praça Sibelius-Pico Manhã:7 às 10hs	107
Figura V.4	Base Digitalizada do Corredor Sibelius	108

Figura V.5	Localização dos Semáforos e das Câmeras da Área em Estudo	109
Figura V.6	Desenho da Configuração Viária do Corredor Sibelius	111
Figura V.7	Entrada dos Dados no Método	112
Figura V.8	Cálculo da Banda e Interseção Crítica	112
Figura V.9	Defasagens de Programação (Otimizadas)	113
Figura V.10	Diagrama de Onda Verde Otimizado	113
Figura V.11	Tela de Entrada dos Dados do Método - Situação Atual	114
Figura V.12	Diagrama de Onda Verde da Situação Atual	115
Figura V.13	Configuração Viária Montada sobre Imagem do Corredor	121
Figura V.14	Estrutura de Nós e <i>Links</i> no TSIS-NETSIM	121
Figura V.15	Janela de Entrada dos Dados dos Nós	122
Figura V.16	Janela de Entrada dos Dados dos <i>Links</i>	122
Figura V.17	Janela de Entrada dos Dados dos Semáforos	123
Figura V.18	Visualização do Corredor e das Rotas de Ônibus	123
Figura V.19	Composição de Nós de uma Interseção: Av. Mário Ribeiro x Av. Visconde de Albuquerque	124
Figura V.20	Visualização da Animação da Simulação	124

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico V.1	Variação do Tráfego ao Longo do Dia	105
Gráfico V.2	Representação Gráfica dos Resultados	127

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1	Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Sistemas de Controle	23
Tabela III.1	Síntese dos Métodos Computacionais de Coordenação Semafórica	74
Tabela V.1	Resumo dos Volumes de Tráfego	105
Tabela V.2	Resumo das Defasagens	116
Tabela V.3	Pesquisa Velocidade/ Retardamento – Situação Atual – Sentido: Barra da Tijuca - Centro	117
Tabela V.4	Pesquisa Velocidade/ Retardamento – Situação Proposta (Otimizada) – Sentido: Barra da Tijuca - Centro	117
Tabela V.5	Pesquisa Velocidade/ Retardamento – Situação Atual – Sentido: Centro - Barra da Tijuca	118
Tabela V.6	Pesquisa de Velocidade/ Retardamento – Situação Proposta (Otimizada) – Sentido: Centro - Barra da Tijuca	118
Tabela V.7	Resultados Obtidos pelo Método Proposto	118
Tabela V.8	Tempos de Percurso e Velocidade Média – TSIS-NETSIM	125
Tabela V.9	Resumo dos Resultados	126

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1. Considerações Iniciais

Diariamente ocorrem congestionamentos do tráfego na maioria das cidades brasileiras de médio e grande porte, notadamente nas regiões metropolitanas, e também nas cidades menores, causando impacto na distribuição do tráfego, na frequência das viagens, no comportamento dos motoristas, na segurança, no uso do solo e na economia, implicando em prejuízos significativos à sociedade (DUTRA, 2005).

Esses impactos são percebidos pelos usuários no aumento do seu tempo de deslocamento e na conseqüente diminuição da sua velocidade média de percurso. Atualmente nas grandes cidades o tempo perdido em congestionamentos e os impactos do tráfego de passagem em zonas residenciais causam degradação considerável na qualidade de vida dos cidadãos que aí residem, o que exige por parte dos órgãos gestores do trânsito providências cada vez mais ágeis e precisas.

O interesse em analisar os impactos causados pelos congestionamentos é de grande importância, dada a quantidade de externalidades que provocam. O aumento contínuo do número de automóveis particulares trafegando nas grandes cidades tem trazido vários problemas para os planejadores de transportes, pois a incapacidade física de se construir mais acessos começa a ser evidenciada, causando com isso grandes transtornos para a sociedade. A preocupação com este crescimento desordenado não é recente e nem é concentrada em um determinado local ou país. Mundialmente, tem-se analisado várias alternativas para alcançar um uso mais racional do espaço viário, proporcionando à população melhorias sociais, econômicas, ambientais e de segurança (POYARES, 2000).

Políticas de redução de congestionamentos podem ser grandes aliadas na melhoria operacional do uso das vias, uma vez que em sua maioria, são medidas voltadas à mobilidade e acessibilidade dos sistemas de transportes. No entanto, devido à constância de ocorrência dos congestionamentos viários nos últimos tempos,

SCHRANK e LOMAX (2005) consideram a possibilidade de não mais pensar em reduzir os níveis de congestionamento, mas apenas impedi-los de aumentar.

Uma das formas de melhorar a fluidez do trânsito, beneficiando a mobilidade de pessoas e dos veículos, pode ser feita através da coordenação dos semáforos, cujo objetivo é manter o tráfego em movimento organizado em pelotões. O gerenciamento adequado torna-se muitas vezes mais importante do que algumas intervenções físicas, pois sua qualidade pode melhorar o nível de serviço oferecido nas vias, evitando que sejam necessários investimentos significativos dos órgãos responsáveis, principalmente em obras de adequações de geometria e ampliações das vias.

Portanto, otimizar corredores de tráfego semaforizados significa melhorar a circulação das redes viárias, manter níveis de fluidez aceitáveis, reduzir o tempo de viagem, diminuir os custos do sistema de transporte, gerar menos poluição, e, conseqüentemente, ofertar um trânsito mais dinâmico para a população. Desta forma, projetos que visem à melhoria da circulação nas áreas urbanas tornam-se essenciais para o desenvolvimento das cidades.

I.2. Objetivo e Justificativa

O objetivo desta pesquisa é apresentar um método computacional para otimização das defasagens de corredores arteriais, com a intenção de reduzir os tempos de viagem e números de paradas dos veículos, mantendo níveis aceitáveis de fluidez do tráfego, refletindo um aumento da velocidade média do sistema e uma redução dos gastos de combustível, além de promover a segurança e de possibilitar um maior conforto aos usuários da via.

Vários países já desenvolveram estudos sobre a sincronização de semáforos, comprovando sua importância e eficiência. Contudo, esses trabalhos envolvem aplicações aos casos de seus respectivos países de origem. Poucos trabalhos brasileiros são apresentados na bibliografia da área, por isso é importante desenvolver estudos e modelos considerando as particularidades do tráfego regional brasileiro. Essa é justamente a proposta apresentada neste trabalho, a partir dos modelos já testados em outros países, apresentar e testar um método para otimização das defasagens de

corredores arteriais adequado à realidade brasileira, especificamente ao tráfego do Rio de Janeiro.

Um estudo de caso foi realizado em uma área da zona sul do Rio de Janeiro, denominada corredor Sibelius, para aplicação do método proposto. Ao final, os resultados foram avaliados, através de pesquisas de campo e pelo software TSIS-NETSIM (FHWA, 2001), antes e depois da implantação.

I.3. Estrutura do Trabalho

A dissertação será estruturada em seis capítulos, o Capítulo I, introdutório, tem por finalidade contextualizar o tema da pesquisa, bem como descrever os objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sobre controle semafórico, onde são mostradas suas principais funções, vantagens e desvantagens, citando os parâmetros de justificativa para a implantação dos semáforos e equipamentos disponíveis. Também aborda critérios para definição do melhor tipo de estratégia a ser adotada na operação de sistemas de semáforos, assim como os conceitos básicos.

No Capítulo III é feita uma revisão dos principais modelos e programas de coordenação semafórica desenvolvidos, desde os antigos esquemas manuais e de cálculo até os *softwares* atuais, e que servirão de base para desenvolvimento de um método simplificado. São apresentadas considerações mais detalhadas sobre o simulador TSIS-NETSIM, utilizado na pesquisa para avaliação do método apresentado, expondo suas principais funções, usos e características.

O Capítulo IV descreve em etapas a metodologia utilizada no desenvolvimento do método, esquematizando, estruturando e caracterizando suas fases, detalhando-as passo a passo.

No Capítulo V, o método proposto é aplicado em um estudo de caso. Foi demonstrada a utilização do mesmo em uma área da cidade do Rio de Janeiro, assim como o levantamento dos dados de entrada necessários. As simulações realizadas para testar a eficiência do método foram feitas utilizando o programa TSIS-NETSIM, como

ferramenta para comparação das medidas de eficiência, antes e depois da implantação do sincronismo proposto pelo método, e também como alvo de avaliação, baseada na redução do tempo de viagem e no número de paradas.

No Capítulo VI, são descritas as considerações finais em relação ao exposto, algumas conclusões assim como recomendações.

Após toda a pesquisa realizada, descrevem-se as bibliografias pesquisadas e utilizadas para elaboração desta Dissertação de Mestrado.

CAPÍTULO II

CONTROLE SEMAFÓRICO

II.1. Considerações Iniciais

O interesse em analisar os impactos causados pelos congestionamentos é de grande importância, dada a quantidade de externalidades que provocam. O aumento contínuo do número de automóveis particulares trafegando nas grandes cidades tem trazido vários problemas para os responsáveis pelo planejamento dos sistemas de transportes, pois a incapacidade física de se construir mais acessos começa a ser evidenciada, causando com isso grandes transtornos para a sociedade. A preocupação com este crescimento desordenado não é recente e nem é concentrada em um determinado local ou país. Mundialmente, tem-se analisado várias alternativas para alcançar um uso mais racional do espaço viário, proporcionando à população melhorias sociais, econômicas, ambientais e de segurança (POYARES, 2000).

Segundo OLIVEIRA (1997), a eficiência do sistema viário urbano pode ser substancialmente melhorada através de uma adequada operação de suas interseções semaforizadas e o controle sobre o tráfego pode ser exercido através de dois tipos de abordagens, ou seja: operações em tempo fixo e operações em tempo real.

Interseções viárias semaforizadas são os pontos críticos das redes urbanas, pois limitam a capacidade da via e causam atrasos aos veículos. Semáforos mal instalados ou projetados tornam-se fontes de congestionamentos. Vários métodos de observações de campo e técnicas de modelagem computacionais têm sido utilizados e implementados para avaliar, em termos de filas e atrasos, o nível de congestionamento das interseções semaforizadas (SAITO *et al.*, 2001).

O *Federal Highway Administration* (FHWA, 2005), aponta que o gerenciamento dos tempos dos semáforos pode melhorar muito o seu desempenho, reduzindo os congestionamentos. Estima que 75% dos semáforos nos Estados Unidos poderiam ser mais eficientes e seguros pela substituição ou a reprogramação dos equipamentos. Também indica que a gestão adequada do sistema semaforico é uma forma de melhorar a fluidez e a segurança do trânsito, apresentando os seguintes benefícios:

- Redução dos congestionamentos;
- Redução da emissão de poluentes e do consumo de combustível;
- Redução do número de acidentes e da severidade dos mesmos;
- Mitigação do comportamento agressivo dos motoristas;
- Postergação ou eliminação da necessidade de construção de vias para aumento da capacidade;
- Ordenamento dos fluxos de tráfego;
- Aumento da capacidade da interseção;
- Melhoria no movimento contínuo do fluxo com a coordenação dos semáforos adjacentes;
- Interrupção do fluxo pesado na via principal para permitir que os fluxos de pedestres e veículos na via secundária possam cruzar;
- Diminuição das demoras dos veículos na via secundária;
- Previsibilidade do tempo de espera de pedestres e ciclistas.

As atividades que podem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho dos equipamentos existentes, segundo o FHWA (2005), são as seguintes:

- Remoção de semáforos desnecessários;
- Introdução de uma nova programação semafórica;
- Inclusão de fases de conversão protegidas, principalmente à esquerda; ou, se for o caso, proibir as conversões;
- Utilização de programas de computador para projetar e desenvolver os planos semafóricos;
- Instalação e manutenção do equipamento de maneira adequada;
- Coordenação de semáforos.

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos sobre semáforos e os seus controles, procurando traçar um amplo cenário para a elaboração da dissertação.

II.2. Considerações Sobre Semáforos

O semáforo é um dispositivo de controle de tráfego que, através de indicações luminosas transmitidas para motoristas e pedestres, alterna o direito de passagem. É

composta de focos luminosos afixados em grupos ao lado da via ou suspensos sobre ela, através de elementos de sustentação (postes). Existem dois tipos de semáforos, os veiculares e os de pedestres (DENATRAN, 1984).

II.2.1. Histórico

Com a expansão do uso do automóvel no início do século XX, começou a necessidade de se ordenar o tráfego no meio urbano. Procurando facilitar esta tarefa, um dos meios inventados para gerenciar os conflitos em interseções foi o sinal de tráfego luminoso. O primeiro semáforo surgiu no ano de 1868, na cidade de Westminster, Inglaterra, com a utilização de um dispositivo de braço com lâmpadas a gás vermelha e verde para uso noturno, porém WEBSTER e COBBE (1966) relatam a ocorrência de uma explosão no equipamento, culminando na estagnação de experimentos desta natureza por meio século. Desta forma, apenas em 1918 o primeiro semáforo com lâmpadas de três cores, operado manualmente, foi instalado em Nova York. (WEBSTER e COBBE, 1966).

Por volta de 1925 um modelo semelhante foi utilizado pela polícia de Piccadilly em Londres, Inglaterra. E já no ano seguinte, o primeiro semáforo operado automaticamente foi instalado na Grã Bretanha em Wolverhampton. Este semáforo foi importado dos americanos, que teriam aperfeiçoado o invento inglês. Esta geração era chamada pela sigla ATS (*Automatic Traffic Signals*) para diferenciá-los dos antigos semáforos manuais. Estes semáforos eram baseados num sistema de motor alimentado pela rede de corrente alternada (AC) que definia o ciclo das fases do controlador. Estes controladores eram chamados controladores baseados na fase, hoje conhecidos no Brasil como eletromecânicos e ainda utilizados. A limitação deste tipo de controlador é que ele opera apenas em tempos fixos (TRINDADE FILHO, 2002).

O desenvolvimento natural do método de controle de tráfego, e a exigência de uma maior flexibilidade no controle, caminharam da operação manual para o semáforo automático de tempos fixos (*fixed-time signals*), onde se definem períodos de “pare e siga” (*stop and go*) pré-determinados. Estes semáforos eram, e ainda são adequados, para as condições de tráfego simples, mas não se mostraram muito eficientes em interseções onde o volume de tráfego variava consideravelmente. Por isto, surgiram às programações de controle do tráfego, os chamados planos de tráfego. Cada plano pré-definido permite alterações nos tempos de verdes em períodos do dia, para adequar-se a

variabilidade do tráfego nos diferentes horários. Em algumas avenidas que possuíam um grande número de cruzamentos, estes semáforos foram interligados, de forma a se obter um período de verde para o avanço ao longo da via (onda verde). Desta forma, grupos de veículos, os chamados pelotões, tinham sua viagem não interrompida quando trafegavam em velocidade determinada, por uma série de interseções. Este foi o conceito básico para o desenvolvimento da coordenação semafórica.

No Reino Unido esta forma de controle em malha aberta (*open loop*), ou seja, sem realimentação de sensores, logo abriu caminho para o controle de tráfego com atuação veicular, com veículos sendo detectados por sensores pneumáticos. Porém, nesta época, nem todos os países seguiram por este caminho, em particular os Estados Unidos, que tenderam na direção dos sistemas de tempos fixos coordenados, com os semáforos adjacentes interligados. Esta interligação era particularmente conveniente para a malha viária norte-americana (CLOWES, 1986).

No entanto, o primeiro semáforo com controle veicular, que se teve notícia, foi fabricado nos Estados Unidos ainda nos anos 30. Utilizando contatos elétricos no caminho dos veículos, deu início ao princípio utilizado até recentemente em algumas rodovias do Brasil, a detecção com tubos pneumáticos. O ar deslocado em um tubo, pela passagem de um veículo sobre ele, é capaz de ativar os contatos elétricos do sistema colocado à margem da via (WEBSTER e COBBE, 1966). Outros tipos de detectores, como laços indutivos (*inductive loops*), radar, magnético e ultrassom também foram usados na Inglaterra já nesta época.

Desde então, muitos progressos ocorreram nessa área, tanto na parte dos componentes, como na parte metodológica e teórica. O marco inicial das teorias sobre o desempenho dos semáforos é o trabalho de WEBSTER (1958). Suas teorias são bastante utilizadas até hoje devido à precisão dos resultados apresentados, no mesmo nível dos obtidos nos sofisticados simuladores atualmente disponíveis (TÁPIA, 2003).

II.2.2. Importância

As interseções em nível constituem a parte crítica do sistema viário, pois, em razão dos movimentos conflitantes de veículos e pedestres que ali ocorrem, são os pontos onde é menor a capacidade de tráfego e maior a frequência de acidentes. Nesses locais,

qualquer que seja a forma de operação, uma parte dos veículos e dos pedestres necessita parar e esperar para passar.

Nas interseções com menor volume de veículos e pedestres, a operação com uma das vias como preferencial, isto é, com prioridade de passagem, constitui uma solução adequada no tocante ao desempenho operacional – que leva em conta, principalmente, a segurança, demora, necessidade de parada e capacidade.

No entanto, com o crescimento do tráfego começa a haver dificuldade dos veículos e/ou dos pedestres para entrar ou passar pela via principal, com conseqüente formação de filas, maiores demoras e, quase sempre, aumento da frequência de acidentes. Nesse caso, é indicada a implantação de semáforo no local. Muitas vezes, mesmo que o movimento de veículos e/ou pedestres não seja alto, o semáforo também é recomendado para melhorar a segurança nos cruzamentos onde a visibilidade é ruim, onde a topografia favorece o emprego de velocidades altas, quando o número de movimentos conflitantes é elevado tornando complexa a tomada de decisão de motoristas e/ou pedestres, etc.

A decisão de colocar ou não semáforo em um cruzamento deve ser pautada por critérios técnicos, pois a colocação de semáforo onde não for indicado tecnicamente acaba por prejudicar o desempenho operacional do cruzamento, afetando um ou mais dos fatores segurança, demora, número de paradas e capacidade (BEZERRA, 2007).

II.2.3. Conceitos Básicos

O Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 1984), apresenta os conceitos básicos para o dimensionamento semafórico:

- **Movimentos:** caracterizam a origem e o destino dos veículos e/ou pedestres na interseção, podendo ser conflitantes quando se cruzam numa interseção, convergentes quando têm origens diferentes e mesmo destino ou divergentes quando têm a mesma origem e destinos diferentes. Também podem ser permitidos quando são realizados junto com outro fluxo conflitante, onde o motorista deverá selecionar o intervalo apropriado para executar a manobra, ou protegidos quando ocorrem em um intervalo separado, sem que haja fluxo conflitante;

- **Ciclo:** tempo, em segundos, para uma seqüência completa de todas as indicações luminosas oferecidas aos vários grupos focais;
- **Fase:** parte do ciclo alocado a uma combinação qualquer de movimentos de tráfego que recebem simultaneamente o direito de passagem durante um ou mais intervalos;
- **Estágio:** período de tempo em que as indicações luminosas não mudam de aspecto, para um ou mais movimentos;
- **Entreverdes:** intervalo de tempo entre o final do verde de uma fase e o início do verde da fase seguinte;
- **Tempo Perdido:** intervalo de tempo, de um estágio que não é efetivamente utilizado por veículos cruzando a aproximação. Pode ser dividido em dois elementos, o correspondente à inércia dos primeiros veículos no início do tempo de verde e o correspondente à queda de capacidade verificada ao final da indicação de verde e início do amarelo/vermelho;
- **Fluxo de Saturação:** número de veículos por hora que pode cruzar uma interseção semaforizada, se o verde estivesse disponível por toda a hora e o fluxo veicular nunca fosse retido;
- **Defasagem (Offset):** é a diferença de tempo entre o início da fase verde do cruzamento a montante (*upstream*) e o início da fase verde do cruzamento a jusante (*downstream*). As fases dos sinais são sincronizadas para que, em condições de tráfego livre, os veículos atravessem os cruzamentos sem que sejam parados. Sinais de trânsito que operam desta maneira estão coordenados.

II.2.4. Equipamentos Semafóricos

Os controladores de tráfego têm como sua função básica o controle dos tempos de cada fase que será executada nos semáforos. Este controle pode ser obtido de forma mais simples baseado em um motor ou em forma mais complexa baseado em microprocessadores. Por isto podemos classificar os controladores de tráfego em uso no Brasil em três tipos básicos, os controladores eletromecânicos, eletroeletrônicos e eletrônicos micro processados, que possuem características muito distintas do ponto de vista tecnológico e construtivo, e por conseqüência do ponto de vista da utilização e dos recursos disponíveis (TRINDADE FILHO, 2002).

Com a rápida evolução tecnológica da informática e da engenharia eletrônica computacional, observamos uma tendência para a substituição dos antigos equipamentos eletromecânicos, por equipamentos mais modernos. Esta evolução foi o ponto de partida para a modernização do controle semaforico em todo o mundo. No Brasil, esta evolução tecnológica possibilitou o acesso de cidades de médio e pequeno porte, às facilidades e benefícios que estes equipamentos proporcionam. Atualmente, cidades como Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, dentre outras, já possuem os Sistemas de Controle Centralizado, as chamadas Centrais de Tráfego em Área (CTA).

Segundo o Manual de Semáforos do DENATRAN (1984) e (DUTRA, 2005), o controlador semaforico é um dispositivo que envia aos grupos focais dos semáforos, comandos através de pulsos elétricos para as mudanças de cores das indicações luminosas, autorizando a movimentação dos veículos de acordo com os planos semaforicos estabelecidos.

Os principais benefícios dos equipamentos semaforicos foram citados por vários autores, tais como HOMBURGER *et al.* (1992) e ROESS *et al.* (1998):

- Permitir que correntes de tráfego conflitantes usem a mesma interseção, por meio de separação destas correntes em intervalos de tempo específicos;
- Alternar o direito de uso da via entre os fluxos de tráfego, ordenando os movimentos e minimizando atrasos médios para todos os veículos e pedestres;
- Reduzir o estresse da dificuldade de realização de manobras em interseções operando próximas da capacidade;
- Eliminar ou diminuir conflitos de fluxo de tráfego que possam produzir acidentes;
- Reduzir a frequência de alguns tipos de acidentes, principalmente colisão lateral e atropelamento de pedestres;
- Aumentar a capacidade de tráfego da interseção, onde o arranjo físico e as medidas de controle são apropriados;
- Permitir economia através da redução de fiscalização por agentes de trânsito;
- Dividir as correntes de tráfego em pelotões, permitindo que pedestres cruzem as pistas com maior facilidade e segurança;
- Interromper o fluxo elevado de tráfego para permitir outro tráfego cruzar (veicular ou de pedestres);

- Prover movimento contínuo e ordenado do fluxo de tráfego na velocidade definida ao longo de uma rota, através da operação coordenada;
- Em sistemas de controle por área de tráfego, oferecer a possibilidade de aumentar a capacidade global do sistema viário central das cidades.

Algumas possíveis desvantagens são ressaltadas, e poderão ser observadas especialmente em casos de semáforos instalados e/ou programados inadequadamente:

- Aumentar o atraso na interseção e o consumo de combustível, principalmente em horário-pico;
- Induzir ao uso de rotas alternativas menos adequadas;
- Aumentar a frequência de certos tipos de acidentes, tais como colisão traseira;
- Causar atraso desnecessário e encorajar o desrespeito;
- Causar atraso excessivo, aumentando a irritação dos motoristas.

Em geral, em interseções com baixo volume de tráfego, o equipamento semafórico gera atraso total maior do que se não houvesse o semáforo. Já para volumes altos, o atraso total é menor e a capacidade aumenta com a adequada utilização dos mesmos. Desde 1956, estudos de acidentes antes e depois de intervenções semafóricas já revelavam 40% de redução de colisões laterais após a instalação de semáforo em locais sem nenhum tipo de controle ou com placas de parada (WEBSTER e COBBE, 1966; COELHO *et al.*, 2004 e DNIT, 2004).

II.2.5. Arranjo Físico

Ao contrário do que ocorre com a sinalização horizontal e vertical, no Brasil não existe um Manual publicado pelo órgão oficial, no caso o DENATRAN, sobre o posicionamento de grupos focais e colunas de sustentação para elaboração de projetos de sinalização semafórica. O Manual de Semáforos, publicado pelo DENATRAN (DENATRAN, 1984), trata da programação de tempos e critérios para implantação, mas não aborda a questão do arranjo físico. Neste sentido a referência adotada em São Paulo e em algumas cidades do país é o Manual de Sinalização Semafórica da CET-SP (CUCCI NETO, 1999).

A Figura II.1 abaixo mostra, a título de exemplo, uma instalação típica recomendada pela CET-SP e adotada em muitos municípios brasileiros, com a exemplificação dos focos principal e repetidor (MING *et al.*, 2001).

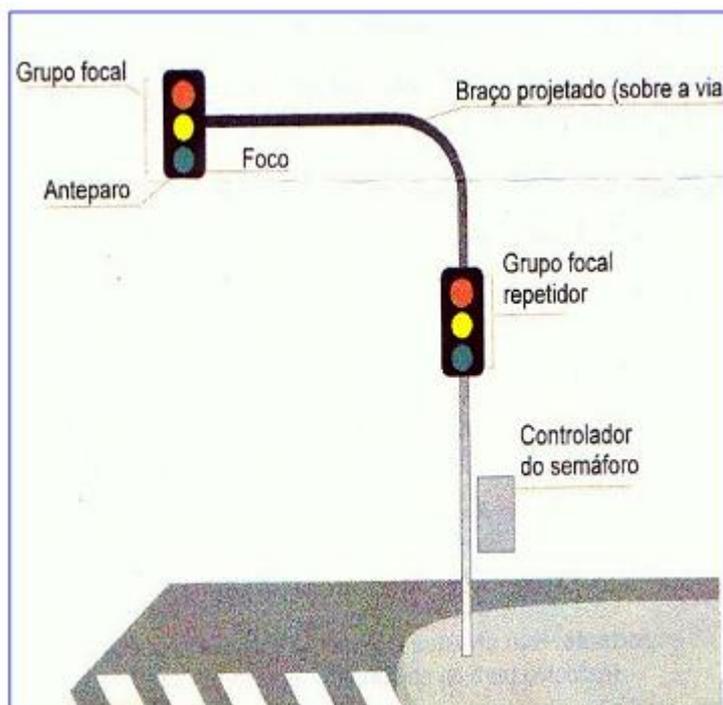


Figura II.1: Instalação Típica Recomendada pela CET-SP

(Fonte: CUCCI NETO, 1999)

II.2.6. Plano de Sinalização Semafórica

O termo plano (programa ou projeto) operacional é utilizado para designar o conjunto de estágios, fases e movimentos que ocorrem durante um ciclo. Para tal, o plano semafórico deve ser consistente com a geometria do cruzamento, o uso de cada faixa, os volumes e as velocidades, e a necessidade de travessia de pedestres.

As representações gráficas dos movimentos veiculares e de pedestres e das indicações luminosas (verde, amarelo e vermelho) possibilitam uma fácil visualização da operação em um cruzamento semaforizado. Isto é chamado de diagrama de estágios, que apresenta uma representação esquemática da seqüência de movimentos permitidos e proibidos para cada intervalo do ciclo. Relacionando a tabela dos movimentos com os estágios, identificam-se os grupos focais necessários (DUTRA, 2005).

A fim de minimizar o tempo perdido em cada ciclo, o número de estágios deve ser o menor possível, pois toda vez que ocorre mudança da indicação luminosa para um fluxo há uma perda de tempo no início do verde, até a fila partir, e no fim do entreverdes pela necessidade de se ter um intervalo de segurança entre a passagem do último e do primeiro veículo que se cruzam em direções distintas.

A definição dos fluxos que se movimentam em cada estágio deve ser feita com base nos volumes de veículos e pedestres de cada movimento. Os movimentos não conflitantes com maior fluxo devem, sempre que possível, ser alocados no mesmo estágio para se aproveitar melhor o espaço e o tempo no cruzamento (BEZERRA, 2007).

Segundo RIBEIRO (2007), a escolha do plano de operação em uma interseção semaforizada deverá buscar o esquema mais simples e seguro possível, com valores do ciclo e das repartições verde e vermelho de cada fase, de forma a melhor atender aos fluxos de veículos e de pedestres, e com o menor número de estágios e o maior número de movimentos não conflitantes por estágio.

II.3. Controle Coordenado em Interseções Semaforizadas

O controle de tráfego urbano é uma ferramenta vital para a solução de problemas das cidades, pois tem como meta organizar o escoamento veicular e de pedestres nas interseções semaforizadas, e minimizar os congestionamentos. Por ser uma solução que tem por objetivo a racionalização e otimização do uso da infraestrutura viária, uma vez que a ampliação da sua capacidade, através de obras como alargamentos, viadutos, túneis, está cada vez mais difícil por ser muito dispendiosa. Também em muitos casos estas obras são inviáveis por falta de condições técnicas locais, como mobiliário e geografia urbana, plano diretor, entre outros.

Os primeiros sistemas de controle semafórico tiveram como objetivo melhorar as condições de circulação e fluidez exclusivamente dos veículos privados (WOOD, 1993). Com o tempo, estes objetivos foram se expandindo, passando a incluir, entre outros, a priorização do transporte coletivo, a maximização da segurança dos pedestres e dos ciclistas, além da redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes, melhorando as condições do meio ambiente.

Existem diferentes formas de controle de tráfego para reduzir o número de conflitos e melhorar a segurança nas interseções, porém a mais utilizada é o controle semafórico (LEANDRO, 2001). É importante ter em mente, entretanto, que o controle semafórico não é a solução para todos os problemas de tráfego. A principal função do semáforo é restringir o fluxo contínuo do tráfego veicular, permitindo o direito preferencial de passagem nas interseções com movimentos conflitantes, tendo como vantagem, na maioria das vezes, o fato de requerer menores investimentos de capital.

Os principais tipos de controle semafórico do tráfego são designados para operar em interseções isoladas, em corredores ou em áreas de uma rede viária.

Pode-se considerar basicamente, segundo o *Institute of Transportation Engineers* (ITE, 1999), e OLIVEIRA NETO (2004), a existência de três estratégias de operação de sistemas semafóricos: controle isolado, controle coordenado e controle centralizado.

II.3.1. Controle Isolado

A estratégia semafórica de controle isolado é o sistema mais simples existente. Neste caso, os semáforos atuam independentemente dos demais, ou seja, não ocorre nenhum tipo de coordenação ou sincronismo semafórico. O controle de tráfego nestas interseções, segundo RIBEIRO (2007), segue, em sua grande maioria, a teoria de WEBSTER (1958), por meio da minimização do atraso veicular. Em controle isolado, existem dois tipos de operação semafórica, a saber: a operação em tempo fixo e a atuada pelo tráfego.

- **Operação Isolada em Tempo Fixo**

Na operação isolada em tempo fixo, os tempos semafóricos (ciclo e tempo de verde) não mudam durante um determinado período e são calculados para atender a volumes médios de tráfego nas aproximações, definindo um plano semafórico. Este tipo de operação é adequado para áreas urbanas onde o tráfego se comporta de maneira aproximadamente cíclica, com volumes de tráfego se repetindo na mesma hora do dia para diferentes dias da semana, sendo apropriada à aplicação de diferentes planos ou programações semafóricas conforme o período do dia.

- **Operação Isolada Atuada pelo Tráfego**

Os sistemas atuados, ou sistemas que variam conforme a demanda veicular, são usados nos casos em que o tráfego não apresenta um comportamento cíclico, ocorrendo variações de volume veicular de um dia para o outro. Por meio da detecção de veículos, o sistema muda a programação do semáforo. O princípio básico do funcionamento em modo atuado é o da variação do tempo de verde associado a um determinado estágio de sinalização entre um valor mínimo e um valor máximo, ambos programáveis. Para a determinação da variação do tempo de verde é necessário que se tenha em campo, além do controlador atuado, unidades detectoras de veículos. O sistema de detecção consiste, em sua grande maioria, em um ou mais laços indutivos localizados sob a faixa de rolamento que são capazes de detectar a passagem de um veículo (massa metálica) sobre a via. Estas informações veiculares são enviadas ao controlador atuado que processa as informações provenientes dos detectores e, de acordo com o programa nele armazenado, realiza a tomada de decisão de prolongar ou encerrar o verde para uma determinada aproximação.

Na operação atuada, cabe inicialmente a lógica do controlador determinar quanto tempo de verde deve ser dado para uma aproximação ou movimento. Neste caso, o período de verde pode alcançar o tempo máximo, ou finalizar o verde de uma aproximação (quando o intervalo da passagem entre dois veículos – *gap*, for maior que o intervalo pré-determinado), ou terminar o verde não prioritário em função do verde prioritário (semáforo *preempted*).

Dependendo da necessidade e do volume existente na via que se deseja controlar, pode-se ter ainda a ação semi-atuada pelo tráfego. Este tipo de operação é recomendado para o caso de uma importante via a ser controlada apresentar os acessos laterais com volumes relativamente baixos. Neste tipo de sistema, são instalados detectores veiculares somente nos acessos laterais, a uma certa distância da faixa de retenção, de modo que, quando for detectado um certo número de veículos, o tempo de verde da via principal seja interrompido – diferentemente da totalmente atuada que necessita de detectores em todas as aproximações da interseção que se deseja controlar (RENTERÍA, 2002).

II.3.2. Controle Coordenado

No atual contexto das grandes cidades são crescentes as horas de congestionamentos como consequência do desequilíbrio entre a quantidade de veículos em circulação e a capacidade das vias urbanas em absorver este fluxo. Com o intuito de atenuar tal desequilíbrio, uma das tendências é a priorização da utilização de técnicas de gerenciamento do tráfego, enfatizando a otimização e o controle semafórico coordenado. Como o próprio nome diz, esta estratégia tem a finalidade de coordenar o tráfego, seja por progressão na via arterial ou em uma determinada área. Para tal, basta determinar alguns parâmetros, como ciclo, tempo de verde de cada aproximação e, principalmente, defasagem (diferença, em segundos ou parte do comprimento do ciclo, entre os instantes de acionamento da indicação verde do semáforo de dois cruzamentos consecutivos). Obviamente, para se ter uma boa coordenação entre os semáforos de uma via arterial é estritamente necessário que estes estejam operando com o mesmo tempo de ciclo semafórico ou múltiplos entre si. Uma coordenação em uma via arterial é comumente chamada de onda verde ou banda de passagem, isto é, uma porção do ciclo na qual um pelotão de veículos, movimentando-se a uma velocidade constante, pode cruzar um conjunto de interseções sem ser parado pelo vermelho.

Os principais objetivos do controle coordenado em interseções semaforizadas são: maximizar a capacidade global da rede, das vias e dos cruzamentos críticos, que representam os gargalos; minimizar os tempos de viagem, reduzindo atrasos e paradas para permitir que os veículos se desloquem continuamente, evitando a formação de filas de veículos (para que não aumente tanto em uma interseção a ponto de interferir na outra, fechando o cruzamento); dispersar os pelotões de forma que o seu movimento através dos sucessivos cruzamentos não seja interrompido; sincronizar os semáforos para manter o movimento contínuo do tráfego a uma velocidade definida ao longo de uma via arterial (em sistemas sincronizados ou progressivos); reduzir os impactos negativos do tráfego no ambiente e no consumo de energia; e aumentar a segurança do tráfego (SUNKARI *et al.*, 2004).

Segundo LEANDRO (2001), o controle coordenado surge como solução para o problema do aumento do volume de tráfego em diversas interseções, gerando saturação de cruzamentos e pelotões ao longo das principais vias bem como acréscimo do número de paradas e atraso ao longo das mesmas. Esta estratégia pode ser utilizada em áreas ou

corredores semaforizados, onde se tenha uma densa rede viária sem uma hierarquização bem definida dessas vias ou em um corredor arterial, onde a coordenação semafórica é chamada de “Onda Verde”.

Na coordenação por área, assim como na progressão arterial, todos os semáforos devem estar operando com o mesmo ciclo semafórico para que seja possível obter uma constante coordenação entre os mesmos. Entretanto, é possível que alguns cruzamentos controlados operem em ciclo duplo, ou seja, alguns semáforos operam com um valor de tempo de ciclo igual à metade dos demais. Esta operação é necessária, comumente, quando se tem em uma mesma área interseções que necessitam operar com tempos maiores de ciclo, por terem maiores volumes em suas aproximações, e outras interseções que possuem volumes bem menores, podendo, portanto, trabalhar com ciclos mais baixos.

Para obter um bom controle coordenado semafórico, por área ou corredor, é necessário que se tenha uma boa modelagem do tráfego, para que se possa simular eficientemente o seu comportamento. Para tal, é preciso levar em conta que a operação dos semáforos faz com que o fluxo entre interseções não seja contínuo. Isso leva ao surgimento de agrupamentos de veículos caminhando de um cruzamento para outro, formando pelotões. Os pelotões têm uma tendência natural de se espalhar entre duas interseções sucessivas. Este fenômeno é conhecido como dispersão de pelotões, maior componente de representação do tráfego em modelos que levam em conta o fluxo de grupos de veículos e não o deslocamento dos veículos individualmente (OZELIM e JACQUES, 2008).

Muitos programas computacionais, como o TRANSYT (ROBERTSON, 1969), um dos mais conhecidos e eficientes na modelagem do tráfego por área, têm como parâmetro o fator de dispersão de pelotões. A otimização e simulação do tráfego por meio destes programas baseiam-se, portanto, no fenômeno da dispersão dos grupos de veículos ao longo de interseções sucessivas.

Com o sucesso da operação coordenada em interseções semaforizadas, e com o aumento do número destas interseções, o próximo passo na tentativa de obter um maior controle dos semáforos foi à centralização da operação semafórica.

II.3.3. Controle Centralizado

Com o controle de tráfego centralizado é possível introduzir políticas de transporte e tráfego, otimizar o uso da rede viária, oferecer benefícios econômicos à população, aumentar a segurança viária, reduzir a poluição gerada pelos veículos, oferecer prioridade aos serviços públicos e supervisionar a coleta de dados e o funcionamento dos equipamentos pertencentes ao sistema (CET-RIO, 2002).

O termo Controle de Tráfego por Área (CTA) provém de uma estratégia de controle em que a região a ser controlada é subdividida em sub-regiões (áreas), com suas interseções operadas por controladores em campo que se comunicam com um computador denominado de computador de área ou zona, responsável por gerenciar os controladores de uma determinada área. Estes computadores de zona, por sua vez, se comunicam com um computador central, o qual realiza o controle e direciona as ações para os controladores locais. A estratégia de controle centralizado dos semáforos pode operar da seguinte forma (WOOD, 1993): tempo fixo (tabela horária), seleção dinâmica ou tempo real (adaptativo).

- **Operação Centralizada em Tempo Fixo**

Na operação centralizada em tempo fixo, ou *off-line*, o computador central armazena e implementa os planos semaforicos previamente calculados, com dados que refletem condições padrões esperadas do tráfego. Estas condições são obtidas em dias típicos, periodicamente, ou em ocasiões especiais, como eventos esportivos ou sociais. Nesta operação, o momento da entrada de cada plano de tráfego previamente calculado ocorre por intermédio de uma tabela horária (não alterada pelos padrões de tráfego), ou seja, num determinado instante do dia, um determinado plano entra em operação, automaticamente imposto pelo computador central.

Nesta estratégia de controle, a programação é estabelecida previamente no controlador, não mudando ao longo do tempo (CET-SP, 1978). Neles, o tempo de ciclo é constante e a duração e os instantes de mudança dos estágios são fixos em relação ao ciclo para o período considerado.

Os controladores a tempo fixo são equipamentos simples e de custo relativamente baixo; podem facilitar a coordenação de semáforos adjacentes com

maior eficiência do que os controladores atuados pelo tráfego, devido à constância do tempo de ciclo e de sua partição de verdes; não dependem dos detectores veiculares e, portanto, não são afetados por anomalias no detector como, por exemplo, no caso de obra na via ou de veículos estacionados sobre os mesmos; apresentam resultados satisfatórios em cruzamentos, onde os padrões são relativamente estáveis e têm um comportamento cíclico e previsível; e como não modificam os tempos semafóricos em função de flutuações do tráfego, podem causar atrasos excessivos para veículos e pedestres fora das condições previamente programadas.

- **Operação Centralizada por Seleção Dinâmica (Adaptativo)**

Nesta centralização dos semáforos, a inserção dos planos fixos de tráfego não é regida por uma tabela horária, diferentemente da centralização em tempo fixo. Na seleção dinâmica, existe uma biblioteca de planos semafóricos pré-definidos, correspondente a dados históricos dos diversos fluxos veiculares. Assim, caso em uma determinada área ou interseção, o volume em suas aproximações aumente ou diminua, automaticamente o computador selecionará o plano previamente estabelecido para aquele respectivo volume. Portanto, os planos devem ser previamente dimensionados e armazenados no computador (OLIVEIRA NETO, 2004).

Neste tipo de controle, os planos semafóricos podem ser obtidos mediante a aplicação de programas de otimização *off-line* (p.ex. TRANSYT), baseado nos dados volumétricos históricos, e inseridos no computador que possui um programa que controla o envio dos mesmos. Estes planos são selecionados e enviados de acordo com o volume de tráfego detectado nas vias, através da comparação dos valores dos volumes observados no período em que os planos armazenados na biblioteca foram gerados. Portanto, é indispensável à existência de detectores veiculares nas vias. Neste caso, não é necessário que se tenha detector em todas as aproximações, e sim somente em alguns pontos estratégicos, determinados pelos responsáveis pela gerência do tráfego na localidade.

Este sistema necessita de uma tecnologia superior à centralização em tempo fixo, tanto na parte de equipamentos quanto na parte de programas. Além disso, é necessário que se tenha um grande trabalho de engenharia de tráfego na determinação dos planos semaforicos a serem armazenados no computador central, tendo em vista que é necessário que se tenha um número bem maior de planos, comparado com a centralização em tempo fixo por tabela horária (CET-RIO, 2002).

- **Operação Centralizada em Tempo Real**

Na centralização em tempo real, ou *on-line*, o computador central recebe as informações dos detectores veiculares instalados em todas as aproximações de uma interseção, analisa os dados e modifica os planos semaforicos (tempos de ciclo, tempos de verde e defasagens) das interseções, enviando-os aos controladores de campo (Fig.II.2). Desta forma, estes parâmetros são continuamente adaptados para atender as condições reais do tráfego. O ciclo e os tempos de verde são ajustados para manter um aceitável grau de saturação nas aproximações das interseções, enquanto as defasagens são ajustadas para minimizar os atrasos e/ou paradas dos veículos (CET-RIO, 2002).

O funcionamento de um sistema em tempo real depende principalmente de uma densa rede de detectores veiculares. É fundamental que se tenha controle de todo o fluxo veicular em todas as aproximações de todas as interseções a serem controladas (LEANDRO, 2001).

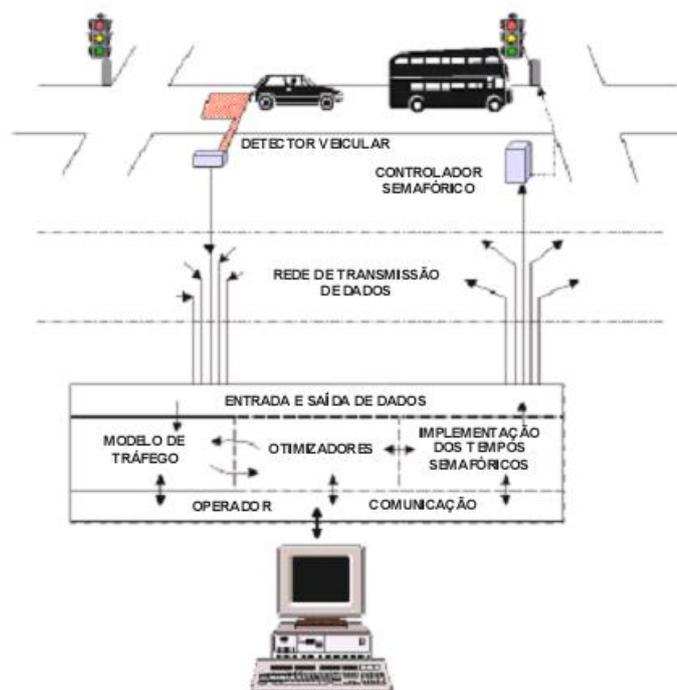


Figura II.2: Arquitetura do Sistema Centralizado em Tempo Real

(Fonte: TRL, 2000)

A grande vantagem do sistema centralizado em tempo real em relação às demais operações é o fato da possibilidade de responder rapidamente a demanda de tráfego das interseções, devido à variação diária e incidentes inesperados, como, por exemplo, acidentes ou enguicho veicular. Esta velocidade de reação do sistema em relação a algum incidente em campo pode ser limitada pela necessidade do sistema de estabilizar a operação normal.

O custo de implantação de um sistema centralizado em tempo real é bem superior aos demais sistemas. Nele estão incluídos os custos de equipamentos mais sofisticados, do computador central e seu sistema de controle, da inserção de detectores veiculares em todas as aproximações, da confiabilidade da rede de comunicação, da calibração do sistema, ou seja, da validação dos dados em campo necessários para o adequado funcionamento do sistema (CET-RIO, 2002).

O sistema de controle de tráfego centralizado em tempo real mais conhecido e utilizado em todo o mundo é o SCOOT (*Split Cycle Offset Optimisation Technique*), desenvolvido pelo *Transport and Road Research Laboratory*

(TRRL) em 1973. Este sistema está implantado em alguns países como Inglaterra, China, Canadá, Chipre, Paquistão, Espanha e Brasil (nas cidades de São Paulo e Fortaleza). Além do SCOOT, um outro sistema de controle em tempo real muito conhecido é o SCATS (*Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System*), desenvolvido pelo *Roads and Traffic Authority of New South Wales*, Austrália. O SCATS é utilizado na Austrália, Nova Zelândia, China, Irlanda, Filipinas e Estados Unidos. Outros sistemas são o ITACA, UTOPIA (desenvolvido pela *FIAT Research Center*), ITALTEL e MIZAR *Automazione SpA* para a cidade de Turin. Há também o PRODYN, desenvolvido na França na década de 90 (LEANDRO, 2001).

A Tabela II.1 resume de forma comparativa as vantagens e desvantagens de cada um dos diferentes tipos de controles centralizados de tempos fixos, e os adaptativos com seleção de planos e em tempo real.

Tabela II.1: Vantagens e Desvantagens dos Diferentes Sistemas de Controle

Tipos de Controle	Vantagens	Desvantagens
Controle de Tempos Fixos	Baixo custo de instalação e manutenção	Necessita de grande quantidade de dados para coleta e atualização
	Pode ser implementado usando equipamentos de controle não centralizados	Os planos semaforicos necessitam revisões periódicas
	Familiaridade para programação pelos técnicos dos órgãos	Ruptura de coordenação nas trocas de planos semaforicos
	Ondas verdes são mais facilmente implementadas	Necessita de atuação do operador em casos de incidentes e variações de fluxo imprevistas
	Pode priorizar tipos de veículos específicos mais facilmente	Não permite tratar pequenas flutuações de tempos para os níveis de fluxo

Tipos de Controle	Vantagens	Desvantagens
Controle com Seleção Dinâmica de Planos (Adaptativo)	Permite tratar as variações diárias de níveis de fluxo	Necessita de muito mais dados para serem coletados do que o sistema de tempos fixos
	Os horários de troca dos planos são mais apropriados	Possibilidade de falhas nos detectores
	Deve ser mais valioso em rotas arteriais	Necessita decidir no limiar para troca de planos
	Possui custo mais baixo que o sistema adaptativo em tempo real, pois necessita de menos detectores	Pode trocar de plano por uma decisão errada
Controle Adaptativo em Tempo Real	Vários dados necessários para serem coletados	Dificuldade de prever todos os planos que serão necessários
	Resolve os problemas relativos à trocas e revisões dos planos semaforicos	Possibilidade de falhas nos detectores, a qual comprometeria a performance do sistema
	Permite tratar com pequenas e grandes variações os diferentes níveis de fluxo	Elevado custo de implantação e de manutenção
	Atuação automática frente a incidentes	É imprescindível a central de controle, sem a qual os controladores não operam de forma viável
	Monitora a situação do tráfego e toda a área.	A manutenção é um item crítico nesse sistema

Fonte: IHT, 1987

II.4. Medidas de Desempenho de Interseções Controladas

Os cruzamentos sinalizados são basicamente pontos ou nós contidos em um sistema viário, conseqüentemente, a definição de medidas de eficiência para descrever a qualidade de operação é mais difícil do que em vias de fluxo contínuo.

Tradicionalmente, medidas são utilizadas na análise da capacidade e em modelos de simulação, sendo que todas quantificam algum aspecto da experiência da travessia de um cruzamento sinalizado do ponto de vista do motorista. As mais comuns são atraso, filas e paradas.

O atraso é a medida mais diretamente relacionada com a sensação do motorista, visto que ele descreve a quantidade de tempo consumida na travessia do cruzamento. O atraso, todavia, pode ser quantificado de várias maneiras diferentes. Os tipos de atraso mais frequentemente utilizados estão definidos abaixo (RENTERÍA, 2005):

- **Atraso parado**

É o tempo durante o qual o veículo fica totalmente parado enquanto espera para atravessar o cruzamento. O atraso começa quando o veículo para completamente e termina quando ele começa a acelerar.

- **Atraso de aproximação**

Inclui o atraso parado, mas também inclui o tempo de desaceleração e o tempo de aceleração até o retorno à velocidade original em que trafegava.

- **Atraso no tempo de viagem**

É definido como a diferença entre o tempo total desejado pelo motorista para atravessar o cruzamento e o tempo que realmente levou a travessia.

- **Atraso na fila**

É o tempo total contado a partir do veículo alcançar o final da fila até ele atravessar o cruzamento.

As medidas de atrasos parado, de aproximação e do tempo de viagem podem ser bastante diferentes, dependendo das condições do cruzamento sinalizado em questão.

As medidas de atraso também podem ser apresentadas sob forma agregada ou sob forma de média por veículo. O atraso agregado é apresentado como o total de horas-veículo de atraso sofrido por todos os veículos que atravessaram o cruzamento durante um determinado intervalo de tempo. O atraso médio individual é definido em termos de segundos/veículo de atraso, novamente para um determinado intervalo de tempo.

Atraso é a medida de eficiência mais frequentemente utilizada para cruzamentos sinalizados. Contudo, outras medidas também são úteis: o tamanho da fila em um

determinado instante é crítico para a determinação de quando um cruzamento vai começar a impedir o movimento de uma via que fica a montante (*upstream*).

Nos últimos anos, é cada vez mais frequente o uso de duas outras medidas de eficiência dos controles de cruzamentos: o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes.

A Figura II.3, ilustra o que foi apresentado neste item.

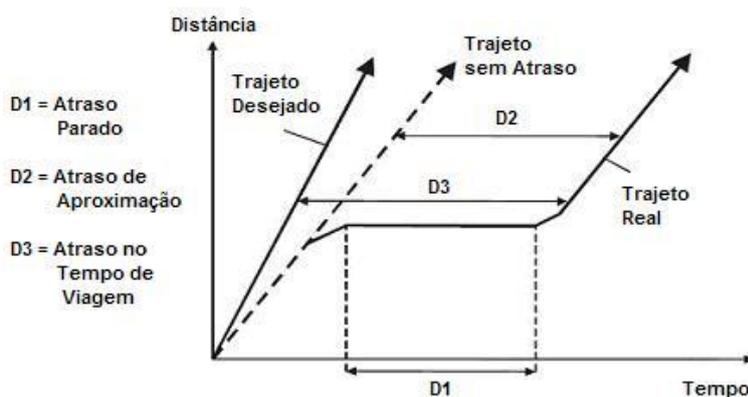


Figura II.3: Ilustração da Medida de Atraso (Fonte: RENTERÍA, 2005)

II.5. Sistemas de Controle de Tráfego

Com o advento da tecnologia do Controle de Processo Computadorizado (*Process Control Computer*) na década de cinquenta, foi possível coordenar um grande número de semáforos em uma área de uma cidade. Após a introdução de sinais de controle de tráfego computadorizados em meados dos anos 60, vários projetos de pesquisa se concentraram no desenvolvimento de estratégias de controle mais sensíveis e avançadas.

Desta forma, foram elaborados modelos para prever o comportamento futuro do tráfego que incorporam a variabilidade da demanda ao longo do tempo, o que lhes confere um maior poder de representatividade. Seu propósito principal é representar ou modelar o comportamento próprio e as interações dos elementos de um sistema para permitir uma avaliação prévia do seu desempenho. Assim, a simulação se tornou um instrumental descritivo para estimar como o sistema deverá operar se ele for projetado ou aprimorado de um determinado modo (PORTUGAL, 2005).

A escolha do modelo de simulação a ser utilizado, deverá ser baseada na facilidade de acesso, familiaridade e experiência que se tem no uso do mesmo. Para compará-los é necessário conhecê-los, estudá-los e utilizá-los em toda a sua potencialidade para se ter uma configuração mais próxima possível da realidade, o que propiciará aos gerenciadores de tráfego decisões mais precisas e coerentes com a realidade.

No Capítulo III é feita uma revisão dos principais simuladores de tráfego que servirão de base para desenvolvimento do método simplificado.

II.6. Considerações Finais

Os semáforos são utilizados nos cruzamentos como dispositivos de controle de fluxos de veículos e pedestres, com a finalidade de proporcionar fluidez à operação de tráfego e também reduzir os riscos de acidentes.

O controle de tráfego em cruzamentos semaforizados é o conjunto de ações tomadas por um mecanismo que alterna o direito de passagem (mediante informações sobre o tráfego) e oferece aos veículos uma circulação ótima e segura.

Neste capítulo é apresentada uma visão global sobre controladores semafóricos, tendo em vista que a elaboração do método proposto tem o objetivo de otimizar as defasagens de corredores de tráfego semaforizados, para controles centralizados em tempo fixo. Para tal, o método busca minimizar o tempo de viagem e reduzir a quantidade de paradas. Reduzir o tempo de viagem significa coordenar a operação dos cruzamentos, evitando congestionamentos e reações no comportamento dos motoristas e pedestres, contribuindo para a circulação.

CAPÍTULO III

COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

III.1. Considerações Iniciais

A coordenação entre semáforos de interseções vizinhas é um aspecto importante a considerar no controle de tráfego urbano, pois permite uma progressão de pelotões de veículos sem necessidade de parada em cada interseção, minimizando a poluição e gasto de combustível, um maior controle das velocidades desenvolvidas, redução das filas de veículos, aumento da capacidade dos cruzamentos, além de melhorar o conforto dos motoristas (GARCIA, 2007).

A definição de sistemas coordenados parte do princípio de que semáforos dispostos em um corredor linear, normalmente propiciam parâmetros para coordenação semafórica para produzir o que é chamado de “onda verde” (SHEPERD, 1992). Isto define a intenção de que o tráfego ultrapasse um conjunto de semáforos subsequentes no verde sem paradas. Para que este efeito ocorra, é desejável uma relação temporal, denominada defasagem, para permitir que o período de verde de uma interseção seja temporizado para abrir defasado com relação ao seu antecessor. Desta forma, os pelotões de tráfego podem receber uma indicação verde ao se aproximar de uma interseção sinalizada.

As vantagens que podem ser obtidas através da sincronização de semáforos são as reduções dos atrasos veiculares nas interseções e, conseqüentemente, menores tempos de viagens, do número de paradas e gastos de combustível, e também o aumento da velocidade média do sistema. Outra vantagem obtida é a adequada dispersão dos pelotões (agrupamentos de veículos caminhando de um cruzamento para outro, com uma tendência natural de se espalhar entre as interseções sucessivas), possibilitando que os mesmos se movimentem, através dos cruzamentos contínuos, a uma velocidade constante, sem serem parados pelo vermelho (OZELIM e JACQUES, 2008).

Este capítulo apresenta o detalhamento do problema de coordenação e uma revisão dos métodos empregados na solução do problema de ausência de sincronismo, inclusive com o auxílio de modelos computacionais.

III.2. Evolução dos Critérios

Quando dois ou mais cruzamentos estão próximos numa rota de tráfego, dispostas ao longo de um corredor ou integrantes de uma rede torna-se necessário a sua interligação para reduzir atrasos e prevenir paradas contínuas (WEBSTER e COBBE, 1966). Os esquemas de coordenação semafórica existem na Inglaterra e nos Estados Unidos desde 1926, e os métodos gráficos de obtenção das bandas de progressão são conhecidos desde o início da década de 1930 (BAVAREZ e NEWELL, 1967).

De acordo com as condições de tráfego, WEBSTER e COBBE (1966), o Manual de Semáforos do DENATRAN (1984), ROESS *et al.* (1998), TRINDADE FILHO (2002) e BEZERRA (2007), sugerem a utilização de diferentes formas de coordenação, tais como as apresentadas a seguir.

III.2.1. Sistema Simultâneo

Todos os semáforos de uma determinada seção de tráfego deverão ter características parecidas, abrir simultaneamente e ter fluxos semelhantes nos mesmos horários. Este tipo de sistema estimula o aumento da velocidade de alguns motoristas que tentam ultrapassar o máximo de interseções possível antes do semáforo fechar. Quando o movimento de conversões for leve e a distância entre interseções pequena, este sistema apresenta vantagens na travessia de pedestres. Portanto somente deve ser utilizado quando o espaçamento entre semáforos é pequeno (BEZERRA, 2007).

III.2.2. Sistema Alternado

Com este sistema, semáforos consecutivos ao longo da via exibem indicações opostas. Isto significa que, se o veículo percorrer a distância entre duas interseções na metade do tempo de ciclo, ele não terá necessidade de parar ao longo do seu trajeto. Motoristas que excederem a velocidade de projeto do sistema irão parar em cada interseção semaforizada. Este sistema não é recomendado para vias onde a distância entre os cruzamentos é variável, mas sim para quadras que apresentem praticamente o mesmo comprimento (DENATRAN, 1984, e DUTRA, 2005).

No sistema de progressão alternada, as distâncias entre os semáforos devem ser aproximadamente iguais e o ciclo deve ser igual ao dobro do tempo de percurso entre os

sinais. Neste caso, o valor da largura da banda verde deve ser igual à duração do verde (BEZERRA, 2007).

III.2.3. Sistema Progressivo (“Onda Verde”)

O ciclo de cada interseção é o mesmo neste sistema, porém os tempos de verdes são distribuídos para cada cruzamento, de acordo com a velocidade desejada no corredor, desde que não exceda a velocidade máxima. A intenção é fornecer uma “progressão” dos períodos de verde ao longo da via.

Em vias de mão dupla, a progressão em ambos os sentidos é desejável e isso geralmente resulta num compromisso entre os fluxos das duas direções e o fluxo das interseções secundárias (vias transversais). Em condições de baixos volumes de tráfego o sistema progressivo provavelmente acarretará maiores atrasos do que os produzidos por sistemas não coordenados, porque ele determinará uma regra de prioridade para a via principal, em detrimento da via secundária. Em vias de mão dupla, este sistema apresenta aspectos positivos quando existe a ocorrência de tráfego direcional, ou seja, quando por um determinado período o volume veicular num certo sentido de movimento é predominante.

Também pode ser utilizada, para obtenção da melhor estratégia de coordenação, uma das três abordagens distintas apresentadas abaixo:

- Maximização da largura da banda verde de progressão, que consiste em definir as defasagens entre os instantes de abertura de semáforos consecutivos de forma que os motoristas que percorrem a via encontrem os semáforos abertos, criando assim um efeito de “onda verde”;
- Minimização dos atrasos e paradas, que consiste em definir os instantes de abertura dos semáforos de forma a minimizar uma combinação entre os atrasos sofridos por cada veículo e o número de paradas nas interseções; ou
- Uma forma combinada que reúne de maneira seqüencial ou simultânea, as vantagens de ambos os métodos mencionados anteriormente.

A eficiência de qualquer desses sistemas de controle depende das distâncias entre as interseções, da velocidade do tráfego, do tempo de ciclo (constante para todos os semáforos), da capacidade da via, da dispersão dos pelotões e dos efeitos negativos

gerados por fatores tais como, movimentos de conversão, estacionamento, carga/descarga e travessia de pedestres.

III.3. Técnicas de Coordenação

Quando interseções semaforizadas são localizadas nas proximidades de outras, o controle de cada cruzamento isoladamente interfere no comportamento de chegada de veículos nas outras interseções.

Os pelotões são criados pela descarga da fila de veículos formada durante a indicação semafórica vermelha. Quando a distância entre interseções não é grande o suficiente para que ocorra dispersão, considera-se que o pelotão gerado na interseção a montante chegue inalterado na interseção a jusante (GARCIA, 2007).

A Figura III.1 ilustra uma situação modelada em muitas técnicas de coordenação entre interseções.

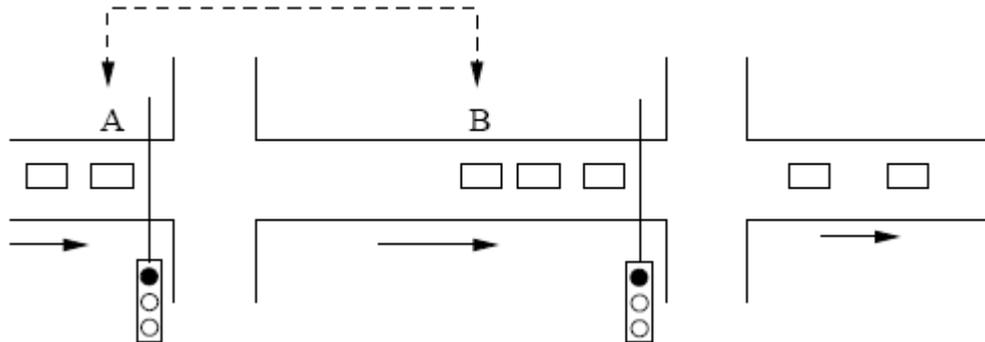


Figura III.1: Situação Desejada Para Coordenação Entre Interseções

(Fonte: GARCIA, 2007)

Deseja-se que o carro **A** alcance o carro **B** no exato instante em que este comece a se mover, ou seja, busca-se uma coordenação entre as interseções de maneira que os veículos que partem a montante encontrem o final da fila a jusante no exato momento em que ela começa a se movimentar, evitando assim uma parada. Uma variável importante nestas técnicas é a fila formada nas linhas de parada

Outras técnicas buscam a ocorrência do fenômeno conhecido como “onda verde”, onde a fila não é a principal variável. A “onda verde” acontece quando os semáforos são

coordenados de maneira que um veículo que receba sinal verde em um extremo de uma artéria, trafegando em velocidade pré-determinada, possa percorrê-la até a outra extremidade sem parar em nenhum sinal vermelho durante o trajeto. Para que isto ocorra o tempo de ciclo tem que ser o mesmo em todas as interseções do trajeto e não podem existir filas longas nos cruzamentos a jusante (GARCIA, 2007).

As técnicas de coordenação podem ser classificadas quanto aos critérios utilizados para obter coordenação de semáforos. Segundo CARLSON (2006), é possível dividi-las em dois grupos: o primeiro utiliza técnicas para maximizar a largura de banda, e o segundo otimiza algum critério de tráfego, como atraso e número de paradas.

O primeiro grupo toma como base os dados geométricos da via, tempo de ciclo e de porcentagens de verde, procurando tirar o máximo proveito do tempo de verde no ciclo para geração de bandas (MORGAN e LITTLE, 1964). O programa MAXBAND (LITTLE *et al.*, 1981), obtém a coordenação através da maximização das bandas em ambos os sentidos.

A distância temporal do percurso entre o primeiro e o último veículo, que passam desimpedidos por todos os semáforos de uma via arterial, é denominada largura da banda de verde. A Figura III.2 apresenta um diagrama espaço-tempo, onde as linhas horizontais indicam os ciclos ao longo do tempo e as barras diagonais mostram a banda de verde de ambos os sentidos da via arterial, limitada pelas trajetórias do primeiro e do último veículo que usufruem a banda. A inclinação da reta representa a velocidade dos veículos.

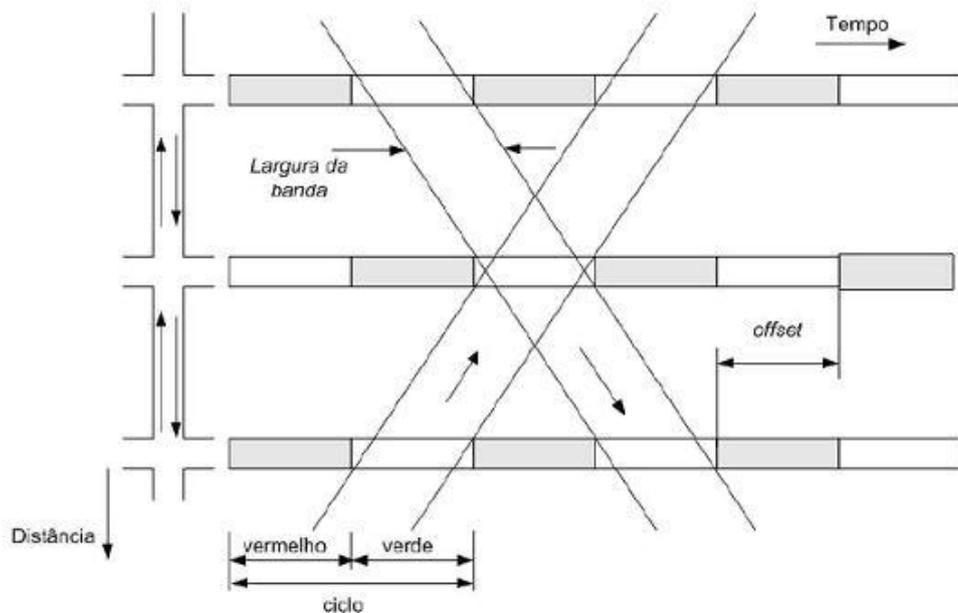


Figura III.2: Diagrama Espaço x Tempo (Fonte: CERVANTES, 2005)

O favorecimento da progressão de veículos por meio de ondas verdes obtidas através das técnicas de maximização de largura de banda é de fácil e intuitiva assimilação por operadores e motoristas, e é largamente utilizada. Diagramas espaço-tempo, como ilustrado na Figura III.2 permitem a visualização do resultado. Estas técnicas utilizam poucos dados de entrada, quando são comparadas às técnicas que otimizam critérios de tráfego. Entretanto, o favorecimento da progressão na artéria não pode ser tal que prejudique em demasia as vias transversais. A adoção de planos obtidos por banda máxima é satisfatória quando o volume de tráfego está baixo, e de pouca utilidade quando está alto, ou seja, quando o grau de congestionamento é alto, não é útil. Além disso, o desempenho de sistemas que empregam a maximização de banda é melhor quando poucos veículos fazem conversão das vias secundárias para a arterial, ou seja, quando o fluxo é predominante na arterial (CARLSON, 2006).

O segundo grupo de técnicas de coordenação procura otimizar os critérios de tráfego, por exemplo, propõe técnicas para minimizar o atraso veicular ou o número de paradas. O método mais difundido deste grupo é o TRANSYT (ROBERTSON, 1969).

O critério atraso veicular acumulado está diretamente relacionado à formação de filas. Ele avalia o desempenho do tráfego através do número de veículos parados em fila. A formação de filas nas interseções ocorre em duas situações (GARCIA, 2007):

- Durante período do vermelho, quando os veículos são obrigados a parar; e

- Quando a razão de chegadas é maior do que a capacidade de descarga da via durante o tempo de verde do semáforo.

O processo de cálculo do atraso depende do conhecimento da variável número de veículos em fila, e para quantificá-la é necessário conhecer o fluxo de veículos nas vias. Este fluxo pode ser obtido diretamente das contagens realizadas por sensores localizados nas vias, manualmente ou através de levantamento dos dados históricos.

O critério número de paradas é obtido pela avaliação da quantidade de tráfego que sofre atraso, ou seja, os veículos parados em fila e a quantidade de paradas.

As seguintes situações devem ser consideradas quando ocorre uma parada de veículo (CERVANTES, 2005):

- Quando a fila está sob indicação semafórica vermelha: todos os veículos parados em fila contribuem para o número de paradas;
- Quando os veículos encontram o final da fila e esta já recebeu indicação semafórica verde: os veículos que porventura pararem ao encontrar o final da fila ainda parada e os veículos que não conseguirem cruzar a interseção dentro da indicação verde contribuem para o número de paradas;
- Quando a fila existente é descarregada, mas o veículo recebe indicação semafórica vermelha ao chegar próximo à linha de parada: neste caso os veículos que não conseguem atravessar a interseção contribuem para o número de paradas.
- Quando os veículos encontram o final da fila já iniciando o movimento, obrigando os mesmos a uma parada parcial, resultando em pequenos atrasos, também contribuem para o número de paradas.

III.4. Métodos de Maximização da Banda Verde

O objetivo da coordenação semafórica é proporcionar que uma grande quantidade do tráfego consiga passar, sem paradas forçadas, por uma interseção, enquanto for permitido o direito de passagem. Em alguns casos, o objetivo é conseguir o atraso mínimo em todas as correntes de fluxo. Adicionalmente, a coordenação também pode ser aplicada para prevenir que as filas de veículos de uma interseção aumentem tanto a

ponto de interferir em outra, causando o bloqueio do cruzamento (TRINDADE FILHO, 2002).

O método mais utilizado de coordenação flexível é a maximização da banda verde, que objetiva a passagem da quantidade máxima de veículos sem paradas obrigatórias, permitindo um fluxo de tráfego priorizado e contínuo, principalmente em corredores arteriais. Idealmente os tempos de verde devem aparecer progressivamente ao longo da rota, através de defasagens adequadas entre os inícios dos verdes entre semáforos consecutivos, para facilitar o movimento preferencial do fluxo com maior volume em cada período projetado.

Segundo GARTNER (1991), nos Estados Unidos, o método da progressão arterial, largamente utilizado, apresenta benefícios significativos no aumento da velocidade de percurso e na redução dos atrasos. Para tanto, os tempos dos semáforos são programados para maximizar a largura contínua da banda de verde uniforme, em ambas direções ao longo de um corredor, com uma velocidade de percurso definida. Os softwares mais avançados para otimização utilizados nos Estados Unidos são o PASSER e o MAXBAND. A primeira utiliza um procedimento de pesquisa heurística e a outra utiliza uma técnica de programação matemática muito versátil. Ambas objetivam o cálculo dos tempos de ciclo, defasagens, velocidade de percurso e seqüência das fases para cada interseção, para maximizar a combinação importante das larguras de banda nas duas direções ao longo do corredor.

As defasagens no esquema de coordenação flexível, necessárias para a criação do efeito “onda verde”, podem ser definidas pelo procedimento convencional com cálculos numéricos, pelo processo de tentativa e erro através da manipulação gráfica do Diagrama Espaço-Tempo ou por procedimentos computacionais.

A seguir, serão descritos alguns métodos para coordenar corredores de tráfego que utilizam a maximização da banda verde.

III.4.1. Definições Básicas

No caso de modelos analíticos de coordenação baseada na maximização da banda verde, o diagrama espaço-tempo também é usado como base para a definição das variáveis mostradas na Figura III.3 e definidas a seguir.

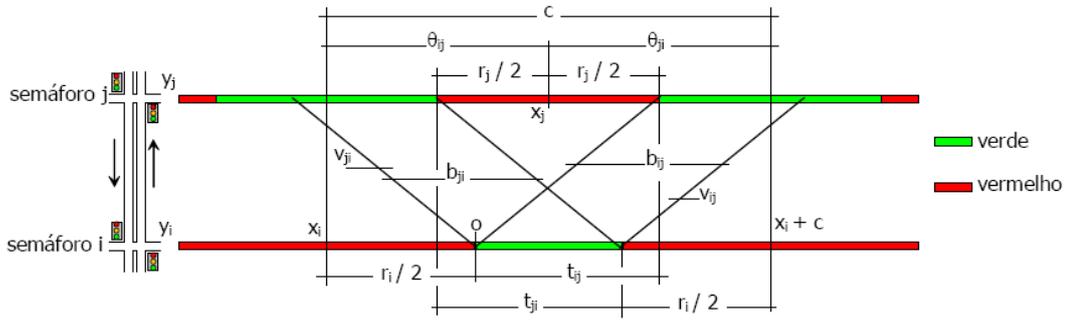


Figura III.3: Variáveis Utilizadas no Método de Maximização da Banda Verde

(Fonte: DUTRA, 2005)

Onde:

- c : duração do ciclo (s);
- r_i, r_j : duração dos vermelhos dos semáforos i e j para a via analisada (s);
- x_i, x_j : instantes referentes aos centros dos vermelhos dos semáforos i e j (s);
- y_i, y_j : posições dos centros das interseções semaforizadas i e j em relação à origem do diagrama espaço-tempo (m);
- v_{ij}, v_{ji} : velocidades médias de percurso entre semáforos i e j e entre semáforos j e i (km/h);
- b_{ij}, b_{ji} : largura das bandas verdes nos sentidos $i-j$ e $j-i$ (s);
- t_{ij}, t_{ji} : tempos de viagem nos segmentos $i-j$ e $j-i$ (s);
- θ_{ij}, θ_{ji} : defasagens entre semáforos nos sentidos $i-j$ e $j-i$ (s).

As defasagens θ_{ij} e θ_{ji} entre semáforos nos sentidos $i-j$ e $j-i$ são as diferenças entre os pontos (ou instantes) centrais dos vermelhos dos semáforos $i-j$ e $j-i$, respectivamente:

$$\theta_{ij} = x_j - x_i \quad (\text{III.1})$$

$$\theta_{ji} = x_i + c - x_j \quad (\text{III.2})$$

Substituindo (III.1) em (III.2) é possível observar que:

$$c = \theta_{ij} + \theta_{ji} \quad (\text{III.3})$$

sendo $0 \leq \theta_{ij} \leq c$ e $0 \leq \theta_{ji} \leq c$.

III.4.2. Procedimento Convencional

De acordo com MAGALHÃES (1981), o método convencional de progressão flexível considera as defasagens em vias de mão única como sendo o tempo de viagem realizado por veículos entre semáforos adjacentes, e são calculadas conhecendo-se a velocidade média dos pelotões de tráfego e as distâncias que separam os pares de semáforos, conforme a Equação (III.4):

$$\theta_{ij} = 3,6 \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \quad (\text{III.4})$$

Onde:

- θ_{ij} : defasagem entre os semáforos i e j (s);
- d_{ij} : distância entre os semáforos i e j (m);
- v_{ij} : velocidade média do pelotão de veículos entre os semáforos i e j (km/h).

Caso haja fila formada no semáforo j devido a veículos que não conseguiram atravessar a interseção no ciclo anterior, a Equação (III.5) deverá ser utilizada:

$$\theta_{ij} = 3,6 \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - \left(\frac{QI_j}{S_j} + TPI_j \right) \quad (\text{III.5})$$

Onde:

- QI_j : fila média inicial no semáforo j (veículos);
- S_j : taxa de liberação da fila no semáforo j (veíc/s);
- TPI_j : tempo perdido no semáforo j , devido ao começo de movimento da fila inicial (s).

Em vias de duplo sentido de circulação, θ_{ij} é calculado como demonstrado na Equação III.5, e a defasagem θ_{ji} para o outro sentido é dada pela Equação (III.6):

$$\theta_{ji} = 3,6 \frac{d_{ji}}{v_{ji}} - \left(\frac{QI_i}{S_i} + TPI_i \right) \quad (\text{III.6})$$

Neste caso, é necessário considerar ainda a Equação III.3, mencionada no item III.4.1. das definições básicas, como condição do tamanho do ciclo c .

Porém, na maioria dos casos esta condição não pode ser encontrada. É comum, na prática, o favorecimento de uma direção de viagem com maior volume de tráfego, em detrimento à direção de menor volume, tornando o método convencional de progressão bastante limitado para ajustes em corredores de sentido duplo de tráfego.

III.4.3. Diagrama Espaço-Tempo

A técnica manual de progressão flexível mais conhecida e frequentemente adotada em cidades brasileiras para coordenar semáforos é o Diagrama Espaço-Tempo. Nesse caso, utiliza-se um procedimento gráfico de tentativa e erro, que foi desenvolvido entre as décadas de 1930 e 1940, para definir as bandas verdes e as defasagens semafóricas do sistema de progressão. Este método de coordenação permite que o engenheiro de tráfego visualize previamente a largura da banda verde disponível, sendo que a progressão também é facilmente percebida pelos motoristas. No entanto, o procedimento mostra-se bastante trabalhoso para a coordenação de várias interseções, especialmente em vias de duplo sentido ou redes mais complexas.

WEBSTER e COBBE (1966) apresentaram no *Road Research Technical Paper n°56* um apêndice sobre Sistemas de Coordenação Semafórica, com a descrição detalhada da preparação manual do Diagrama Espaço-Tempo, produzido pelo Ministério de Transporte e baseado no trabalho originalmente preparado pelo *Vehicle Actuated Road Signal Development Association* em fevereiro de 1965. O procedimento é iniciado com o cálculo dos ciclos ótimos de cada interseção, visando identificar o maior ciclo que será estabelecido para todo o sistema, sendo posteriormente definidas as divisões dos tempos de verde e vermelho em cada interseção e a defasagem entre interseções sucessivas ao longo da rota.

Os dados necessários para a preparação do Diagrama Espaço-Tempo são:

- Velocidade de progressão desejada da rota;
- Distância entre as interseções sinalizadas;
- Ciclo para as condições do período de pico e entre pico, de cada interseção, além do número de fases e tempos de verde, amarelo e vermelho. A interseção que tiver o tráfego mais intenso e, portanto, necessitar do tempo de ciclo mais longo é designada “mestre”, e este ciclo deverá ser adotado para as interseções restantes ao longo do trecho. Uma interseção “mestre” diferente pode ser

escolhida (e também ciclo diferente), para cada uma das situações de tráfego que ocorram durante a semana, fora de pico e finais de semana.

A preparação do Diagrama Espaço-Tempo consiste em buscar a cada tentativa uma solução de progressão bidirecional melhor do que o antecedente. Inicialmente, uma linha da velocidade de progressão é proposta na direção do maior fluxo, que é obtida através de simples observações em campo e desenhada a partir da origem do diagrama. Linhas horizontais são desenhadas através do diagrama para identificar a posição de cada interseção em relação à origem, e então os períodos de verde e vermelho para a rota principal são alocados, referencialmente em tiras separadas de papel que possam ser movimentadas e ajustadas a fim de formar a banda nesta direção. A banda de progressão ao longo da rota principal estará então definida na velocidade desejada, e os períodos de verde e vermelho da direção oposta devem ser examinados para ver se são adequados ao seu volume de tráfego, conforme ilustrado na Figura III.4. Deve ser observado que na prática a produção manual do diagrama fica muito trabalhosa a medida que o número de interseções controladas ao longo da rota for aumentando (WEBSTER e COBBE, 1966).

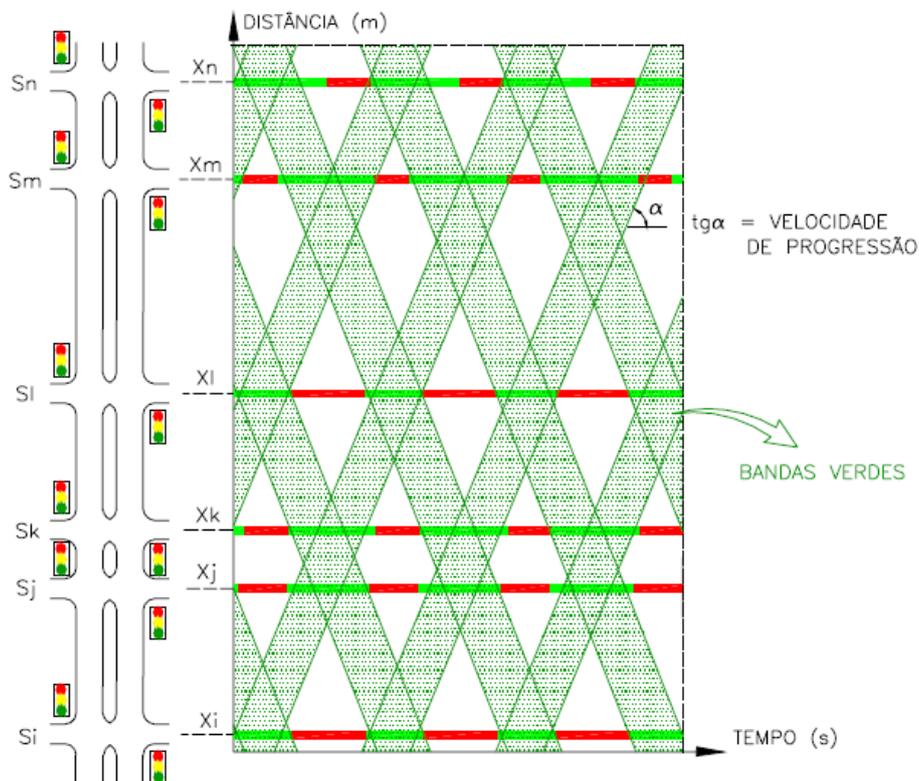


Figura III.4: Diagrama Espaço-Tempo de um Corredor Viário Hipotético

(Fonte: ITH, 1987)

Uma pesquisa deve revelar se a velocidade constante é apropriada, pois características físicas da via (gradientes e curvas) ou volumes de tráfego podem sugerir que diferentes velocidades são mais adequadas para diferentes seções da rota. Para alcançar uma progressão aceitável nas duas direções, pode-se mudar a ordem cíclica das fases das interseções, além de cuidados especiais que devem ser tomados para certificar que importantes vias transversais não sejam bloqueadas pelo tráfego armazenado na via principal.

III.4.4. *Half-Integer Synchronization*

Os métodos computacionais de coordenação flexível através da maximização da banda verde são uma extensão dos métodos manuais em que o diagrama espaço-tempo é utilizado para definir, através de tentativa e erro, as defasagens que fornecem a maior largura de banda possível. Os métodos analíticos de maximização da banda verde mais conhecidos foram desenvolvidos por JOHN D. C. LITTLE, do *MIT - Massachusetts Institute of Technology*. O primeiro método, descrito nos artigos de MORGAN e LITTLE (1964) e LITTLE *et al.* (1966), é denominado *Half-Integer Synchronization*, e consiste em determinar as melhores posições dos centros dos vermelhos dos vários semáforos de duas fases ao longo de uma via, de tal forma a conseguir a maior largura de banda verde possível nos dois sentidos de tráfego e, se desejado, modificar tais valores para aumentar a banda no sentido de maior volume de tráfego (DEMARCHI e DUTRA, 2004a).

O nome do método corresponde ao tipo de solução obtida, pois as defasagens ótimas correspondem a 0 ou 1/2 do valor do ciclo semafórico c (isto é, $0.c/2$ ou $1.c/2$), conforme ilustra a Figura III.5, quando a velocidade de progressão é igual em ambas as direções da via. Existem somente duas opções possíveis de coordenação para cada par de semáforos ao longo da via arterial, portanto este tipo de problema em que é necessário escolher um dentre dois possíveis valores de uma variável representa um problema de programação inteira. Segundo MAGALHÃES (1981), o método de MORGAN e LITTLE (1964) demonstra que os semáforos ao longo da via arterial estarão coordenados para a máxima largura total da banda em ambas as direções, selecionando uma destas duas possibilidades.

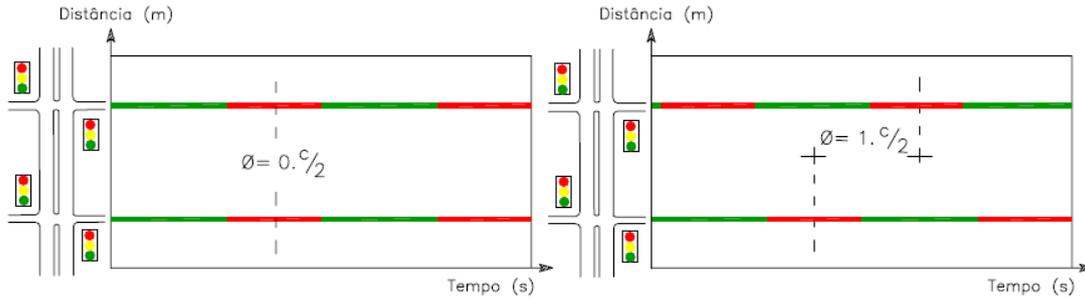


Figura III.5: Possíveis Posições dos Centros dos Vermelhos (Fonte: DUTRA, 2005)

O algoritmo computacional utilizado no método *Half-Integer Synchronization* requer como dados de entrada a quantidade de semáforos, os espaçamentos entre eles, um ciclo comum, a duração do verde e do vermelho de cada semáforo e os tempos de viagem entre semáforos adjacentes em cada direção.

Inicialmente o método consiste na definição da maior largura de banda possível para pares de semáforos com duas fases. Para isso, MORGAN e LITTLE (1964) definem que em qualquer rede de semáforos existe pelo menos um semáforo crítico, identificado como sendo aquele em que a trajetória frontal da banda de um dos sentidos ($i-j$ ou $j-i$), toca um dos lados do vermelho do semáforo crítico, enquanto que a trajetória traseira da banda do sentido contrário toca o outro lado do vermelho. MORGAN e LITTLE consideram ainda que os semáforos críticos podem ser classificados em 2 grupos:

- Grupo 1: a trajetória frontal da banda no sentido $i - j$ toca o vermelho do semáforo crítico, enquanto que a trajetória traseira no sentido $j - i$ toca o outro lado do vermelho; e
- Grupo 2: a trajetória traseira da banda no sentido $i - j$ toca o vermelho do semáforo crítico, ao mesmo tempo em que a trajetória frontal no sentido $j - i$ toca o outro lado do vermelho.

Na Figura III.3, o semáforo j enquadra-se no grupo 1, enquanto que o semáforo i pode ser classificado como pertencendo tanto ao grupo 1 como ao grupo 2. A partir da situação ilustrada na Figura III.3, as seguintes expressões podem ser definidas:

$$\frac{r_i}{2} + t_{ij} = \theta_{ij} + \frac{r_j}{2} \quad (III.7)$$

$$\frac{r_i}{2} + t_{ji} = \theta_{ji} + \frac{r_j}{2} \quad (III.8)$$

Subtraindo (III.7) de (III.8) e lembrando que $c = \theta_{ij} + \theta_{ji}$ (Equação III.3), é obtido o valor da defasagem entre os vermelhos dos semáforos i e j que fornece bandas iguais nos sentidos $i-j$ e $j-i$:

$$\theta_{ij} = \frac{c}{2} + \frac{t_{ij} - t_{ji}}{2} \quad (\text{III.9})$$

Além disso, existe outra defasagem para a qual as bandas são iguais, obtida através da Equação (III.10), considerando que num sistema cíclico $c = 0$, ou seja:

$$\theta_{ij} = \frac{t_{ij} - t_{ji}}{2} \quad (\text{III.10})$$

De uma forma geral, as expressões (III.9) e (III.10) podem ser representadas por:

$$\theta_{ij} = \left(\delta_{ij} \cdot \frac{c}{2} + \frac{t_{ij} - t_{ji}}{2} \right) \quad (\text{III.11})$$

onde: δ_{ij} = constante que pode assumir o valor de 0 ou 1/2, para cada interseção.

Para determinar a banda ótima, é considerado somente um sentido de tráfego (por exemplo, $i-j$), pois o valor da banda é igual nos dois sentidos. A banda máxima é definida a partir de suas trajetórias frontal e traseira, sendo que a trajetória frontal U_{ij} (calculado em função das defasagens ótimas, que correspondem a 0 ou 1/2 do valor do ciclo semaforico, para velocidades de progressão idênticas), é obtida a partir de relações algébricas entre variáveis da Figura III.3, tomando como origem do sistema o ponto O :

$$U_{ij} = -\frac{r_i}{2} + \theta_{ij} + \frac{r_j}{2} - t_{ij} \quad (\text{III.12})$$

MORGAN e LITTLE (1964) consideram que a expressão para fazer com que U_{ij} seja igual a c sempre que a expressão (III.12) for igual a 0, é:

$$U_{ij} = c - \left(\frac{r_i}{2} - \theta_{ij} - \frac{r_j}{2} + t_{ij} \right) \quad (\text{III.13})$$

Substituindo (III.11) em (III.13) e fazendo U_{ij} ser dependente de δ_{ij} , é obtida:

$$U_{ij}(\delta_{ij}) = c - \left(\frac{r_i - r_j}{2} + \theta_{ij} - \frac{t_{ij} + t_{ji}}{2} - \delta_{ij} \cdot \frac{c}{2} \right) \quad (\text{III.14})$$

Conseqüentemente, a trajetória que toca o lado esquerdo do vermelho do semáforo j passa pelo semáforo i em $U_{ij} - r_j$, o que corresponde à largura a banda verde considerando o semáforo j . Neste caso, a maior banda seria obtida a partir de:

$$\text{MAX } U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j \quad (\text{III.15})$$

Considerando diferentes pares de semáforos e $\delta_{ij} = \{0, 1/2\}$, a banda verde máxima igual para ambas direções é dada por:

$$B = \text{MAX}_i \text{MIN}_j \text{Max}_{\delta=0,1/2} (U_{ij} - r_j) \quad (\text{III.16})$$

Para determinar a banda ótima, é considerado somente um sentido de tráfego (por exemplo, $i-j$), pois o valor da banda é igual nos dois sentidos. A banda máxima é definida a partir de suas trajetórias frontal e traseira.

Como os comprimentos dos pelotões são geralmente diferentes nas duas direções, posteriormente o método utiliza os volumes horários em cada direção e o *headway* (intervalo de tempo decorrido entre as passagens de dois veículos sucessivos por uma seção de via, onde este intervalo é medido de frente a frente dos veículos), entre os veículos, a fim de ajustar as defasagens para aumentar uma das bandas e favorecer o sentido de maior volume de tráfego, mantendo a outra mais larga possível, de forma a dividir a largura total da banda em proporção aos volumes direcionais da via.

III.4.5. Interferência de BROOKS / BLEYL

Entre 1966 e 1967 BROOKS e BLEYL adaptaram o programa *Half-Integer Synchronization* de MORGAN e LITTLE para coordenação entre semáforos de duas fases, através da elaboração de um método computacional para construção de diagramas bidirecionais. Para tal, converteram as unidades de velocidade e distância em unidade de tempo de viagem em ambos os eixos, de forma a considerar elementos variáveis (como diferentes velocidades a cada segmento de via) e simplificar os cálculos (BLEYL, 1967).

Desenvolvido para a linguagem de programação computacional *FORTRAN IV*, o método necessita da quantidade de semáforos, suas distâncias, as porcentagens das divisões das fases, os comprimentos de ciclo mínimos e máximos a serem considerados aceitáveis, a proporção desejada das bandas em cada direção em função dos volumes de

tráfego direcionais, as velocidades de progressão direcionais desejadas e o limite máximo de tolerância das velocidades sugeridas.

O método toma como origem a interseção com largura de banda mínima, ou seja, com menor tempo de verde na via principal, e determina as larguras máximas das duas bandas. Posteriormente avalia as progressões que minimizam a interferência (quantidade de verde não utilizada nas bandas) no valor total das bandas bidirecionais para um grupo de defasagens, ciclos e velocidades nos segmentos da via, possibilitando também o ajuste das defasagens para favorecer a largura da banda na direção desejada.

III.4.6. PASSER - *Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine*

Os programas, anteriores a 1973, que determinavam defasagens para fornecer a melhor progressão, operavam com semáforos de duas fases, e não se aplicavam em operações semaforizadas com múltiplas fases onde os verdes de progressão em cada direção geralmente têm comprimentos desiguais e são defasados entre si. MESSER *et al.* (1973) desenvolveram o modelo macroscópico PASSER - *Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine*, baseado no algoritmo *Half-Integer Synchronization* de maximização da largura da banda, criado por MORGAN e LITTLE e no algoritmo de interferência de BROOKS e BLEYL, incluindo rotinas para otimização da seqüência de múltiplas fases ao longo de vias arteriais.

Esta rotina de otimização é caracterizada também por um problema de programação inteira, na busca da seleção entre os quatro padrões possíveis para fases de conversão à esquerda, conforme representação da Figura III.6, determinando a seqüência das fases e as defasagens em cada interseção que maximizam a progressão. O programa PASSER foi avaliado em um estudo piloto na cidade de Dallas – Texas, e utiliza como dados de entrada as distâncias entre interseções, velocidade média nos segmentos da via, movimentos de conversão, fluxos de saturação, intervalos para limpeza da fila e tempos de verde mínimos.

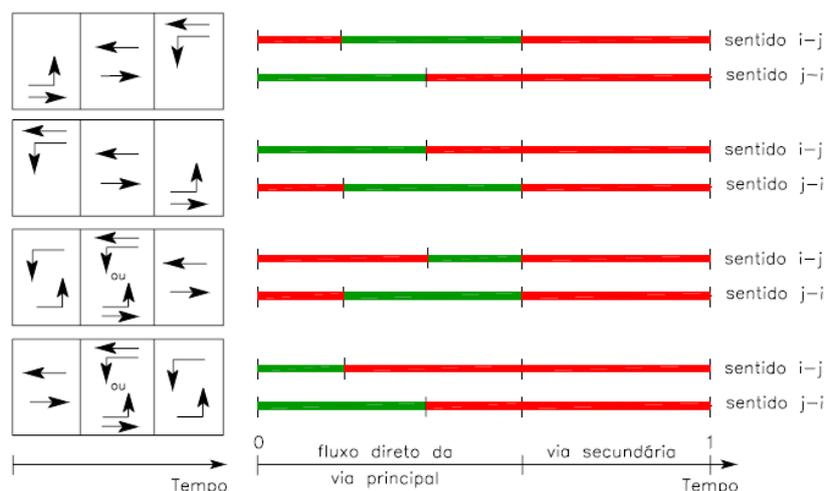


Figura III.6: Quatro Padrões para Fases de Conversão à Esquerda

(Fonte: LITTLE *et al.*, 1981)

O programa determina as divisões das fases baseado nas proporções de volume-capacidade segundo o método de WEBSTER e COBBE (1966), e seleciona o ciclo que maximiza a porcentagem de eficiência da banda de progressão para a escolha da solução de progressão ótima, semelhante ao procedimento de duas fases descrito por BLEYT. Uma medida de ganho (*attainability*) é utilizada para avaliar o quão boa é a solução de progressão para determinada condição de tráfego e proporção de verde, mensurando a habilidade de determinada estratégia de progressão em utilizar as progressões verdes disponíveis das interseções da rede. Esta medida de ganho seria igual a 100% caso as larguras das bandas bidirecionais fossem iguais à menor duração dos verdes em cada direção (DUTRA, 2005).

Com o objetivo de garantir que pelotões de veículos atravessassem o sistema semaforizado sem realizarem paradas durante o tempo de verde, em função de filas formadas por movimentos de conversão vindos das vias secundárias ou por manobras de estacionamento, o programa *PASSER* avalia um tempo adicional na banda de passagem para permitir a limpeza da fila antes que o pelotão chegue a uma determinada interseção, calculado a partir do número médio de veículos na fila no início do verde, do momento do início da fila e da capacidade do fluxo do movimento em questão.

Segundo a MCTRANS (2009), a versão V-03 do *PASSER* (2004), utiliza a metodologia do HCM para calcular os tempos de cada sinal e análise de sinais isolados. Esta versão contém um novo modelo de simulação mesoscópico para avaliar o desempenho dos

sistemas lineares semafóricos, semelhante ao modelo usado no TRANSYT-7F, e incorporando as ferramentas usadas nas versões II-02 e III-98, como as de análise do volume e do Atraso / Ciclo. A versão II-02 (2002), foi desenvolvida para otimizar uma progressão ao longo de vias arteriais sinalizadas com múltiplas seqüências de fases. Entre os recursos destacam-se a atualização do módulo para cálculo do fluxo de saturação, um resumo dos resultados para todos os ciclos analisados e um novo Diagrama Espaço x Tempo. Já a versão III-98 (1998), para *Windows 95/98*, permite otimizar e minimizar o atraso ou filas internas nas interseções. Também fornece medidas de desempenho que incluem o controle do atraso, grau de saturação, proporção de parada, retorno máximo da fila, consumo de combustível e custo. Possibilita ainda otimizar semáforos em um trevo rodoviário. A versão IV-96 (1996) foi elaborada para ambiente DOS e possibilita otimizar semáforos de uma pequena rede viária.

III.4.7. MAXBAND - *Maximal Bandwidth Program*

Em 1980, adequações no método *Mixed-Integer Linear Programming* foram realizadas para o desenvolvimento do programa MAXBAND - *Maximal Bandwidth Program* (LITTLE *et al.*, 1981), de coordenação entre semáforos com múltiplas fases em corredores arteriais ou em sistemas compostos por até três vias conectadas (redes de formato triangular), buscando a solução através da técnica de decisão *branch-and-bound* e análise dos resultados. No procedimento *branch-and-bound*, os dois primeiros semáforos são avaliados inicialmente, com a definição de suas equações para o problema de programação linear e a determinação da melhor solução. Em seguida, os demais semáforos são adicionados ao problema, até que todos tenham sido avaliados.

A partir das características geométricas da rede, o programa foi desenvolvido com as seguintes peculiaridades: escolha automática do tempo de ciclo e velocidades, ambos obedecendo determinadas tolerâncias; defasagens, procurando maximizar a largura da banda; seleção da melhor direção ou último padrão para giro à esquerda, ordenando a fase para o retorno (conforme ilustrado na Figura III.6), buscando maximizar e equilibrar a combinação das larguras da banda; inclusão de um tempo de “limpeza” da fila para o fluxo secundário acumulado durante o vermelho; aceitação de pesos específicos para bandas de verde em cada direção, e controle de uma rede simples na forma de circular (loop), por três artérias triangulares. Porções de verde podem ser

dadas ou, alternativamente, fluxos e capacidades, e porção de verde podem ser calculados usando o método de WEBSTER.

A otimização emprega uma parte do algoritmo de LAND e POWELL (1973), MPCODE, podendo controlar eficazmente até 12 semáforos.

A geometria básica é apresentada na Figura III.7 e a formulação do modelo de otimização é mostrada a seguir:

- $b(\bar{b})$: largura de banda, sentidos *outbound* (saída) e *inbound* (entrada), em ciclos;
- S_i : i-ésimo semáforo ($i = 1, \dots, n$);
- $r_i(\bar{r}_i)$: tempo de vermelho do semáforo S_i , sentido *outbound* / *inbound*, em ciclos;
- $w_i(\bar{w}_i)$: tempo medido a partir do final do vermelho no semáforo S_i até encontrar a banda verde no sentido *outbound* / *inbound*, em ciclos;
- $t(h,i)[\bar{t}(h,i)]$: tempo de viagem do automóvel a partir do semáforo S_h para o semáforo S_i no sentido *outbound* e (S_i para S_h no sentido *inbound*), em ciclos;
- $\phi(h,i)[\bar{\phi}(h,i)]$: tempo medido a partir do centro do vermelho do semáforo S_h no sentido *outbound* / *inbound* para centro de um vermelho particular do semáforo S_i no sentido *outbound* / *inbound*, em ciclos. Os dois vermelhos são escolhidos de tal forma que cada um está imediatamente à esquerda ou direita da banda verde no sentido *outbound* / *inbound*;
- Δ_i : tempo medido no semáforo S_i a partir do centro do vermelho no sentido *inbound* (\bar{r}_i) para o próximo centro do vermelho no sentido *outbound* (r_i), medido em ciclos. Este tempo é positivo, se o centro de r_i está à direita do centro de \bar{r}_i ;
- $\tau_i(\bar{\tau}_i)$: tempo de liberação de fila no semáforo S_i no sentido *outbound* e *inbound*, em ciclos.

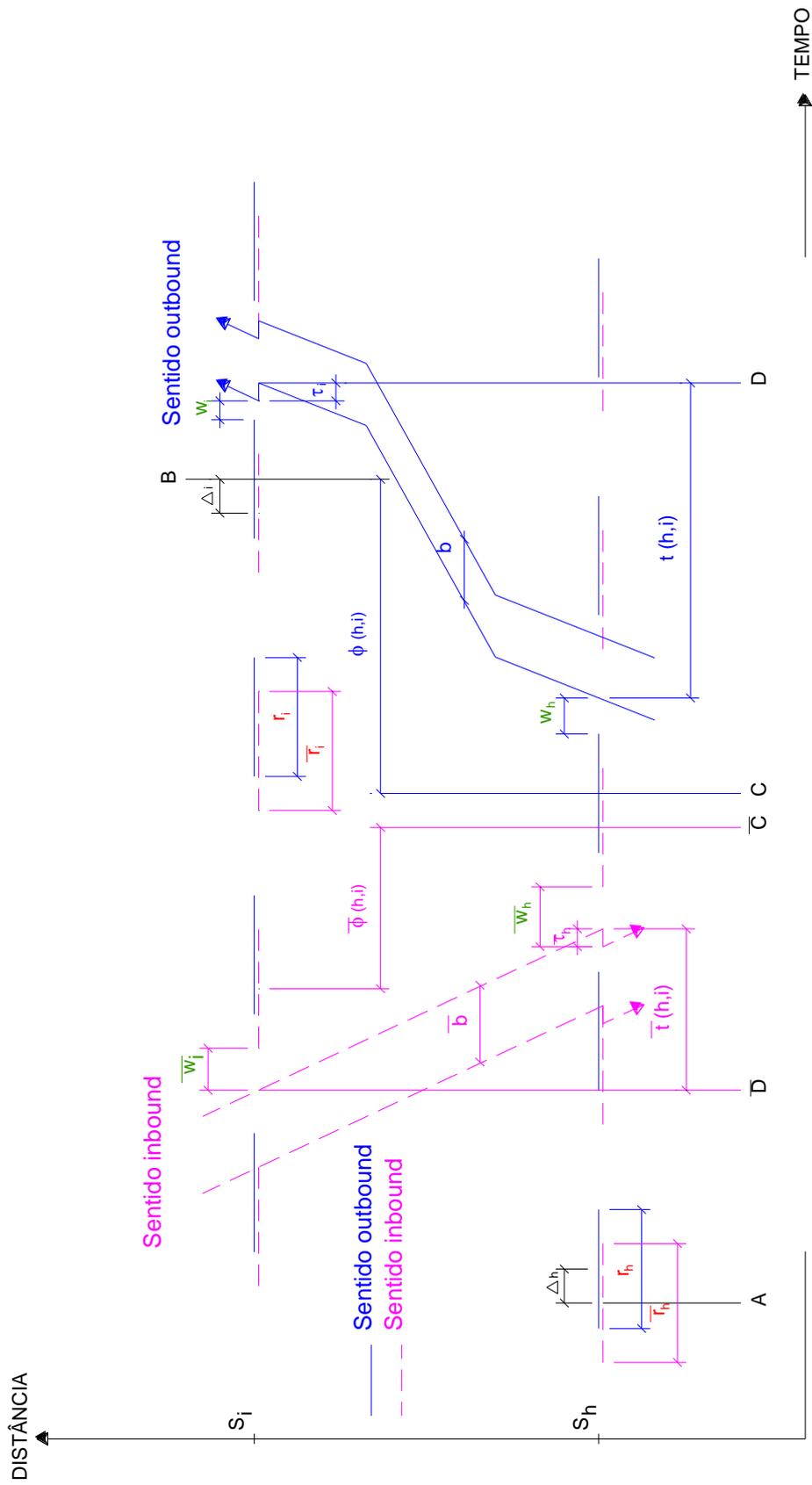


Figura III.7: Representação Gráfica das Variáveis Envolvidas no Modelo
 (Fonte: LITTLE, 1996)

Em 1986, o programa foi adaptado também para ser utilizado para coordenação de redes semaforizadas constituídas por várias vias arteriais, gerando a versão MAXBAND-86, que resulta em progressões com bandas de largura uniforme, buscando atender o tráfego nas vias principais sem deteriorar o desempenho das vias secundárias (STAMATIADIS e GARTNER, 1996).

III.4.8. MULTIBAND - *Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme*

GARTNER *et al.* (1990) desenvolveram em 1989 o método MULTIBAND - *Variable-Bandwidth Arterial Progression Scheme* como uma extensão do programa MAXBAND, realizando a otimização através da programação linear inteira mista e incorporando no procedimento de cálculo um critério sistemático de dependência do volume de tráfego.

Pesos diferentes são atribuídos para cada segmento da via arterial, proporcionais às respectivas taxas de fluxo e capacidade dos segmentos, além de uma série de variáveis de decisão e de restrição, para obtenção simultânea das progressões proporcionais aos volumes nos segmentos e da menor quantidade de paradas e atraso, gerando uma nova função objetivo para o cálculo da banda (B), conforme demonstra a Equação III.17.

$$\text{Maximiza } B = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_{ij}b_{ij} + a_{ji} + b_{ji}) \quad (\text{III.17})$$

Onde:

- n : variáveis de restrição; a_{ij}
- a_{ij} (a_{ji}): pesos direcionais dos segmentos de via (volume / fluxo de saturação);
- b_{ij} (b_{ji}): largura da banda em cada segmento de via e direção.

O ciclo e a velocidade em cada segmento tornam-se variáveis a serem otimizadas dentro de limites mínimos e máximos, dando flexibilidade ao cálculo da melhor progressão. Este método determina a solução ótima, calculando o ciclo, defasagens, velocidades de progressão e seqüências das fases para maximizar a combinação das bandas individualmente atribuídas a cada seção direcional da arterial, mantendo a progressão do pelotão e resultando em bandas contínuas com larguras variáveis em cada trecho.

Diferentes cenários foram avaliados com as programações geradas pelos programas MAXBAND e MULTIBAND e simulados pelo programa NETSIM (software para simulação de redes urbanas e gerenciamento de tráfego, desenvolvido pela FHWA -

Federal Highway Administration), a fim de comparar o desempenho de cada modelo. Os resultados indicaram em todos os casos as vantagens de desempenho do MULTIBAND, com significativa redução no atraso, paradas, tempos de viagem e consumo de combustível (DUTRA, 2005).

III.5. Métodos de Minimização de Atrasos e Paradas

Uma das críticas aos métodos de maximização de banda verde é que a largura de banda é uma quantidade geométrica que pode não ser apropriada às condições de tráfego de determinada via, uma vez que em situações de elevado número de semáforos ou combinações adversas de comprimentos de interseções e velocidades, pode ser impraticável ter uma banda de progressão (GARTNER *et al.*, 1975). Mesmo as bandas geradas podem não ser efetivamente aproveitadas nos casos de formação de filas e bloqueios de cruzamentos. Desta forma, como alternativa aos métodos de maximização de banda foram desenvolvidas técnicas de coordenação que buscam minimizar uma função que combina atrasos e paradas para uma rede de semáforos, expressa da seguinte forma:

$$\text{Min } PI = \sum_{(i,j)} (\alpha \cdot D_{ij} + \beta \cdot S_{ij}) \quad (\text{III.18})$$

Onde:

- PI : Índice de Desempenho, avaliado como medida de ineficiência do sistema;
- α e β : constantes atribuídas pelo usuário como qualquer número não negativo, permitindo o balanceamento da priorização entre atrasos e paradas;
- D : atraso médio por veículo;
- S : paradas sofridas pelos veículos.

Além de considerar os efeitos determinísticos de diferentes possibilidades de ciclo, proporções de verde e defasagens nos segmentos das vias, e os efeitos estocásticos causados pelas filas que ocorrem entre um ciclo e outro, os métodos de minimização de atrasos e paradas também consideram restrições de conexão entre as vias que compõem a rede em função da duração do ciclo, ou seja, à soma algébrica das defasagens ao redor de uma quadra da rede como um número inteiro múltiplo do ciclo.

A seguir serão descritos alguns dos programas que tomam como base o critério de minimização de atrasos e paradas.

III.5.1. COMBINATION

O programa COMBINATION foi desenvolvido no TRRL - *Transport and Road Research Laboratory* e apresentado por HILLIER em 1965, como um processo sistemático para o cálculo das defasagens entre semáforos em uma área urbana, procurando minimizar atrasos e paradas em uma rede viária.

O modelo assume que o atraso do tráfego ao longo de um *link* da rede depende somente da defasagem entre os sinais situados nas extremidades do mesmo *link*, isto é, não existe influência de qualquer outro sinal da rede. Também utiliza o ciclo da interseção crítica para determinar o ciclo da rede, e calcula as proporções de verde de cada interseção.

De acordo com MAGALHÃES (1981), o programa determina os atrasos admitindo que o padrão de chegada do fluxo de veículos no final de um *link*, em uma interseção sinalizada, é idêntico ao padrão de tráfego do início do mesmo *link*. O método também incorporou o modelo de dispersão de pelotões de ROBERTSON (1997), para considerar o efeito da dispersão entre os veículos no trajeto ao longo dos trechos das vias. Já o procedimento de otimização é feito para cada *link* da rede através de uma relação entre o atraso sofrido pelo tráfego e a defasagem dos dois sinais situados nas extremidades do *link*. Em seguida, baseando-se na hipótese simplificada de que cada *link* pode ser considerado independentemente, pares de *links* da rede são combinados e a relação resultante (atraso, defasagem) para cada par é então calculada. Este processo é repetido até que a rede inteira seja reduzida a um único *link*, e a defasagem que produz o mínimo de atraso para este último *link* e, conseqüentemente, mínimo atraso global para a rede, é o resultado da combinação pela qual as ótimas defasagens de todos os *links* podem ser obtidas.

III.5.2. TRANSYT - *Traffic Network Study Tool*

O programa TRANSYT - *Traffic Network Study Tool*, elaborado para simulação de tráfego e otimização semaforica em vias arteriais e redes, foi criado em 1967 pelo Dr. DENNIS I. ROBERTSON, no RRL - *Road Research Laboratory* (hoje TRL - *Transport Research Laboratory / United Kingdom*). Pode ser definido como um procedimento

mesoscópico que determina planos semafóricos de tempo fixo e defasagens, tendo como objetivo minimizar atrasos e número de paradas dos veículos, onde os fluxos médios do tráfego são conhecidos. Através da avaliação do desempenho do sistema, pela simulação do fluxo de tráfego ao longo da rede, considera os padrões de chegada, de saída e de saturação do tráfego em cada aproximação, enquanto busca minimizar uma combinação linear de atraso e parada (VINCENT *et al.*, 1980).

O princípio de funcionamento e a estrutura básica da estratégia de controle do TRANSYT é apresentado no fluxograma abaixo (Figura III.8).

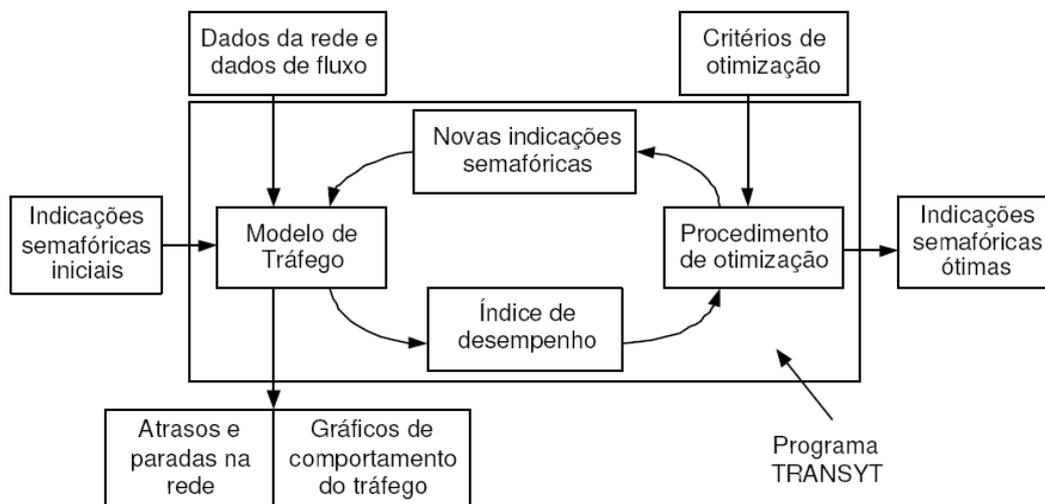


Figura III.8: Modelo TRANSYT (Fonte: CERVANTES, 2005)

Atribuindo pesos aos atrasos e paradas sofridas pelos veículos que percorrem os segmentos viários da rede, e através de um procedimento de otimização, que alterna entre pequenas e elevadas alterações dos tempos de cada semáforo, o programa procura minimizar uma função de desempenho do fluxo de tráfego. O valor desta função objetivo é denominado Índice de Desempenho PI (*Performance Index*), conforme demonstrado na Equação III.19, que evoluiu ao longo do tempo nas novas versões, incorporando elementos para avaliação.

$$PI = \sum_{i=1}^n (W \cdot w_i \cdot d_i + (K/100) \cdot k_i \cdot S_i) \quad (III.19)$$

Onde:

- n : número de links da rede ;
- W : custo médio por unidade de atraso;
- w_i : coeficiente de ponderação de atraso no link i ;

- d_i : atraso médio no link i ;
- K : custo médio para 100 unidades de parada;
- k_i : coeficiente de ponderação do número de paradas no link i ;
- S_i : número médio de paradas no link i .

O programa utiliza um método de busca iterativa, denominado *Hill-climbing*, para obter valores consecutivamente menores para o Índice de Desempenho (PI), através de alterações nas defasagens e duração dos estágios na rede. Este processo leva o programa a obter “ondas verdes” multidirecionais na rede, diminuindo os tempos de viagem em seu interior (BARRA, 1999).

O modelo foi elaborado com Perfis Cíclicos de Tráfego (*Cyclic Flow Profile-CFPs*). Este procedimento armazena os fluxos médios das interseções semaforizadas, em pequenos intervalos de tempo durante um ciclo, levando em consideração os efeitos da dispersão dos pelotões em cada segmento da rede em função do tempo de percurso. Isto demonstra que o programa é sensível a qualquer alteração na programação semafórica que possa repercutir nos fluxos, filas e parada dos outros semáforos. Um exemplo do Perfil Cíclico de Tráfego é apresentado abaixo, Figura III.9.

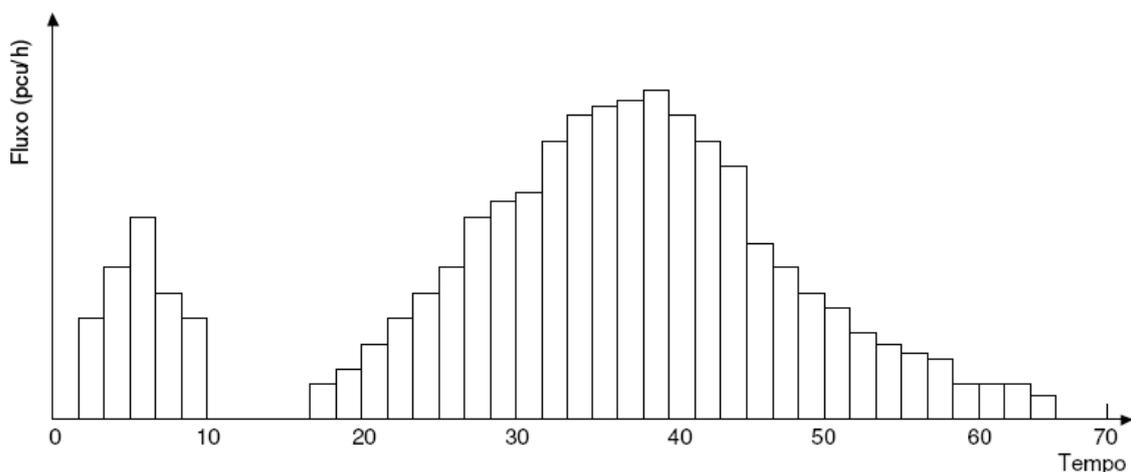


Figura III.9: Exemplo de um Perfil Cíclico de Tráfego (Fonte: ENDO, 2006)

O sistema assume que todas as interseções na rede são controladas por semáforos, ou por uma regra de prioridade, que todos os semáforos da rede têm um ciclo comum ou metade deste valor e que o fluxo de tráfego médio das correntes de tráfego num determinado período é conhecido, assumindo-o constante (VINCENT *et al.* 1980).

O TRANSYT simplifica o comportamento do tráfego admitindo que os veículos no link não sofrem atraso até chegar à linha de retenção, ou ao final da fila, quando a indicação semaforica está vermelha, ou quando a fila não for desfeita totalmente, pois o tráfego de chegada sofrerá uma parada instantânea. Também é assumido que a fila é descarregada na linha de retenção durante o período de verde efetivo atingindo instantaneamente a velocidade de cruzeiro. Deste modo, os instantes dentro do ciclo nos quais os veículos se unem e deixam a fila são, portanto, deslocados para definir o verde efetivo (período verde e amarelo), que é realmente usado pelo tráfego (Figura III.10).

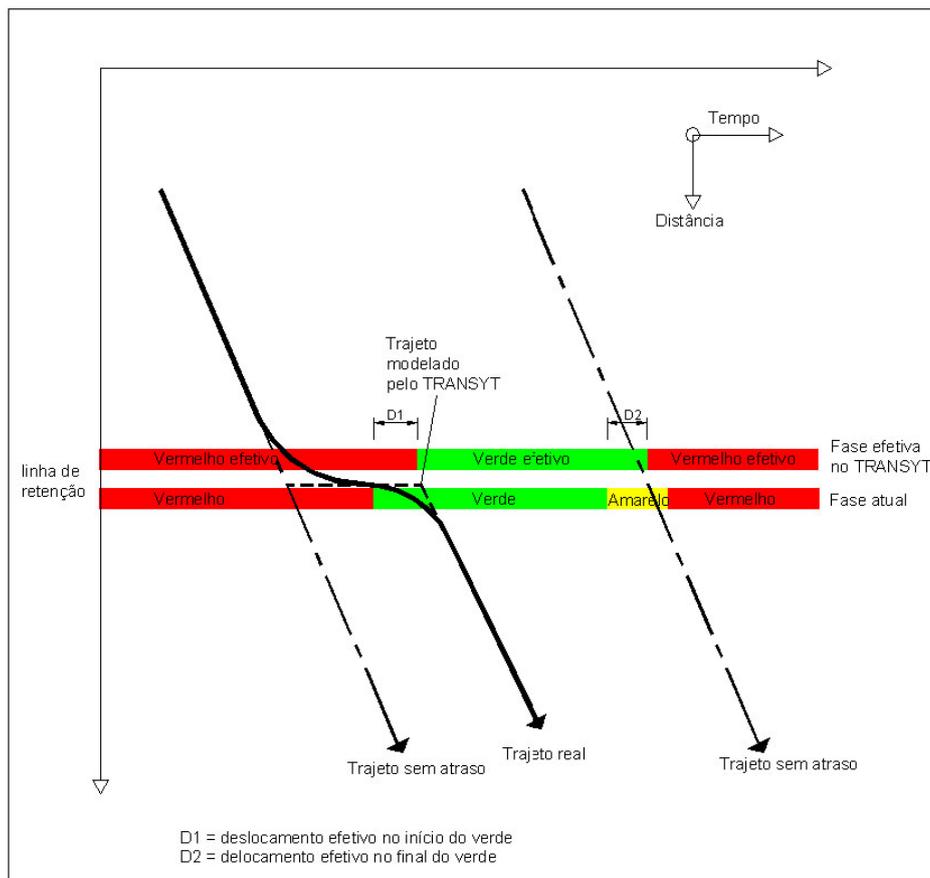


Figura III.10: Modelagem do Comportamento do Tráfego no TRANSYT

(Fonte: VINCENT *et al.*,1980)

O otimizador utiliza a distância entre semáforos, limites de variação do ciclo, velocidades nos segmentos viários, número de faixas, fases mínimas, fluxos de saturação e volumes de meio de quadra e de conversões, para buscar soluções locais de defasagens e divisões para cada semáforo, repetindo o cálculo diversas vezes, até que não seja possível obter melhorias no desempenho operacional na via. A distância total

vijada é obtida para todos os veículos que circulam na rede, assim como o atraso total sofrido e o número total de paradas.

Durante a otimização das defasagens, todos os instantes de mudança de estágio de um nó são deslocados simultaneamente, sem alterar os tempos de verde de cada estágio. No TRANSYT é possível otimizar os tempos de verde deslocando os instantes de mudança de estágio em cada nó individualmente com o objetivo de reduzir o índice de desempenho da rede. A alteração nos tempos de verde em cada nó é limitada aos tempos de verde mínimos. Para eliminar a necessidade de se especificar uma configuração inicial, os tempos de verde dos estágios em cada nó podem ser calculados pelo software, com o critério de que o grau de saturação das aproximações críticas em cada nó seja o mesmo.

Segundo OZELIM e JACQUES (2008), a dispersão dos grupos de veículos ao longo de interseções sucessivas, realizada pelo TRANSYT, é baseada na teoria de que um pelotão de veículos a partir de uma interseção a montante se dispersa continuamente à medida que viaja até a interseção a jusante ao longo de um link. Um pelotão é um grupo de veículos retidos na linha de parada de um semáforo, pronto para se movimentar. O programa utiliza um procedimento, em suas rotinas, para determinar a intensidade de dispersão do fluxo de tráfego através da utilização do fator de dispersão de pelotões, procurando obter boas progressões do tráfego ao longo dos cruzamentos sucessivos, a uma velocidade constante, sem serem parados pelo vermelho. O Fator de Dispersão de Pelotões (PDF), único parâmetro para calibração, é uma constante empírica que depende das características da via. Para cada etapa, o fluxo de chegada em uma linha de parada de um nó é determinado pela Equação III.20.

$$v'_{(t+bT)} = F.v_t + [(1-F).v'_{(t+bT-1)}] \quad \text{(III.20)}$$

Onde:

- $v'_{(t+bT)}$: taxa de fluxo esperada na etapa $(t + bT)$;
- v_t : taxa de fluxo do pelotão inicial durante a etapa t ;
- b : valor empírico, geralmente 0,8;
- T : tempo de viagem no *link*;
- F : fator de suavização.

O fator de suavização F é obtido pela Equação III.21:

$$F = (1 + a.b.T)^{-1} \quad (\text{III.21})$$

Onde:

- a : é o Fator de Dispersão de Pelotões (PDF).

Esse parâmetro é utilizado pelo TRANSYT para representar o deslocamento dos veículos e calcular as medidas de desempenho, e pode variar no intervalo de zero a um. A interpretação dos valores do PDF é apresentada no Manual do Usuário (WALLACE *et al.*, 1998) e estabelece intervalos de acordo com a característica da via: valores acima de 0,5 indicam presença de estacionamentos, conversões moderadas a pesadas e tráfego de pedestres, típico de uma via urbana; valores entre 0,35 e 0,50 representam via com algumas conversões e fraco fluxo de pedestres; vias com PDF inferior a 0,25 não têm muitas interferências.

O programa foi estabelecido como modelo internacional de comparação com os demais sistemas de controle semafórico (GREEN e ROBERTSON, 1974), tendo sido dentro da coordenação semafórica, provavelmente o mais citado, conhecido e utilizado na engenharia de tráfego, merecendo especial atenção no relato de seu desenvolvimento ao longo das últimas quatro décadas. Até mesmo o Manual de Semáforos do DENATRAN (1984) reservou um capítulo somente para a apresentação do TRANSYT, indicando-o como programa para coordenação e otimização de semáforos.

III.5.3. MITROP - *Mixed-Integer Traffic Optimization Program*

Normalmente, o procedimento para calcular as variáveis de controle de tráfego na coordenação semafórica era feito de forma seqüencial, em três estágios: um ciclo comum, geralmente aquele da interseção mais carregada, era selecionado a fim de ser sincronizado em toda rede; a proporção de verde de cada semáforo era calculada de acordo com valores de fluxo/capacidade; e posteriormente as defasagens eram estabelecidas para a coordenação entre semáforos. Porém estes três estágios não são independentes, e o processo de decisão seqüencial pode degradar significativamente o desempenho do sistema, sem necessariamente resultar na solução ótima (DUTRA, 2005).

O método computacional MITROP – *Mixed-Integer Traffic Optimization Program*, foi apresentado por GARTNER *et al.* (1975) e utilizou a programação *Mixed-Integer Linear* proposta por LITTLE para coordenação semafórica em rede, aliada a um procedimento de otimização simultânea e global das variáveis interdependentes que afetam o desempenho dos semáforos (ciclo, proporções de verde e defasagens). Estas variáveis são avaliadas juntamente com as funções de desempenho do tráfego (atraso por veículo e filas), com o objetivo de serem minimizadas.

O software também utiliza a técnica *branch-and-bound* para determinar simultaneamente os valores ótimos das variáveis de controle semafóricas e os valores inteiros dos laços da rede. Dados geométricos da rede, assim como as velocidades, os volumes, os comprimentos dos pelotões e o fluxo de saturação em cada segmento de via são considerados para a coordenação, gerando a programação semafórica (ciclo, divisões e defasagens) na busca do ponto de equilíbrio entre atrasos causados por efeitos determinísticos e estocásticos.

III.5.4. INTEGRATION

O modelo INTEGRATION foi desenvolvido por MICHEL VAN AERDE, na década de 80, durante sua dissertação na Universidade de Waterloo no Canadá, para aplicação em redes de tráfego e vias expressas (DEMARCHI e DUTRA, 2004a). Este modelo é dinâmico e estocástico, podendo representar o movimento individual do veículo e a relação fluxo-velocidade entre os veículos. Este programa é caracterizado como um modelo microscópico de simulação do tráfego, pois modela individualmente a velocidade, a aceleração e a movimentação lateral e longitudinal dos veículos ao longo de suas rotas a cada décimo de segundo. Sua representação é feita de forma simplificada, através de modelos matemáticos integrados a um sistema real, o que possibilita avaliar sistemas complexos e com cenários alternativos (RAKHA, 2004).

O INTEGRATION permite analisar diversos cenários de forma global e agregada, e é capaz de representar diversos elementos componentes em uma rede de tráfego, tais como vias expressas, mudanças de faixas, interseções semaforizadas ou com dispositivos do tipo “PARE” e “Dê a Preferência”, trechos de convergência, divergência e fluxo de entrelaçamento, entre outros aspectos, sendo uma ferramenta capaz de representar de forma bastante realista todo o sistema. Para realizar a simulação o

programa necessita da capacidade e da relação fluxo-velocidade em cada tramo, do plano semaforico, do comprimento do ciclo, tempo de verde, volume de tráfego, dados de origem e destino e configuração da geometria da via. Uma característica interessante do programa é a possibilidade de visualização durante a simulação, possibilitando a identificação dos fenômenos que nele ocorrem, tais como formação de filas e escolha da rota. Essa característica facilita detectar possíveis erros na validação. Além disso, o programa tem uma alta flexibilidade em simular cenários, podendo ser ajustado para qualquer geometria de interseção (BEZERRA, 2007).

De acordo com MICHAEL VAN AERDE (RAKHA e VAN AERDE, 1996; RAKHA, 2004), a busca de um método que lidasse com problemas integrados de controle foi inspirada nos artigos de ROBERTSON do início da década de 80, e influenciada pelos principais modelos de simulação de tráfego da época, como o programa TRANSYT. O software INTEGRATION é capaz de modelar a dispersão microscópica do pelotão e também realizar a coordenação entre semáforos baseado nos padrões cíclicos de tráfego (*cyclic flow profiles-CFPs*), minimizando a cada ciclo a combinação entre atraso e paradas através do índice de desempenho PI semelhante ao TRANSYT.

Para utilizar este simulador é necessário calibrar o programa com uma série de dados provenientes de arquivos de entrada do tipo texto. Segundo RAKHA (2004), seis arquivos de entrada devem ser obrigatoriamente utilizados para a simulação, e são chamados de arquivos fundamentais:

- Arquivo mestre: especifica os parâmetros globais da simulação como sua duração, a localização e os nomes dos arquivos de entrada e de resultados, e a frequência de saída dos dados estatísticos;
- Arquivo de nós: contém as coordenadas cartesianas dos nós da rede, representando as interseções ou os pontos de mudança nas características geométricas das vias;
- Arquivo de trechos: promovem a ligação entre os nós da rede e representam os segmentos das vias por onde os veículos trafegam, contendo seus comprimentos, o número de faixas de cada trecho e os parâmetros que definem a relação entre fluxo, velocidade e densidade, ou seja, a velocidade de fluxo livre, a velocidade na capacidade, a capacidade e a densidade de congestionamento;

- Arquivo de semáforos: contém informações sobre a programação semaforica, relacionando ciclos, defasagens, número de fases, proporções de verde, tempos perdidos e intervalos de otimização;
- Arquivo da matriz O-D: contém a matriz das viagens realizadas entre diferentes pontos de origem e destino da rede, indicando a magnitude de cada demanda, o instante de início e fim de sua geração, o padrão de geração das viagens e a composição veicular;
- Arquivo de incidentes: contém informações que permitem simular a ocorrência de incidentes, tais como o fechamento temporário de uma faixa de tráfego, e caso não haja nenhum incidente a ser simulado este arquivo vazio deverá constar nos dados de entrada.

Alguns parâmetros adicionais podem ser incluídos em arquivos opcionais, denominados arquivos avançados, tais como:

- Arquivo de greides: contém informações sobre a magnitude dos greides dos trechos codificados na rede;
- Arquivo de utilização das faixas: permite que o usuário especifique faixas exclusivas para determinados movimentos ou faixas proibidas para certos tipos de veículos;
- Arquivo de características veiculares: contém os parâmetros relacionados ao desempenho dos diferentes tipos de veículos, tais como peso e potência do motor.

As informações contidas nos arquivos de dados definem os parâmetros para as lógicas fundamentais modeladas microscopicamente pelo programa, tais como: relação interveicular (*car-following*), que representa o fluxo de tráfego através da relação entre fluxo, velocidade, espaçamento entre veículos e densidade em cada segmento de via; mudanças de faixa em função da geometria da via e da rota utilizada pelo veículo (mudanças obrigatórias) ou para aumento da velocidade (mudanças desejáveis); e aceleração em função do espaçamento interveicular e do desempenho do veículo frente às forças de tração e de resistência ao movimento.

O programa também possibilita a modelagem de praças de pedágio, das emissões de poluentes pelos veículos, assim como a análise de gráficos em tempo-real e de estatísticas de veículos de sondagem ou investigação (*probes*), sendo capaz de simular

redes com até 1.000 semáforos, 10.000 trechos, 100.000 pares origem-destino e 500.000 veículos na simulação, na sua versão de maior capacidade dentre as quatro versões disponíveis.

III.5.5. SCOOT (*Split Cycle and Offset Optimisation Technique*)

O SCOOT (*Split, Cycle, and Offset Optimisation Technique*) é um sistema computadorizado de controle centralizado de tráfego adaptativo em tempo real (*on line*), desenvolvido no *Transportation and Road Research Laboratory* (Inglaterra), que tem como princípio realizar ajustes nos tempos de verde, ciclo e defasagem dos semáforos, em cada instante, para se adaptar às condições atuais do tráfego. Também procura minimizar o número de paradas e o atraso sofrido pelos veículos em todas as aproximações da rede semaforizada, simulando o efeito de pequenas alterações em suas programações semaforicas, de acordo com a variação do tráfego (PAIVA NETO *et al.*, 2003).

Os princípios gerais do método SCOOT são os mesmos do modelo TRANSYT, inclusive o critério de otimização, sendo que o primeiro atua em tempo real e o outro em tempo fixo.

O sistema detecta o fluxo de tráfego, através de laços detectores instalados em todas as aproximações das interseções controladas, com o objetivo de otimizar a rede. Estes laços devem estar obrigatoriamente antes da linha de retenção, para que haja tempo suficiente do sistema realizar todo o processamento em um curto espaço de tempo (normalmente entre 8 a 12 segundos antes dos veículos chegarem na linha de retenção), e implementar as modificações a tempo de favorecer os veículos que foram detectados. Por este motivo o SCOOT é considerado totalmente responsivo, pois os tempos dos sinais são calculados para escoar os veículos que estão sendo detectados no momento e não para os veículos que chegam no ciclo seguinte (TRL, 2000).

O modelo utiliza três otimizadores, que realizam frequentes alterações incrementais nas porções de verde (*split*), defasagens (*offset*) e ciclo, com o objetivo de minimizar atrasos e paradas. Estes otimizadores realizam pequenas alterações na programação semaforica vigente, implementando as que resultem em benefícios (LOUREIRO *et al.*, 2002b).

O otimizador das porções de verde verifica, antes de iniciar o próximo estágio, se atrasar, adiantar ou manter a entrada do estágio seguinte gera uma melhoria na saturação das aproximações da interseção. Assim, o sistema reage a variações aleatórias de ciclo a ciclo, mantendo a tendência de variação na demanda de fluxo. Para evitar distúrbios, as mudanças nos tempos de estágio são limitadas para um máximo de 8 segundos em cada interseção. Já o otimizador de ciclo avalia, a cada 5 ou 2,5 minutos (devido às condições de tráfego), para cada área de controle, se o ciclo comum em todas interseções controladas deve ser alterado para garantir 90% de saturação nas aproximações de cada interseção. As mudanças no ciclo são limitadas para um máximo de 8 segundos com o objetivo de manter uma estabilidade na operação. Por sua vez, o otimizador de defasagens avalia, a cada ciclo, a necessidade de alterar a defasagem de cada interseção da área de controle (grupos de interseções semaforicas adjacentes que operam num mesmo tempo de ciclo), para reduzir a quantidade de atrasos e paradas nas aproximações das interseções. Para tal, utiliza um índice de desempenho (*performance Index*), que leva em consideração estes parâmetros, com o propósito de trazer benefícios à progressão dos pelotões de tráfego que estão imediatamente atrás (montante) e a frente (jusante) da interseção. A decisão tomada é implementada no ciclo seguinte e as mudanças também são limitadas a um máximo de 8 segundos (TRL, 2000).

Os dados resultantes do processo de modelagem efetuado pelos otimizadores do sistema são armazenados em um banco de dados denominado de ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*). Este banco de dados consiste num *software* projetado para compilar dados do tráfego a partir de mensagens periódicas geradas pelo SCOOT.

O ASTRID armazena dados do tráfego compilados em períodos agregados de 15 minutos em uma base de dados específica no sistema SCOOT. Esta base pode ser consultada por técnicos para análises das condições do tráfego. Além disto, no caso de falhas do funcionamento dos detectores em campo, os dados históricos respectivos armazenados pelo ASTRID são usados pelo sistema para efetuar a modelagem e controle do tráfego (MENEZES, 2003).

III.5.6. SIRI

O SIRI (Simulador de Redes de Semáforos), desenvolvido pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET-SP), é um simulador mesoscópico, em forma

de programa de computador, voltado ao cálculo de programações semaforizadas coordenadas há tempos fixos. O método determina os tempos de ciclo, verde e defasagens de uma rede de semáforos, com o objetivo de minimizar atrasos e paradas dos veículos, respeitadas as condições da segurança viária (VILANOVA, 2007).

O desenvolvimento do programa levou quatro anos e sua primeira versão ficou disponível no início de 2004. Após sua aplicação em cerca de 50 semáforos, foi lançada em abril de 2005 a versão 2.0, que incorpora vários recursos solicitados pelos técnicos que acompanharam em campo a implementação das programações da primeira versão. Atualmente, existem 118 semáforos, em São Paulo, que operam segundo as programações semaforizadas calculadas pelo SIRI (CET-SP, 2005).

O motivo do desenvolvimento deste software foi devido à inadequação dos simuladores estrangeiros a algumas das peculiaridades brasileiras, como, por exemplo, casos de ciclos duplos assimétricos, botoeiras de pedestres chamando estágios específicos em cruzamentos e tempos de verde de segurança configurados por grupo semaforizado e não por estágio.

O modelo representa a rede semaforizada através de nós, que representam as interseções semaforizadas e *links*, que representam os fluxos unidirecionais de veículos entre dois nós. A Figura III.11 apresenta a tela principal do programa, com o desenho dos nós e *links* que esquematizam a rede de semáforos.

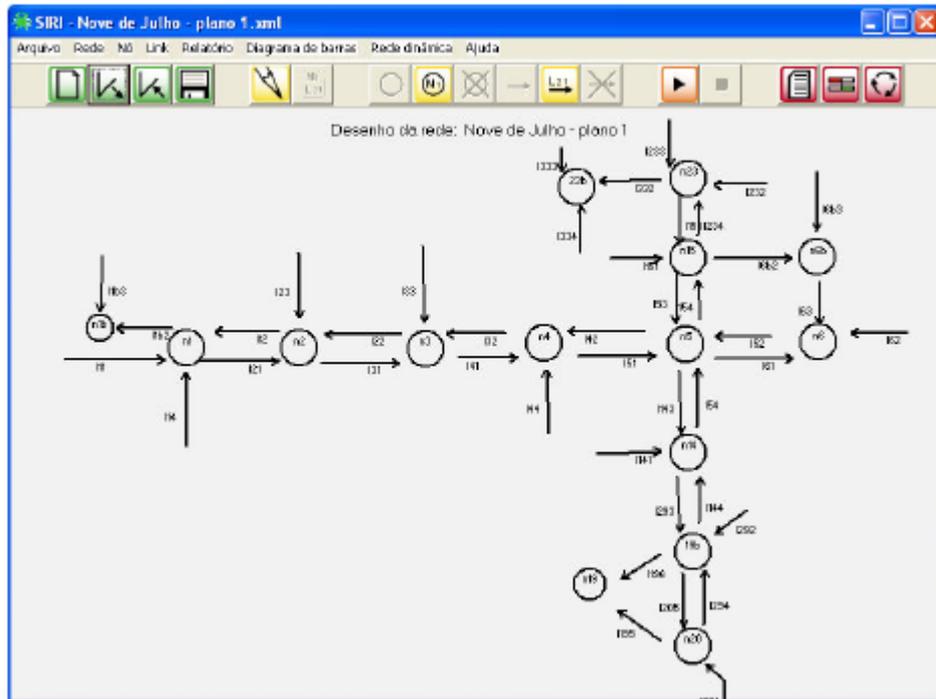


Figura III.11: Tela Principal do SIRI (Fonte: VILANOVA, 2007)

O modelo simula a rede em duas etapas, durante um certo período de tempo. A primeira tem a função de permitir que todos os veículos que vêm de fora da rede possam preencher todos os *links* de forma a assegurar que o processo entrou num regime estável de distribuição de fluxos. Na segunda etapa são contabilizados atraso e paradas.

O programa não leva em consideração o processo de dispersão veicular, pois a evolução dos perfis de tráfego observada nas vias urbanas indicou que a tendência de desmanche dos pelotões de veículos só ocorre a partir de distâncias superiores a 300 metros, quando o fator coordenação já perde muito de sua importância devido às entradas e saídas intermediárias. Porém, contabiliza a fila de veículos em cada *link*, à medida que eles se acumulam, devido ao semáforo em vermelho ou devido à existência de veículos parados antes da retenção. Também analisa a possibilidade dos veículos de um *link* não conseguirem passar para o *link* seguinte devido à existência neste de uma fila que já ocupe toda sua capacidade de armazenamento. Tal análise é fundamental quando lidamos com situações de congestionamento. A informação contínua da situação das filas permite calcular o número de paradas e o atraso em cada *link*, bem como a fila máxima que ocorreu durante o período de simulação e detectar um eventual "estouro de caixa" (VILANOVA, 2007).

O SIRI calcula o ciclo, válido para toda a rede, os tempos de verde, vermelho e as defasagens entre os semáforos. O ciclo é determinado através do grau de saturação, utilizando a mesma metodologia usada pelo sistema SCOOT. Com relação à determinação dos tempos de verde, o modelo identifica, inicialmente, quais são os *links* críticos em cada um dos semáforos, calculando os mesmos segundo o critério da equalização dos graus de saturação entre os *links* críticos. As defasagens são calculadas para a rota principal, aonde os maiores fluxos de contribuição vão configurando a seqüência dos *links*, até que não haja contribuição para mais ninguém. Uma vez determinada a rota principal da rede, as rotas secundárias vão sendo construídas, vinculadas à principal por um ou dois *links*. A idéia é de linearizar uma malha fechada e estabelecer uma prioridade entre os nós, na definição de suas defasagens.

Os principais dados de entrada no SIRI são: fluxo veicular, nó origem e nó destino, tempo de percurso, quantidade de grupos semaforicos, seqüência dos estágios, tempos de amarelo e de vermelho de limpeza e quantidade de acionamentos de botoeiras de pedestres (para nós com este tipo de demanda). Opcionalmente pode ser fornecido o tempo de ciclo, grau de saturação meta ou limite, peso da parada, defasagem fixa em relação a um nó configurado como mestre da rede e proibição da utilização de ciclo duplo.

Ao final o software disponibiliza o Relatório de Saída, onde são repetidos os dados de entrada e apresentados os resultados (tempo do ciclo, número de paradas, atraso, fila máxima, etc), o Diagrama de Barras resultante para cada nó, para auxiliar a análise dos resultados e a Formação Dinâmica de Filas, onde é possível visualizar o desenho da rede, com seus *links* em verde, amarelo ou vermelho à medida que transcorre o período de simulação. Também é exibida a formação e o desmanche das filas, como um traço proporcional à capacidade de armazenamento do *link*.

O SIRI foi comparado pela CET-SP, para efeito de verificação e validade, com o TRANSYT, mostrando consistência tanto na questão dos parâmetros calculados quanto na questão dos indicadores, sendo implantado na cidade de São Paulo de forma satisfatória pelos gestores de tráfego. Contudo, por ser um programa novo, ainda não pode ser considerado detentor da mesma solidez de outros que já operam há décadas, necessitando ter uma aplicação prática numa grande quantidade de locais para poder ser um programa plenamente adaptado às necessidades brasileiras (CET-SP).

III.6. Métodos Combinados

O método da maximização da largura da banda sempre foi bem aceito na aplicação em vias arteriais, mas uma das dúvidas em relação à sua eficiência é se a solução ideal para a arterial causava prejuízos às vias secundárias. Esta abordagem também não produz bons resultados em redes bidirecionais, pois a largura máxima da banda não minimiza necessariamente os atrasos e paradas do tráfego que circula pela arterial (WALLACE e COURAGE, 1982). Em contrapartida, a estratégia da minimização dos atrasos, paradas e filas adapta-se bem na otimização em redes, produzindo melhor desempenho geral do sistema, mas não foi bem aceita para aplicações em arteriais, pois não elimina as paradas do tráfego nas interseções ao longo das principais vias.

Ao longo da década de 70, muitos pesquisadores avaliaram os benefícios dos métodos disponíveis para programação semafórica (ROGNESS e MESSER, 1983), emitindo suas opiniões a respeito da utilidade isolada de cada técnica. Basicamente, o método de progressão pela máxima largura da banda foi indicado apropriado para ser utilizado nos casos de volumes baixo ou moderado, enquanto a otimização dos atrasos e paradas deveria ser utilizada para saturações altas.

Constatando que a fraqueza de um método pode ser considerada o ponto forte do outro e vice-versa, as técnicas de maximização da largura da banda verde e da minimização de atraso e paradas foram consideradas complementares, sugerindo que o uso de ambas estratégias combinadas poderia melhorar substancialmente as medidas de eficiência de sistemas semafóricos. Duas opções são possíveis para aliar as vantagens de cada técnica, combinando a minimização do atraso/parada e a maximização da largura da banda: modificar o programa baseado na minimização do atraso para considerar a largura da banda (progressão) ou ajustar a programação baseada na largura da banda para reduzir o índice de atraso e paradas.

A seguir são apresentados alguns métodos computacionais combinados, propostos para unir as vantagens da técnica de maximização da largura da banda verde e da minimização de atraso e paradas, de forma seqüencial ou por otimização simultânea.

III.6.1. PASSER II / TRANSYT 6

ROGNESS e MESSER (1983) propuseram um procedimento combinado sequencial, que utiliza inicialmente o programa PASSER II de maximização da banda de progressão para selecionar o ciclo, as proporções de verde, a sequência ótima das fases e as defasagens em cada interseção, para serem utilizados como dados iniciais pelo programa TRANSYT 6 (1976), a fim de gerar uma solução de mínimo atraso no índice de desempenho em vias arteriais.

Uma pesquisa foi realizada para comparar as soluções geradas pelo TRANSYT 6 através de sua própria rotina interna de dados iniciais, e os valores obtidos pelo procedimento combinado PASSER II / TRANSYT 6, demonstrando sempre soluções diferentes para as divisões de verde em todas as situações analisadas. Em geral, as melhores soluções foram àquelas apresentadas pelo método combinado, quando comparadas à melhor solução do TRANSYT 6, embora poucos cenários tenham sido avaliados para certificar esta conclusão. Os autores concluem que embora as melhorias sejam pequenas, todas as soluções são melhores no modelo combinado, e sugerem que novas pesquisas sejam feitas com diferentes volumes, ciclos e distâncias (DERMACHI e DUTRA, 2004).

III.6.2. MAXBAND / TRANSYT-7F (versão 8)

O programa MAXBAND obtém uma solução ótima global para maximização da largura da banda, otimizando defasagens, ciclo e sequência das fases. Porém, o modelo de tráfego usado é bastante simplificado, e não considera o fluxo das vias secundárias, a dispersão e o formato do pelotão, o tráfego de conversão, e também não otimiza os tempos de verde. O programa TRANSYT utiliza a geometria da rede e os fluxos, ajustando as defasagens e os tempos de verde separadamente para minimizar o índice de desempenho (PI). Mas não atinge a solução ótima global, não otimiza a sequência das fases e depende de uma programação semafórica inicial como primeira solução. Apesar de não otimizar o ciclo, várias simulações podem ser feitas com ciclos diferentes para determinar aquele que gera a solução com menor PI.

Cohen (1983), em seu artigo, propôs a combinação destes dois programas de forma sequencial, utilizando a solução da maximização da largura da banda do MAXBAND como a programação inicial a ser utilizada para a otimização do programa TRANSYT-

7F. O objetivo é limitar o programa TRANSYT-7F com ajustes de defasagem e de tempo de verde, enquanto preserva a progressão das bandas geradas pelo programa MAXBAND, para possibilitar bandas desiguais nas duas direções, ao invés de acomodar fluxos desbalanceados.

Uma série de experimentos foi realizada para testar esta combinação em vias arteriais e determinar os efeitos produzidos na otimização, mostrando soluções melhores no método combinado do que aquela obtida por cada programa isoladamente. Os dados apontaram uma melhoria de 20% sobre os resultados obtidos pelo TRANSYT-7F com defasagens iniciais zero (aberturas simultâneas) e sem otimização da seqüência das fases, observados principalmente nos casos com permissão de conversão à esquerda na arterial.

III.6.3. TEAPAC

O **TEAPAC** (*Traffic Engineering Applications PACkage*), Pacote Aplicativo de Engenharia de Tráfego, é um programa integrado projetado para gerenciamento e análise do tráfego. Desenvolvido em 1974 e aprimorado até os dias atuais (encontra-se na versão 8, publicado em agosto de 2009), utiliza o sistema operacional *Windows 7/Vista/XP/2000*, sendo um software integrado de tráfego contendo um conjunto de programas que utilizam a mesma interface e compartilham dados entre si. Consiste de mais de uma dúzia de programas que abrangem uma ampla gama de aplicações de engenharia de tráfego, otimização semafórica e modelagem para contagem de tráfego, justificativa de sinal e estudos de impacto local (MCTRANS, 2009).

Cada uma das aplicações do programa usa um banco de dados comum com entradas e resultados. Cada função pode ser usada de forma interativa através do menu normal do sistema do *Windows* ou através de comandos manuais, permitindo também a execução de scripts em lotes para grandes ou múltiplas análises. O programa inclui funções para obtenção do tempo semafórico e análise da capacidade individual para semáforos, vias arteriais e rede; estimativa de tráfego para estudos de impacto do tráfego; análise da contagem do fluxo veicular; análise simplificada da largura de banda para vias artérias; capacidade de exportação e importação de vários programas (STRONG & CONCEPTS, 2008).

Apenas um programa e um arquivo de dados gerencia todas as funções do TEAPAC e todos os programas externos, para cerca de 500 interseções, e 25 condições para cada cenário até 5 questões com cenário independente.

Este software integrado de sistema de tráfego é construído da seguinte forma:

- **SIGNAL 2000:** Esta função, baseada no HCM 2000 (*Highway Capacity Manual*), permite realizar análises da capacidade e dos tempos semafóricos, otimizando as defasagens, ciclo e fases. Este otimizador pode ser utilizado para encontrar o melhor nível possível de serviços para as condições projetadas, como estudos de impacto;
- **SITE:** Permite fazer uma estimativa dos volumes projetados para múltiplos estudos de impacto do tráfego. Possibilita ainda, determinar o volume do movimento de giro em uma interseção;
- **WARRANTS:** Função que executa a análise de contagem de forma abrangente usando o MUTCD 2000/2003. A contagem é feita em etapas de 15 minutos, em um período de 60 minutos. Os volumes podem ser contados manualmente ou obtidos diretamente dos contadores eletrônicos com o auxílio da função TURNS;
- **TURNS:** Realiza uma análise completa da contagem do tráfego, incluindo o período de pico, podendo importar os dados de contagem de vários contadores eletrônicos de tráfego. É uma função para tabulação da contagem que realiza também uma análise da quantidade de giros possíveis;
- **NOSTOP:** Aplicação para progressão arterial que ajusta as defasagens para maximizar a largura das bandas nos dois sentidos. Esta função permite otimizar o ciclo, com uma saída gráfica para indicar os melhores ciclos para a progressão, e os diagramas espaço x tempo;
- **PRENOSTOP:** É uma das seis funções de pré-processamento do TEAPAC que possibilita sincronizar sinais e realizar estudos da progressão. Também permite exportar os resultados para outros programas, tais como HCS, TRANSYT-7F, PASSER II, CORSIM, TS / PP-DRAFT e SYNCHRO / SIMTRAFFIC (SIGNAL2000, PRETRANSYT, PREPASSR, PRENETSIM, PRETSPPD e PRESYNCHRO). PRENOSTOP prepara os dados de entrada para a função de progressão NOSTOP, usando os mesmos dados de todas as outras aplicações do TEAPAC;

- **PRETSPPD:** É outra função de pré-processamento para sincronizar os semáforos e determinar a progressão. Também permite gerar planos coordenados de tempo semafórico usando a função exportação entre o TEAPAC e outros programas de tempo semafórico como o TRANSYT-7F, PASSER e II SYNCHRO / SIMTRAFFIC;
- **PREPASSR:** Função de pré-processamento do TEAPAC que prepara os arquivos de dados de entrada do programa PASSER II. Também utiliza estes arquivos do PASSER para otimizar os tempos semafóricos e apresenta o diagrama espaço x tempo e as tabelas horárias importadas dos resultados do PASSER;
- **PRETRANSYT:** Pré-processamento do software usado para criar arquivos de entrada de dados para o TRANSYT-7F. Também elabora diagramas espaço x tempo e exibe tabelas completas com os tempos semafóricos importados dos resultados do TRANSYT-7F. Esta combinação pode ser feita a partir de uma base de dados única. A distribuição dos dados também permite uma fácil transferência da otimização dos tempos do TRANSYT para outros programas como o TS / PP-DRAFT;
- **PRENETSIM:** Função de pré-processamento do TEAPAC utilizada para criar arquivos de entrada de dados para simulação microscópica e animação pelo TRAF-NETSIM ou CORSIM. Ele usa os fluxos de saturação e tempos semafóricos que foram computados pelo TEAPAC (ambos necessários como aportes ao NETSIM / CORSIM). Também desenha diagramas espaço x tempo e exibe as tabelas horárias completas. Em combinação com a análise da otimização semafórica e outras funções de exportação do TEAPAC, todas as otimizações podem ser simuladas e animadas a partir de uma base de dados única;
- **PRESYNCHRO:** Outra função de pré-processamento que tem a capacidade de importar os dados obtidos pelo SYNCHRO, Versão 5, 6 ou 7. Além disso, se a rede foi usada como entrada do SYNCHRO / SIMTRAFFIC, o recurso de importação de rede do PRESYNCHRO pode importar essa descrição para toda a rede e para todas as outras aplicações do TEAPAC. Isso permite que os dados do SYNCHRO sejam analisados e otimizados;

- **SCENARIO:** Projetado para gerenciar e analisar os vários cenários apresentados nas aplicações descritas anteriormente;
- **TED:** Embutido no editor TEAPAC, pode ser usado para fazer edições diretas nos arquivos de dados ou para criar vários cenários em conjunto com as análises que podem ser executadas sozinhas;
- **TUTOR:** Manual avançado tutorial para todas as funções do TEAPAC. Ele contém muitos exemplos que podem ser executados diretamente com o programa para aprender os procedimentos operacionais básicos e avançados que estão disponíveis no TEAPAC (fornece exemplos, comandos e técnicas avançadas para usar o programa TEAPAC).

O fluxograma da Figura III.12 ilustra a integração completa do TEAPAC - Sistema Integrado com Software de Tráfego.

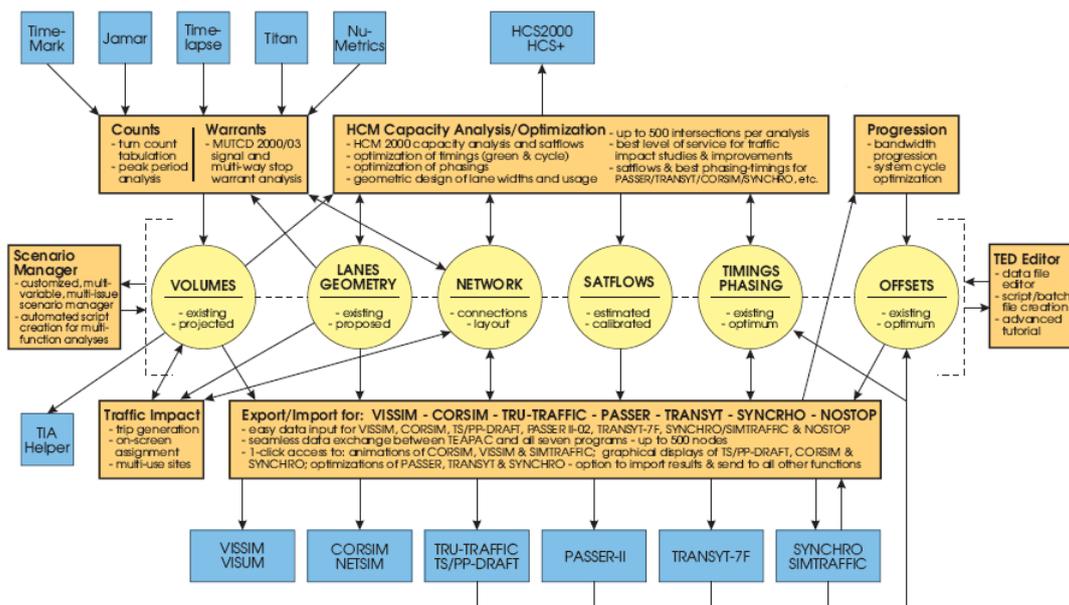


Figura III.12: Fluxograma do TEAPAC (Fonte: STRONG & CONCEPTS, 2008)

III.6.4. COMBAND (MAXBAND / MITROP)

Considerando que os métodos combinados de minimização do atraso com limitação da largura da banda, em algumas situações produzem soluções ótimas locais sob o ponto de vista do sistema, LAN *et al.* (1992) criaram o modelo COMBAND a partir da formulação básica de maximização da largura da banda do MAXBAND e critérios de minimização de atraso originalmente propostos no programa MITROP.

Modificações foram feitas para obter resultados que buscassem simultaneamente a maximização da largura da banda e a minimização do atraso, avaliando os pesos direcionais das bandas em cada sentido e em cada trecho da via arterial, supondo condições de tráfego não saturadas, taxas de chegada e saída constantes nas interseções, sem dispersão do pelotão e sem fluxo entrando pelo meio da quadra.

Comparado com dados gerados pelo modelo MAXBAND, a técnica de combinação simultânea dos programas MAXBAND / MITROP apresentou melhor solução global de otimização do ciclo, defasagens, proporções de verde e seqüência das fases, sob a análise do atraso, mantendo ainda a qualidade da progressão com pequena perda de largura da banda.

III.6.5. TSIS – NETSIM

O TSIS (*Traffic System Integrated System*) é um pacote de programas integrado para modelagem da rede (TRAFED), simulação microscópica (CORSIM), animação e gráficos (TRAFVU), tradução da entrada gráfica (TRANSLATOR) e módulo responsável pela visualização (TEXTEDITOR). Este ambiente tem o formato das “Suítes” do *Windows* semelhante ao *Microsoft Office* que incorpora um editor de textos – Word, planilha eletrônica – Excel, e apresentação – PowerPoint (OWEN *et al.* 2000).

Com o advento do TSIS os diversos recursos do modelo foram integrados sob a forma de softwares com padrão do Sistema Operacional *Windows*, tornando amigável, fácil e rápida a codificação da rede, além da vantagem da visualização da malha viária que está sendo elaborado, o que reduz os erros e aumenta a precisão da representação em função da redução da complexidade de codificação antes do advento do TSIS.

O CORSIM (*CORridor SIMulation*) é um modelo de micro simulação projetado para análise de redes de tráfego, simulando os movimentos dos veículos de acordo com as Leis de Perseguição, modelando assim o escoamento das filas, mudanças de faixa e a determinação da velocidade, aceleração e posição de cada veículo da rede. É composto pelo FRESIM, modelo microscópico para análise do tráfego em vias expressas e pelo NETSIM, utilizado para vias urbanas, funcionando de forma integrada com o CORSIM (MOREIRA, 2005).

As Leis de Perseguição implementadas no CORSIM simulam em intervalos de tempo discretos, limitando os movimentos dos veículos através dos dispositivos de controle de tráfego e outros elementos do sistema, que por sua vez procuram manter a distância mínima entre eles, enquanto não excedam a velocidade máxima permitida (BLOOMBERG, L., DALE, J., 2000).

O desenvolvimento do CORSIM começou na década de 70 pelo FHWA (*Federal Highway Administration*), e sob sua responsabilidade foram feitos os principais desenvolvimentos de software e lógica de simulação. Recentemente os engenheiros de software introduziram o TSIS (*Traffic Software Integrated System*) que é um pacote de programas para ambiente *Windows* que integra os vários componentes do modelo, quais sejam: TRAFED - módulo para editoração gráfica das redes viárias e todas as suas características físicas e operacionais; TRANSLATOR - codificador dos arquivos gráficos em arquivos de entrada do CORSIM; TRAFVU - simulação dos dados fornecidos pelo CORSIM, visualização do relatório com os resultados das simulações (TextEditor), e animação da simulação para permitir a análise detalhada. Desta forma, operando em ambiente amigável com Sistema Operacional *Windows*, o CORSIM permite aos usuários simular o fluxo de tráfego para um amplo cenário de aplicações práticas e de investigação (OWEN *et al.* 2000).

O CORSIM permite a representação de interseções com diferentes tipos de controle (controle por prioridade, preferência e semafórica de tempo fixo ou atuado), vias com faixas exclusivas para giro (com ou sem acumulação), estacionamentos, operação de ônibus com pontos abrigados em baias ou dispostos diretamente na via, levando em consideração a interação com pedestres, procurando representar de forma detalhada a realidade. Também permite simular o fluxo de tráfego durante um incidente, com acúmulo de filas e retorno à normalidade, e disponibiliza um processo de alocação de tráfego como opcional, para os casos em que não se conheçam as partições de tráfego nas interseções a partir da definição de uma matriz origem-destino (MOREIRA, 2005).

Algumas outras vantagens do CORSIM são (FHWA, 2001):

- Verificação e validação de outros softwares;
- Capacidade de representar diferentes condições de tráfego, podendo ser calibrado para representar com precisão o tráfego em condições sobressaturadas, permitindo a previsão da evolução dos congestionamentos, avaliando seus

impactos durante o período de acumulação e como se processa a dissipação deste, de acordo com o plano operacional implementado. Esta é a maior vantagem sobre os métodos tradicionais empíricos e analíticos que não são válidos nestas situações, a começar pelo método mais tradicional, descrito no *Highway Capacity Manual*, que apresenta sérias limitações quando a demanda se aproxima da capacidade;

- Sincronismo e coordenação semafórica;
- Capacidade de simular os impactos causados por restrição da capacidade do tráfego, variando no tempo e no espaço, devido a obras e eventos religiosos, esportivos, culturais. Em função das características específicas de cada evento existem variações de tempo e espaço que limitam o tráfego normal.
- Possibilidade de modelar a interface entre vias urbanas e expressas, permitindo avaliar os impactos dos congestionamentos das vias urbanas nas rampas de saída das vias expressas, assim como, os causados por congestionamentos em vias expressas sobressaturadas que se propagam por suas entradas para as vias urbanas.

Este modelo de micro simulação é um dos mais utilizados nos USA e também em todo o mundo. Tanto pesquisadores quanto planejadores de tráfego utilizam o CORSIM em função de sua sólida fundamentação da modelagem do tráfego e capacidade de análise das situações propostas. Suas características capacitam os usuários à simulação de um largo espectro de aplicações práticas e de pesquisas (OWEN *et al.* 2000).

A versão 6.2 do TSIS, lançada em fevereiro de 2010, juntamente com o CORSIM *patch* 6.1, contém várias melhorias, como sinal de preferência e atribuição do tráfego para controladores atuados (a versão anterior só podia lidar com preferência e atribuição para controladores operando com tempos fixos), duas faixas para autoestradas rurais com zonas de passagem e proibição, volume de OD por tipo de veículo no FRESIM, novas amostras de redes e correções de erros (*bugs*) existentes nas versões anteriores, como controle de atraso nos *links* externos sinalizados, lógica de circulação de determinados veículos perto de rampas de saída, etc. Outra inovação é a possibilidade de capturar o desenho da área em estudo diretamente da base, não sendo mais necessário manipular o mesmo. Este recurso facilita a visualização e a percepção dos fatores que interferem no funcionamento da rede, que no CORSIM é baseada em arcos (trechos das vias) e nós

(interseções), melhorando a precisão do trabalho. Também foi adicionado um ícone para alternar entre o modo de desenho (TRAFVU), e o modo padrão de diagrama de ligação do nó (TRAFED), e a possibilidade de importação de arquivos do TRANSYT-7F, o que permite gerar rapidamente uma rede com dezenas de cruzamentos sinalizados, e exportação de arquivos para o TRANSYT-7F, para otimização do tempo do sinal e nível de serviço da interseção.

O TSIS 6.2 e o TRANSYT-7F versão 11.3.1, são distribuídos juntos em um produto combinado, podendo ser implantados através do CD de instalação do TSIS 6.2.

O TSIS-NETSIM foi desenvolvido em um ambiente integrado que permite aos usuários realizar operações de análise de tráfego. Construído com uma arquitetura de componentes, a caixa de ferramentas do TSIS é um conjunto de ferramentas que permitem ao usuário definir e gerenciar projetos de análise do tráfego, definir redes de tráfego, criar entradas para análise da simulação do tráfego, executar modelos de simulação do tráfego e interpretar os resultados desses modelos.

Cabe salientar, que devido ao constante aperfeiçoamento, calibração, interface, facilidade de uso e precisão nas simulações das situações reais de tráfego, conforme observado nos diversos artigos e teses pesquisados para a elaboração deste trabalho, o TSIS-NETSIM é um dos softwares mais utilizados e aceitos pela comunidade de engenharia de tráfego.

III.7. Resumo dos Métodos Computacionais para Coordenação Semafórica

A Tabela III.1, esquematizada abaixo, apresenta de forma resumida a evolução cronológica de alguns métodos computacionais para coordenação semafórica, segundo a estratégia de otimização e sua aplicabilidade.

Tabela III.1: Síntese dos Métodos Computacionais de Coordenação Semafórica

ANO	TIPO	BASE	APLICAÇÃO
1964	Half-Integer Synchronization Program	Largura da Banda	Arterial – Duas Fases
1965	COMBINATION	Atraso / Parada	Rede – Duas Fases
1966	Interferência de BROOKS e BLEYL	Largura da Banda	Arterial – Duas Fases

ANO	TIPO	BASE	APLICAÇÃO
1967	TRANSYT	Atraso / Parada	Rede – Múltiplas Fases
1973	PASSER	Largura da Banda	Arterial – Múltiplas Fases
1973	TSIS - NETSIM	Alocação de Tráfego Análise de Redes	Rede – Múltiplas Fases
1974	TEAPAC	Banda e Atraso/Paradas	Rede – Múltiplas Fases
1975	MITROP	Atraso / Parada	Rede – Múltiplas Fases
1980	MAXBAND	Largura da Banda	Arterial – Múltiplas Fases
1980	SCOOT	Atraso / Parada	Rede – Múltiplas Fases
1983	Combinação PASSER II / TRANSYT 6	Banda e Atraso/Paradas	Arterial – Múltiplas Fases
	Combinação MAXBAND/TRANSYT 7F	Banda e Atraso/Paradas	Arterial – Múltiplas Fases
1986	INTEGRATION	Atraso / Parada	Rede – Múltiplas Fases
1989	MULTIBAND	Largura da Banda	Arterial – Múltiplas Fases
1992	COMBAND (MAXBAND/MITROP)	Banda e Atraso/Paradas	Arterial – Múltiplas Fases
2004	SIRI	Atraso / Parada	Redes – Múltiplas Fases

Fonte: Adaptado DERMACHI e DUTRA (2004); PORTUGAL (2005)

De uma forma geral, pôde ser constatado que a base dos métodos de maximização da largura da banda foi proposta por Little, no desenvolvimento das programações *Half-Integer Synchronization* e *Mixed-Integer Linear*, e que a base dos métodos de minimização do atraso e das paradas está na avaliação do índice de performance PI.

A maioria das implementações computacionais desenvolvidas combinou de forma seqüencial ou simultânea as características dos métodos baseados em LITTLE e no índice de desempenho (PI).

Portanto, os métodos existentes são programas computacionais que foram desenvolvidos como formas adaptadas e evoluídas destas duas bases originais, e que ainda são pouco conhecidos e utilizados na maioria das prefeituras brasileiras.

III.8. Considerações Finais

Neste capítulo foram discutidos alguns conceitos relacionados à coordenação semafórica e também as técnicas utilizadas para tal, ou seja, as que minimizam algum critério de tráfego (velocidade média, quantidade de paradas, etc) e as que maximizam a largura de banda. Além disso, alguns sistemas integrados de controle de tráfego também foram descritos.

Conforme mencionado anteriormente, esta dissertação apresenta um método para otimizar as defasagens de corredores semafóricos que operam em tempos fixos. Tal procedimento foi adotado para ser coerente com a forma de operação do sistema de controle de tráfego da CET-RIO, no Rio de Janeiro, onde foi aplicado o método.

Portanto, o objetivo desta dissertação é apresentar um método de fácil utilização e baixo custo, que possa ser utilizado pela grande maioria das prefeituras que não têm condições de adquirir softwares mais sofisticados, por falta de dotação orçamentária. O ideal seria substituir os métodos manuais de tentativa e erro, que demandam esforços repetitivos, pelo método computacional aqui apresentado.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

IV.1. Introdução

Os sistemas viários influenciam a vida das pessoas todos os dias, direta ou indiretamente. Esta influência pode ocorrer devido à ausência de sincronismo entre as redes viárias semaforizadas (ENDO, 2006). Manter o sincronismo dos sinais de trânsito de acordo com os fluxos variáveis de tráfego ao longo do dia, é uma das muitas dificuldades com que se defrontam os responsáveis pelos órgãos de gestão do tráfego das cidades (SUNKARI, 2004).

A importância da sincronização semafórica é verificada em uma via arterial, quando os veículos que se movimentam ao longo da mesma são liberados, em pelotões, pelos sinais de controle dos cruzamentos e, por esta razão, estes veículos viajam também em grupos para os cruzamentos seguintes. Deste modo, é desejável que o tráfego ultrapasse um conjunto de semáforos subsequentes no verde sem paradas. Para que este efeito ocorra, é desejável uma relação temporal, denominada defasagem, para permitir que o período de verde de uma interseção seja temporizado para abrir defasado com relação ao seu antecessor, de tal forma que os pelotões de tráfego possam receber uma indicação verde assim que eles se aproximem de uma interseção sinalizada (TRINDADE FILHO, 2002).

Neste capítulo será apresentado e explicado o modelo matemático estudado, baseado na técnica de sincronização do tipo "onda verde", que foi escolhida por proporcionar uma maior organização do tráfego na via, reduções do tempo de viagem e atraso, número de paradas, gastos de combustível e possibilidade de utilização em computador de pequeno porte.

Desta forma, o método proposto é um trabalho de reengenharia para sincronizar semáforos que operam em tempos fixos. Muito mais que uma ferramenta teórica adicional de cálculo, trata-se de uma metodologia que, dispensando pesquisas de fluxos de tráfego (contagens), tem como objetivo encontrar a fase relativa entre os semáforos, de modo que o fluxo de pedestres e veículos ocorra mais suavemente, com máxima

largura de banda verde, procurando melhorar a circulação do tráfego das redes viárias semaforizadas.

Ao final é apresentada a estrutura lógica do método proposto, incluindo a descrição de etapas e os dados necessários para aplicação.

IV.2 Essência do Método Proposto

Uma das formas de manter o movimento do tráfego com fluidez e segurança é através da periódica verificação do sincronismo semafórico, o que pode ser feito através de vistorias ao local. Segundo EJZENBERG (2005), o aumento dos fluxos de tráfego, decorrente do próprio desenvolvimento urbano, por si só está a demandar a revisão da sincronização, que deve ser reavaliada com intervalo desejável de tempo de um ano. Esta verificação permite otimizar o funcionamento dos cruzamentos sinalizados, minimizando atrasos, paradas, consumo de combustível e poluição atmosférica, maximizando o movimento progressivo do sistema. Ocasionalmente, este processo pode incluir uma nova configuração para melhorar a operação de um sinal, o que pode requerer a mudança da sequência de movimentos de uma interseção ou intervalos das fases para acomodar demandas específicas ou movimentos, como sinais para giro à esquerda. Além destes benefícios diretos, a otimização também permite diminuir o tráfego de passagem pelos bairros residenciais, melhorando a segurança e as condições do tráfego nessas áreas. A melhoria do fluxo de tráfego também reduz o desgaste do pavimento, minimizando a manutenção do departamento de obras públicas (SUNKARI, 2004).

Infelizmente, a revisão semafórica periódica é frequentemente adiada ou ignorada devido à escassez de recursos financeiros dos órgãos gestores do trânsito. A falta de um orçamento específico é o maior desafio encontrado pelas prefeituras brasileiras para realizar coleta de dados de campo e análise, otimização dos tempos dos sinais, testes e implementação. Apesar de ser um processo caro e demorado, manter as contagens volumétricas atualizadas é fundamental para reavaliação do sincronismo dos corredores de tráfego (EJZENBERG, 2005).

O método proposto nesta dissertação tem como objetivo ser mais uma ferramenta que possibilite melhorar o fluxo de tráfego nas vias arteriais com aproximações congestionadas, muitas das vezes por ausência de sincronismo entre os semáforos do corredor devido a uma nova configuração realizada na via ou mesmo flutuação do tráfego em um período do dia.

Assim, este trabalho irá apresentar um método capaz de otimizar as defasagens de corredores arteriais de tráfego, sem necessidade de contagens volumétricas, devido à ausência orçamentária dos municípios, mas apoiado nos antigos planos semaforicos, que ainda são utilizados e que tiveram como base as contagens veiculares da época de implantação. Como em muitas cidades brasileiras, dentre as quais o Rio de Janeiro os planos estão em uso há mais de dez anos, não expressando mais o comportamento do trânsito, se faz necessária uma revisão do sincronismo para melhorar a fluidez do trânsito. Vale ressaltar que estes planos serviram como ponto de partida para determinar as defasagens, por ser a única informação disponível.

O método computacional, elaborado em Visual Basic e Excel, tem como proposta substituir os processos manuais e os ajustes pontuais baseados na experiência de campo de muitos engenheiros de tráfego. Seu desenvolvimento teve como principal suporte o método de maximização da banda verde de MORGAN e LITTLE (1964), por ser de fácil uso e por possibilitar melhores larguras de bandas máximas que os demais modelos, o artigo publicado no jornal do ITE, por SUNKARI (2004), sobre Benefícios da Reavaliação do Sincronismo Semafórico, onde demonstra a importância da revisão da sincronização semaforica para a melhoria da circulação e segurança do tráfego. Também teve como base o artigo publicado no IX ANPET (1995), e curso ministrado à CET-SP (2005), ambos de EJZENBERG, sobre Reprogramação de Semáforos pelo Método de Observação de Campo, onde não é levada em consideração a contagem volumétrica, além de vários outros trabalhos científicos pertinentes.

No próximo capítulo, será apresentado um estudo de caso para verificação do método proposto em uma área piloto da cidade do Rio de Janeiro.

IV.3. Método Analítico para Determinar o Tempo Padrão de Progressão

Em geral, sistemas coordenados semaforicos operam melhor quando o fluxo da via principal é predominantemente de tráfego direto e quando o número de veículos girando na via principal é pequeno (GARTNER e STAMATIADIS, 2002). Porém, a aplicabilidade deste sistema para qualquer situação requer uma análise cuidadosa. Por vários anos a análise do sistema em progressão foi feita pelo método de tentativa e erro, usualmente envolvendo um trabalho gráfico (WOHL e MARTIN, 1967). Os poucos métodos algébricos disponíveis eram limitados a condições especiais como comprimento do trecho constante, tempos de verdes iguais para cada interseção, e velocidade de progressão constante se o sistema fosse de mão dupla. Em 1964, MORGAN e LITTLE publicaram uma análise de uma aproximação com considerável flexibilidade sem nenhuma restrição de métodos prévios, fornecendo um método para determinar o tempo padrão necessário para maximizar o verde da largura da banda (WOHL e MARTIN, 1967). O resultado apresentado nessa publicação teve como base a análise de uma via de mão dupla, com velocidades iguais em ambas as direções, onde as larguras iguais máximas da banda são obtidas para uma sincronização na qual as defasagens ótimas correspondem a 0 ou $\frac{1}{2}$ do valor do ciclo semaforico c , conforme pode ser observado na Fig.IV.1, quando a velocidade de progressão é igual em ambas as direções da via.

Existem somente duas opções possíveis de coordenação para cada par de semáforos ao longo da via arterial, portanto este tipo de problema em que é necessário escolher um dentre dois possíveis valores de uma variável representa um problema de programação inteira. Segundo MAGALHÃES (1981), o método de MORGAN E LITTLE demonstra que os semáforos ao longo da arterial estarão coordenados para a máxima largura total da banda em ambas as direções, selecionando uma destas duas possibilidades.

Também foi observado que a velocidade não precisa ser a mesma para toda extensão da via, podendo variar entre os trechos, mas deve ser a mesma em cada trecho em qualquer ponto. Para encontrar a largura máxima da banda sob estas condições é necessário considerar, em seqüência, cada sinal como a origem e depois a defasagem do outro sinal (relativo à origem), 0 ou $\frac{1}{2}$ do ciclo para maximizar a largura da banda entre os sinais.

A largura da banda mínima para cada sinal de origem representa a maior passagem de todo o sistema. O sinal de origem que tem a maior largura da banda mínima determina o padrão de sincronização básico.

Se larguras da banda desiguais são necessárias, os resultados são modificados e substituídos por uma porção da largura de banda de uma direção, nomeando isto de forma diferente.

IV.4. Maximização da Banda Verde em Corredores Semaforizados

O projeto de sistemas de progressão (ondas verdes) baseia-se no fato de que semáforos tendem a agrupar os veículos em pelotões com *headways* (distância entre a frente de um veículo e a frente do veículo seguinte) uniformes, efeito este acentuado em vias arteriais (GARTNER et al, 1990).

Técnicas que procuram tirar o máximo proveito do tempo de ciclo/verde disponível na geração de bandas são conhecidas por métodos de maximização de largura de banda verde (LITTLE et al, 1981), que são amplamente utilizados, especialmente na forma de diagramas espaço-tempo. Uma evolução dos métodos gráficos é a utilização de programação inteira ou mista para definir o conjunto de defasagens ótimas e a largura máxima da banda verde. A banda verde ou de passagem é definida como sendo a porção do ciclo na qual um veículo, movimentando-se a uma velocidade constante, pode cruzar um conjunto de interseções semaforizadas sem ter que parar no aspecto vermelho do semáforo.

Métodos de maximização da banda verde, quando comparados com outros que otimizam critérios de tráfego, utilizam poucos dados de entrada, exigindo basicamente dados geométricos da via, velocidades de cruzeiro, porcentagens de verde e ciclo, o que possibilita obter os valores de defasagem que proporcionam as chamadas “ondas verdes” (CARLSON, 2006). A maximização de banda tende a reduzir o número de paradas e os atrasos veiculares, favorecendo 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 e, conseqüentemente, menos carros parados

em fila sofrendo atraso (LITTLE et al, 1981). Entretanto, o favorecimento da progressão na arterial não pode ser tal que prejudique em demasia as vias transversais.

Pela pesquisa bibliográfica feita no capítulo III, o algoritmo utilizado no modelo de MORGAN e LITTLE (1964) revela-se como mais eficiente que os demais para obtenção de máximas larguras de bandas de onda verde nos dois sentidos de tráfego. No trabalho destes autores, sobre Sincronizar Sinais de Tráfego com Largura de Banda Máxima, eles apresentam uma proposta que permite estipular velocidades de projeto diferentes entre sinais adjacentes, em ambos os sentidos, e ajustar a largura de banda. Para tal, propõem procedimentos para a solução de dois problemas:

- Dados tempo comum de ciclo, porcentagens de verde e 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
- Ajustar as defasagens para favorecer um sentido com uma largura de banda maior, se factível, e dar a outra direção uma largura de banda tão grande quanto possível.

Desta forma, foi elaborado um método computacional que consiste em uma adaptação do desenvolvido por MORGAN e LITTLE, considerando uma diferença básica: no método apresentado por esses autores, a banda é calculada em função de suas trajetórias frontal e traseira, enquanto que no método proposto a largura da banda é obtida a partir do uso de diagramas de banda, cuja vantagem é permitir uma visualização mais simples e imediata de como a largura da banda varia em função da defasagem, além de facilitar sua implementação em uma rotina computacional.

Considerando que em problemas de programação inteira a busca pela solução ótima deve ser feita de maneira iterativa, torna-se impraticável coordenar manualmente uma rede semaforica contendo um número relativamente grande de semáforos. Como alternativa, é desejável utilizar aplicativos existentes no mercado ou, na falta desses programas, desenvolver uma rotina computacional que solucione esse tipo de problema (DEMARCHI e DUTRA, 2004). Portanto, a implementação do método de maximização da banda verde, proposta neste trabalho, foi feita em uma planilha eletrônica do Excel e rotinas em *Visual Basic*, utilizadas para automatizar o cálculo das larguras de banda

para diferentes pares de semáforos e determinar o melhor esquema de coordenação, buscando a solução ótima dentre todas as soluções possíveis.

Neste capítulo é apresentado o procedimento para a obtenção de máximas larguras de bandas de onda verde nos dois sentidos de tráfego do corredor, em função das defasagens, nas quais para uma delas a banda é a máxima.

Também é definido o conjunto de defasagens que maximiza a banda verde para todo o sistema, considerando diferentes combinações de defasagens para diferentes pares de semáforos. Para isso, é utilizado um procedimento semelhante ao *branch-and-bound*, utilizado por LITTLE (1966), que avalia inicialmente os dois primeiros semáforos, com a definição de suas equações para o problema de programação linear e a determinação da melhor solução. Em seguida, os demais semáforos são adicionados ao problema, até que todos tenham sido avaliados.

A seguir é demonstrado todo o procedimento proposto e ao final deste capítulo é apresentado um fluxograma que possibilita uma visão mais detalhada do sistema.

IV.5. Método Proposto para Maximizar Larguras de Bandas

No processo para maximizar as larguras das bandas, é necessário considerar as interferências que o vermelho de um determinado semáforo causa na banda de quaisquer outros semáforos.

Para maximizar as larguras das bandas, através do modelo, foi considerada uma via de mão dupla com n semáforos, onde as direções da via serão identificadas como $i - j$ (S_{ij} - entrada ou *inbound*), e $j - i$ (S_{ji} - saída ou *outbound*). Os semáforos serão denotados de S_1, S_2, \dots, S_n ($S_{ij1}, S_{ij2}, \dots, S_{ijn}$), incrementados no sentido $i - j$.

A Figura IV.1 ilustra um Digrama de Banda Típico com Faixas Verdes Bidirecionais para um corredor de tráfego.

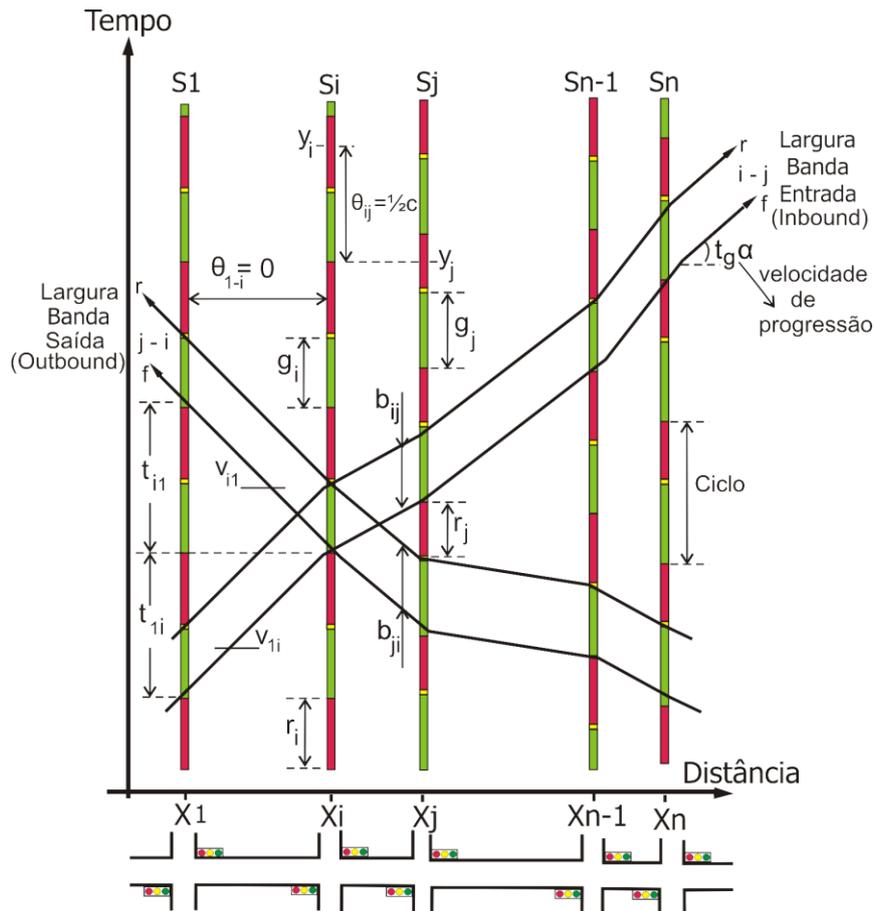


Figura IV.1 – Diagrama de Banda Verde Típico com Faixas Bidirecionais

(Adaptado de LITTLE et al, 1966)

Onde:

- c : ciclo em seg;
- r_i, r_j : duração dos vermelhos dos semáforos i e j para a via analisada, (seg.);
- x_i, x_j : posições dos centros das interseções semaforizadas S_i e S_j na via (m);
- y_i, y_j : instantes referentes aos centros dos vermelhos dos semáforos i e j (seg);
- g_i, g_j : tempo de verde dos semáforos S_i e S_j (seg);
- b_{ij} e b_{ji} : largura de banda no sentido i e j e no sentido j e i , (seg);
- t_{ij}, t_{ji} : tempo de viagem do automóvel a partir do semáforo S_i para o semáforo S_j , e do semáforo S_j para S_i , em segundos (no gráfico foi apresentado t_{i1} e t_{1i} para não “poluir” a figura);

- v_{ij}, v_{ji} : velocidades médias de percurso entre os semáforos i e j e entre j e i em metros/seg (no gráfico foi apresentado v_{i1} e v_{1i} para não “poluir” a figura);
- θ_{ij}, θ_{ji} : defasagem relativa entre S_i e S_j (S_j e S_i), medida como o tempo entre o centro do vermelho de S_i (S_j) ao próximo centro de vermelho S_j (S_i), em segundos. Por convenção $0 \leq \theta_{ij} \leq 1$.

As defasagens θ_{ij} e θ_{ji} entre semáforos nos sentidos $i-j$ e $j-i$ são as diferenças entre os pontos (ou instantes) centrais dos vermelhos dos semáforos $i-j$ e $j-i$, respectivamente, sabendo que:

$$\theta_{ij} = y_j - y_i \quad (\text{IV.1})$$

$$\theta_{ji} = y_i + c - y_j \quad (\text{IV.2})$$

Substituindo as duas equações acima é possível observar que:

$$c = \theta_{ij} + \theta_{ji} \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{sendo } 0 \leq \theta_{ij} \leq c \text{ e } 0 \leq \theta_{ji} \leq c$$

O tempo de viagem entre sinais adjacentes pode ser calculado por:

$$t_{ij} = \frac{x_i}{v_{ij}} \quad \text{e} \quad t_{ji} = \frac{x_j}{v_{ji}} \quad (\text{IV.4})$$

É importante observar que t_{ij} e t_{ji} são entradas básicas para os cálculos, e freqüentemente são assumidos conhecidos e constantes.

Vale ser salientado também que:

- Qualquer quantidade de tempo pode ser expressa em fração de ciclo, bastando para isso dividir pelo ciclo (c);
- O “tempo vermelho” é usado para descrever o período que não é utilizado; e
- Um conjunto $\theta_{ij} = 1, 2, \dots, n$ para qualquer i , será chamado de “sincronização”.

Através do gráfico podemos observar que as linhas na diagonal representam as trajetórias dos carros que passam livres ao longo da via nas direções indicadas, e que mudanças de declive representam mudanças de velocidade, o que requer por parte do gerenciador do sistema uma análise mais criteriosa. As possíveis trajetórias

desimpedidas determinam a forma da direção da banda verde cuja largura horizontal é à largura da banda para aquela direção. Embora só delineado uma vez, está claro que as bandas verdes aparecem uma vez por ciclo em bandas paralelas através do diagrama.

O cálculo para maximizar a largura da banda foi feito para condições ideais e programado em Excel e Visual Basic.

IV.5.1. Cálculo da Máxima Largura para Bandas Iguais em Ambos Sentidos

A largura máxima igual de banda para ambas direções é $\text{MAX}(0, B)$, ou seja, a maior faixa da banda é igual para o máximo 0 ou B . Em alguns casos, B pode ser negativo. Neste caso, fixar zero. Então, tem-se:

$$B = \text{MAX}_i \text{MIN}_j \text{MAX}_{\delta=0,1/2} (U_{ij} - r_j) \quad (\text{IV.5})$$

Onde:

- B : valor de uma das larguras de banda máximas iguais;
- U_{ij} : é calculado em função das defasagens ótimas $(\theta_{ij}, \theta_{ji})$, que correspondem a 0 ou $1/2$ do valor do ciclo semaforico. Para velocidades de progressão idênticas;
- r_j : tempo de vermelho da via principal em função do ciclo. É o tempo comum de vermelho, em ambos os sentidos, para que seja possível a travessia do pedestre e do movimento da artéria transversal (em segundos);
- δ_{ij} : constante que pode assumir o valor de 0 ou $1/2$, para cada interseção.

A Figura IV.2 apresenta um diagrama de espaço-tempo para uma via arterial com cinco interseções, com larguras de bandas máximas e iguais. As barras diagonais mostram a banda em ambos os sentidos da arterial, limitada pelas trajetórias do primeiro e do último veículo que usufruem a banda.

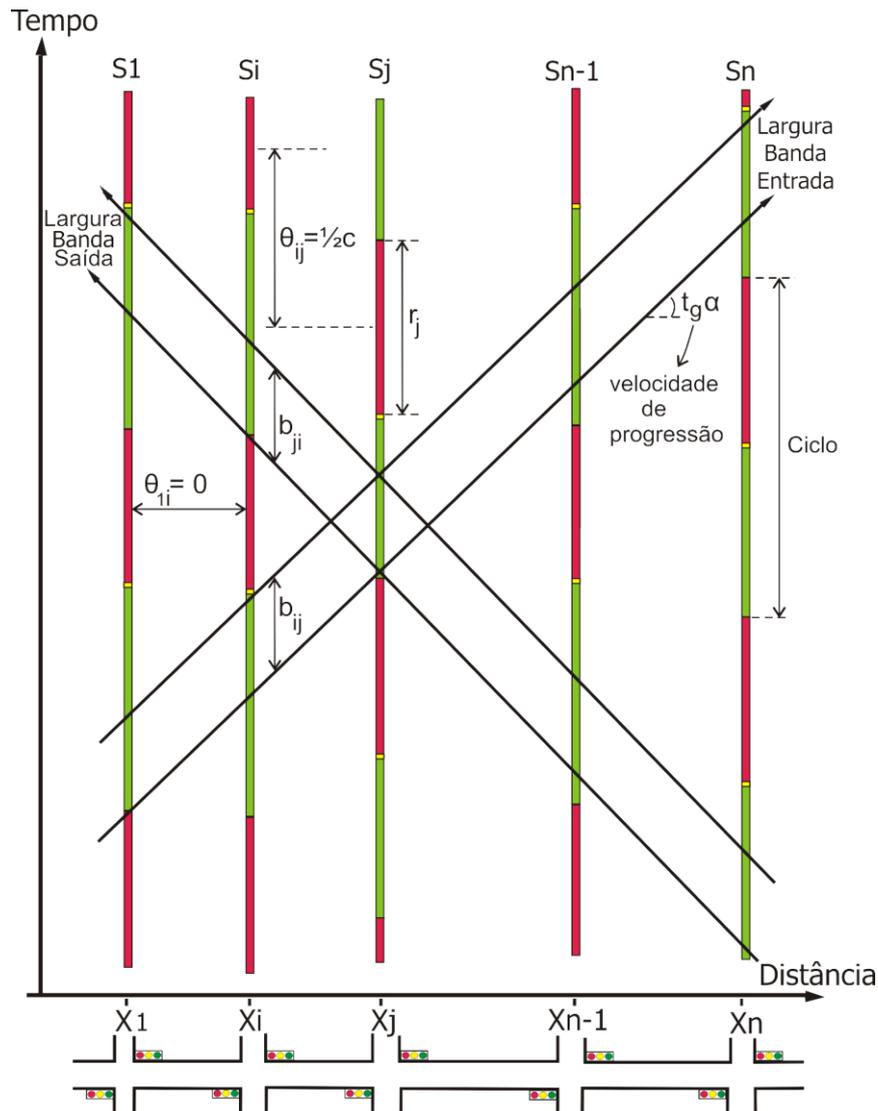


Figura IV.2: Diagrama Espaço-Tempo para uma Arterial com Bandas Iguais Máximas em ambos Sentidos (Adaptado de LITTLE e MARTIN, 1966)

Onde:

- θ_{ij}, θ_{ji} : defasagens ótimas (o ou $\frac{1}{2}$ do ciclo semafórico);
- b_{ij}, b_{ji} : largura de banda no sentido i e j e no sentido j e i , em segundos;
- b_i : maior largura de banda no sentido $i - j$;
- B : 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 à zero.

O valor de U_{ij} é calculado através da seguinte expressão:

$$U_{ij} = 1 - \text{Mantissa} \left[\frac{1}{2} (r_i - r_j) + \frac{1}{2} (t_{ij} + t_{ji}) - \delta_{ij} \right] \quad (\text{IV.6})$$

Para facilitar a elaboração do modelo, seja:

$Y = \frac{1}{2} (r_i - r_j) + \frac{1}{2} (t_{ij} + t_{ji})$ = parcela da equação, calculada para cada interseção (Y_1, Y_2, \dots, Y_n), onde $Y_1 = 0$.

$$\text{Logo: } Y_i = Y_{i-1} - \frac{1}{2} (r_i - r_{i-1}) + (x_i - x_{i-1}) \frac{1}{2c} \left(\frac{1}{v_{i-1}} + \frac{1}{v_{j-1}} \right) \quad (\text{IV.7})$$

O significado operacional fica mais claro no caso em que as velocidades em ambos os sentidos são iguais, $t_{ij} = t_{ji}$, no qual a defasagem $\theta_{ij} = \delta_{ij}$ (constante que pode assumir o valor 0 ou $\frac{1}{2}$, para cada interseção), e dois sinais terão seus centros de vermelho exatamente em fase ou exatamente defasados.

O valor encontrado pela expressão $(U_{ij} - r_j)$, é maximizado entre dois valores de δ para cada j . Com este máximo δ é executada a maximização do valor (para cada j), podendo ser registrado temporariamente na tabela como $\delta_{i1}, \dots, \delta_{in}$. O máximo desempenho de i ocorre quando $i = c$ (ciclo), que fornece as máximas larguras iguais de banda, identificando o melhor ponto $\delta_{c1}, \dots, \delta_{cn}$, maximizantes de δ , que é armazenado. Para os cálculos seguintes é necessário arquivar U_{c1}, \dots, U_{cn} , correspondendo a $\delta_{c1}, \dots, \delta_{cn}$. Isto significa guardar o valor de U_{ij} sempre que um valor de δ_{ij} é arquivado.

$$\text{Logo: } B = \text{MAX} (U_{ij} - r_j) \quad (\text{IV.8})$$

Como normalmente temos uma via com várias interseções semaforizadas, é necessário calcular a banda para cada interseção (b_i), ou seja:

$$b_i = \text{MAX} [\text{Intervalo} (U_{ij} - r_j)_1 \text{ até } (U_{ij} - r_j)_n] \quad (\text{IV.9})$$

De posse destes valores, determina-se a largura máxima da banda (B_{max}), do corredor em estudo, pela seguinte expressão:

$$B_{\text{max}} = \text{MAX} [\text{Intervalo} (b_i \text{ até } b_n)] \times \text{ciclo} \quad (\text{IV.10})$$

IV.5.2. Determinação da Interseção Crítica

A interseção crítica é a que tem a maior largura de banda e, conseqüentemente, o menor tempo de verde (g_{\min}), restringindo o movimento dos veículos nos demais trechos.

A largura da banda mínima para cada sinal de origem representa a maior passagem de todo o sistema. O sinal de origem que tem a maior largura de banda mínima determina o padrão de sincronização básico.

O algoritmo calcula os novos valores da banda, para cada interseção, em relação à interseção crítica.

O cálculo de g_{\min} é feito da seguinte forma:

$$g_{\min} = \text{MIN}_i (1 - r_i) \quad \text{ou} \quad g_{\min} = \text{MIN} [\text{Intervalo} (g_1 \text{ até } g_n)] \quad (\text{IV.11})$$

De posse de g_{\min} e dos valores obtidos para $(U_{ij} - r_j)$, o algoritmo determina a largura da banda crítica do corredor (B_c), em função da interseção crítica (g_{\min}). O algoritmo realiza o cálculo em relação à interseção que tem o menor tempo de verde (g_{\min}), determinando a largura da banda crítica.

Assim:
$$B_c = b_{ic} \times \text{ciclo} \quad (\text{IV.12})$$

Onde:

- b_{ic} é a banda que foi calculada para a interseção crítica, de forma análoga à calculada anteriormente na equação IV.9.

IV.5.3. Determinação de Bandas Distintas

Após a determinação de um valor de banda igual para ambos os sentidos de tráfego ($b_{ij} = b_{ji} = B$), o método apresenta a possibilidade de aumentar a largura da banda no sentido em que o tráfego é maior, o que pode ser verificado através de vistorias feitas ao local ou através de contagens expeditas de 15 minutos, não classificadas (ambas realizadas em vários períodos do dia). Desta forma, basta diminuir a banda no sentido contrário e, em função das novas larguras de banda, definir as novas trajetórias,

transferindo parcelas de banda de onda verde de um sentido para o outro para que ambos os fluxos passem desimpedidos pela banda.

MAGALHÃES (1981) propõe aumentar a largura da banda b_{ij} de um incremento de 5 segundos, calculando a largura de banda b_{ji} como sendo igual ao restante disponível, ou seja:

$$b_{ji} = 2B - b_{ij} \quad (\text{IV.13})$$

Se o valor de b_{ji} calculado for negativo, estabelece-se um valor nulo para o mesmo. Com os valores de b_{ij} e b_{ji} , determina-se a nova sincronização e avalia-se o desempenho do tráfego correspondente. Este processo é repetitivo, e termina quando a última iteração realizada for aquela em que o valor de b_{ij} se iguala a g_{\min} .

É importante ressaltar a necessidade de modificar a defasagem dos semáforos para acomodar a nova largura da banda. Para isso, basta calcular os novos valores das defasagens, utilizando a mesma metodologia que será apresentada nos próximos itens, em relação ao primeiro semáforo. Deve ser observado que a defasagem do último semáforo (θ_{cn}), não é uma defasagem propriamente dita, mas é um ponto de partida que serve para indicar a posição do centro do vermelho do primeiro semáforo do corredor, que é a referência para cálculo das defasagens dos demais em relação ao situado na interseção crítica.

Também é fundamental lembrar que se a defasagem do último semáforo for diferente de zero é necessário fazer com que ela seja igual a zero, para defasar todos os centros dos vermelhos de forma compatível. Por exemplo, se $\theta_{cn} = 5$, é necessário descontar 5 segundos de todas as defasagens, obtendo então θ_{cn} igual a zero (lembrando que para defasagens negativas deve ser somado o valor do ciclo c).

Assim, o método proposto tomou como base o que foi apresentado e testado por MAGALHÃES (1981), ou seja, incrementar uma das larguras da banda em 5 segundos e ir ajustando as demais até uma delas se igualar a g_{\min} .

As larguras das bandas b_{ij} e b_{ji} serão calculadas como foi determinado anteriormente e a sincronização ajustada será calculada de forma idêntica ao que será apresentado a seguir.

A Figura IV.3 apresenta um exemplo semelhante ao apresentado na Figura IV.2, uma via arterial com cinco interseções, mas agora com larguras de bandas máximas desiguais.

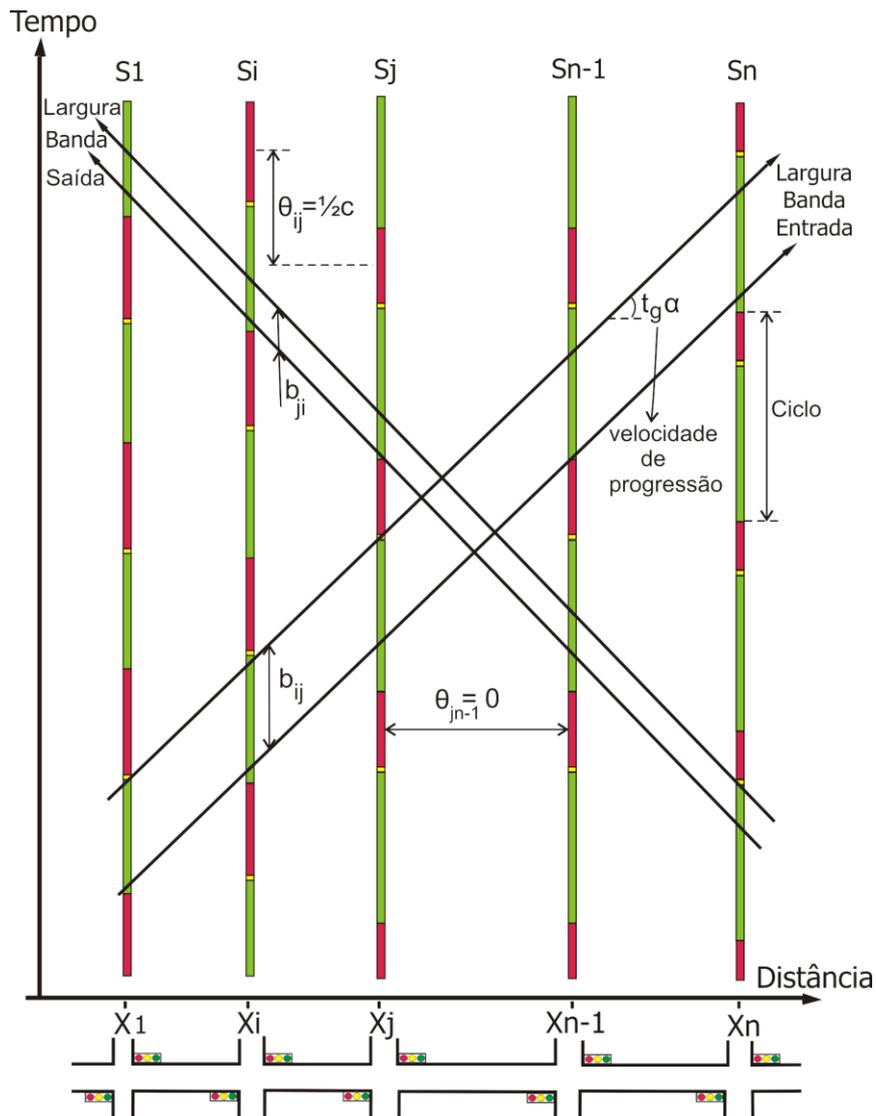


Figura IV.3: Diagrama Espaço-Tempo para uma Arterial com Bandas Máximas Desiguais (Adaptado de LITTLE et al., 1966)

IV.6. Sincronização Semafórica Utilizando o Método Proposto

A sincronização dos semáforos de um corredor corresponde ao cálculo das defasagens entre os sinais da via considerada.

Segundo o DENATRAN (1984), as defasagens são determinadas medindo-se os deslocamentos do início do período de verde das interseções individuais em relação ao início do período de verde do semáforo base.

O método proposto considera as defasagens ótimas 0 ou $\frac{1}{2}$, como sendo a defasagem relativa (θ_{ij}), do sinal S_i em relação ao sinal S_j , em segundos (com $0 \leq \theta_{ij} < r$), medido do centro do vermelho de S_i até o próximo centro de vermelho de S_j . Uma situação típica é ilustrada na Fig.IV.3, onde está claro que a defasagem entre os sinais (centro de vermelho para centro de vermelho), é 0 ou $\frac{1}{2}$ do ciclo.

A seguir, é apresentado o procedimento utilizado pelo modelo proposto para determinar as defasagens.

IV.6.1. Defasagens para Larguras de Bandas Iguais em Ambos os Sentidos

Inicialmente o método obtém as defasagens para as larguras de bandas iguais, pois é mais simples determinar as bandas iguais para os dois sentidos, através do diagrama espaço x tempo padrão, que é aquele em que o tempo de viagem t_{ij} ou t_{ji} é igual à metade do ciclo ($c/2$).

Assim, as defasagens são obtidas nos pontos de cruzamento dos diagramas das bandas b_{ij} e b_{ji} , conforme ilustrado na Figura IV.1. Dentre os valores obtidos, pelo menos um deles é o máximo possível e para a situação $t_{ij} = t_{ji}$, os valores das defasagens que fornecem bandas iguais são $\theta_{ij} = 0$ e $\theta_{ij} = c/2$. De forma geral, os valores da banda para quaisquer valores de t_{ij} e t_{ji} , podem ser obtidos através de interpolação linear dos diagramas de banda.

Para sincronizar os semáforos com larguras iguais de bandas máximas, é necessário especificar:

- Número dos semáforos: são dados em ordem da posição ao longo da via, ou seja, $i = 1, 2, \dots, n$;
- Direção crescente, que pode ser chamada de entrada (*inbound*);
- Tamanho do ciclo semafórico (c), em segundos;
- Tempos de vermelho r_1, r_2, \dots, r_n , em segundos;
- Posição dos semáforos, x_1, x_2, \dots, x_n , em metros;
- Velocidades entre os semáforos, v_{ij} e v_{ji} nos sentidos de entrada (*inbound*) e de saída (*outbound*), em metros por segundo.

Então, utiliza-se a Equação IV.6, para determinar as defasagens entre os semáforos. Como visto anteriormente, quando $i = c$, tem-se as máximas larguras iguais de banda, sendo as constantes que podem assumir o valor de 0 ou $\frac{1}{2}$, para cada interseção ($\delta_{c1}, \delta_{c2}, \dots, \delta_{cm}$), os correspondentes maximizantes de δ . Desta forma, a sincronização com a qual se consegue máximas larguras iguais de banda nos dois sentidos de tráfego é obtida através das defasagens $\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cm}$, calculadas pela substituição dos valores de δ_{cj} na Equação IV.6.

A defasagem inicial ($\theta_{ij_{inicial}}$), é calculada para todas as interseções do corredor, sendo determinada em relação à banda crítica (B_c).

O algoritmo realiza a seguinte verificação:

$$SE: \quad B_c - \frac{r_j}{2} < 0 \quad (IV.14)$$

- *SIM*: $fazer \left(B_c - \frac{r_j}{2} \right) + ciclo = \theta_{ij_{inicial}}$
- *NÃO*: $fazer \left(B_c - \frac{r_j}{2} \right) = \theta_{ij_{inicial}}$

Onde:

- B_c : Banda crítica do corredor, em função da interseção crítica (g_{\min});
- r_j : Tempo de vermelho da via principal em função do ciclo;
- $\theta_{ij_{inicial}}$: Defasagem inicial no sentido ij .

Após calcular a defasagem inicial, o método fixa as bandas (b_{ij} e b_{ji}), em relação à interseção crítica, pois é ela que limita a banda. Para tal, ajusta a sincronização em relação ao seu comprimento e determina a defasagem em relação à interseção crítica (θ_{ic}). Então:

$$\theta_{ic} = B_c - \theta_{ij_{inicial\ crítica}} \quad (IV.15)$$

A defasagem inicial crítica ($\theta_{ij_{inicial\ crítica}}$), é calculada em relação à interseção crítica de forma análoga à determinada anteriormente.

IV.6.2. Cálculo da Defasagem de Programação

Após as bandas fixadas e calculadas as defasagens em relação à interseção crítica, o método determina a defasagem do corredor, θ_{ij} e θ_{ji} , da seguinte forma:

$$SE: \theta_{ij_{inicial}} = \theta_{ij_{inicial\ crítica}} \quad (IV.16)$$

- *SIM*: Armazenar $\theta_{ij_{inicial\ crítica}}$ e considerar como a defasagem de programação
- *NÃO*: Calcula as defasagens $\theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}]$, para todas as interseções e armazena.

Após armazenar as defasagens, faz novamente a seguinte verificação:

$$SE: \theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}] > \text{ciclo} \quad (IV.17)$$

- *SIM*: Faz $\theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}] - \text{ciclo}$.
Armazena como defasagem de programação.
- *NÃO*: Faz $SE: \theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}] < 0$
 - *SIM*: Faz $\theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}] + \text{ciclo}$.
Armazena como defasagem de programação.
 - *NÃO*: Faz $\theta_{ic} + [\text{Intervalo } \theta_{ij_{inicial1}} \text{ até } \theta_{ij_{inicial1n}}] = \text{defasagem de programação}$.
Armazena.

IV.7. Diagrama Espaço - Tempo

A construção do diagrama espaço-tempo ou diagrama de bandas tem como objetivo básico determinar a melhor defasagem para todo o sistema semafórico e identificar os valores de banda verde obtidos para ambos os sentidos de tráfego. Representam graficamente os tempos semafóricos de cada cruzamento e suas respectivas distâncias entre si, a uma velocidade de progressão constante desejável representada por uma reta que expressa seu valor ($tg \alpha$). Também é representada a variação da largura das bandas nos sentidos de tráfego em função da defasagem. Todo este procedimento é feito utilizando os resultados obtidos e rotinas em Visual Basic.

A Figura IV.4 apresenta um diagrama de bandas, com faixas verdes bidirecionais (sentido $i-j$ e $j-i$), e as representações de suas relações algébricas para a definição da variação da largura das bandas b_{ij} e b_{ji} em função da defasagem θ_{ij} .

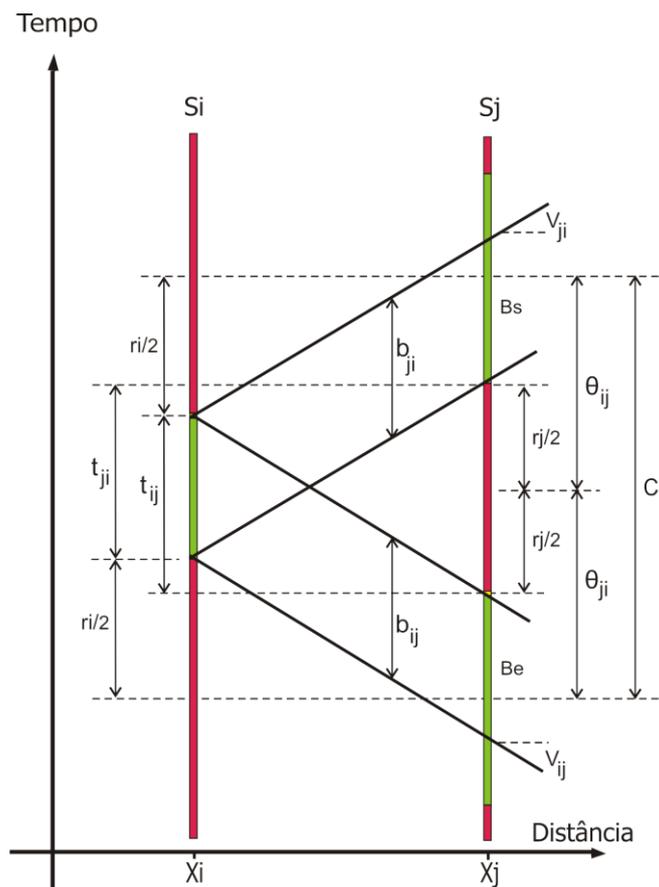


Figura IV.4 - Diagrama de Bandas com Faixas Verdes Bidirecionais para os Sentidos $i-j$ e $j-i$ (Adaptado de DUTRA, 2005)

Ao final, com o diagrama montado, é possível verificar se o corredor estudado está ou não sincronizado, a quantidade de paradas e a largura da banda, obtendo uma ampla visualização do sistema.

Caso os valores encontrados não sejam satisfatórios é possível variar as defasagens, tomando como base os valores obtidos pelo algoritmo, com o objetivo de se ter defasagens mais próximas da realidade e uma melhor banda ótima para o corredor estudado.

Vale ressaltar que a velocidade também pode ser modificada, desde que respeitada a velocidade máxima da via em questão. Esta análise é feita antes e depois das melhorias propostas.

IV.8. Método Proposto

A estrutura lógica do método compõe-se de nove etapas, como pode ser constatado no Fluxograma apresentado ao final deste capítulo, elucidativo das diversas fases do método, o que possibilita uma visão mais detalhada do sistema.

A sincronização dos semáforos e a determinação do desempenho do tráfego, que serão mencionados durante a descrição dessas etapas, são realizadas segundo os critérios estabelecidos anteriormente neste capítulo.

Os dados de entrada, necessários para aplicação do método são:

- Quantidade de interseções semaforizadas;
- Distâncias entre as interseções;
- Tempo de ciclo comum, tempos de verde, amarelo e vermelho dos semáforos, obtidos a partir das programações semafóricas;
- Velocidades de progressão, as quais obedecem aos limites regulamentados para as vias.

De posse destes parâmetros, que caracterizam o corredor estudado, o método inicia a simulação. Ao final do processo é feita uma comparação com a situação atual, onde é testada a efetividade do método em produzir melhorias nas condições de tráfego.

Após a entrada dos dados no sistema, começa a Etapa 1 onde é determinada, para cada semáforo do corredor, a parcela da equação para cálculo das defasagens ótimas (Y), para cada interseção.

Na Etapa 2 é realizado o cálculo da largura de banda igual, onde se determina a fase do semáforo j em função do semáforo i para a largura de banda máxima. Também é feito um teste para verificar se a máxima largura de banda, entre os semáforos de i e j , é menor que a melhor largura de banda prevista pelo sistema. Caso seja negativo, o método mantém o valor mínimo da largura da banda, obtido até aqui para o semáforo i e armazena a largura de banda atual como a melhor largura da banda do sistema, a fase relativa do semáforo i e o correspondente U_{ij} (calculado em função das defasagens ótimas, que correspondem a 0 ou 1/2 do valor do ciclo semaforico, para velocidades de progressão idênticas). Caso contrário, armazena a largura de banda atual como a melhor largura da banda do sistema, a fase relativa do semáforo i e o correspondente U_{ij} .

A Figura IV.5 apresenta a tela inicial do programa, que processa o método proposto. Nela pode ser visualizado, destacado em amarelo na aba Entrada Dados do sistema, o cálculo dos parâmetros mencionados anteriormente, para um exemplo hipotético. Em azul está realçado δ_{ij} , ou seja, a constante que pode assumir o valor 0 ou 1/2, para cada interseção.

Controlador	Distância Acumulada	Distância (m)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Plano: 1	Horário: 7:00 - 12:00	U_{ij}														
1	2	3	4	5	Verde (s)	Vermelho (s)	Y	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
11	0				30	27	0	1	0,5	0,6	0,1	0,3	0,8	0,6	0,1	0,1	0,6				
12	230	230	27,6	27,6	25	32	0,42	0,4	0,9	1	0,5	0,7	0,2	0,1	0,6	0,5	0				
13	410	180	21,6	21,6	15	42	0,70	0,7	0,2	0,3	0,8	1	0,5	0,3	0,8	0,8	0,3				
14	670	260	31,2	31,2	32	25	1,36	0,4	0,9	0,9	0,4	0,7	0,2	1	0,5	0,5	1				
15	890	220	26,4	26,4	41	16	1,87	0,9	0,4	0,5	1	0,2	0,7	0,5	0	1	0,5				

Fig.IV.5 – Tela Inicial do Método para Entrada dos Dados

A defasagem final para a largura máxima de banda igual é feita na Etapa 3, e na Etapa 4 é determinado o valor do verde mínimo (g_{min}).

A seguir, é apresentado na Figura IV.6 a sequência do exemplo indicado anteriormente, onde pode ser visualizado o procedimento para obtenção de $(U_{ij} - r_j)$, da banda de passagem e da interseção crítica. Em destaque vermelho é indicada a banda que foi calculada para a interseção crítica (b_{ic}).

	Controlador	Distância	Vermelho (s)	Uij - rj					δij					Bi
				"11	"12	"13	"14	"15	"11	"12	"13	"14	"15	
7	11	230	27	0,55	0,048	0,105	0,227	0,362	0	0	0	0	0,5	0,0483
9	12	180	32	0,468	0,467	0,023	0,145	0,28	0,5	0	0	0,5	0	0,023
11	13	42	42	0,245	0,243	0,3	0,422	0,557	0,5	0,5	0	0,5	0	0,243 ^{b_{ic}}
13	14	260	25	0,407	0,405	-0,038	0,583	0,718	0,5	0	0	0	0,5	-0,0383
15	15	220	16	0,422	0,42	-0,023	0,098	0,733	0	0,5	0,5	0	0	-0,023
19	Banda (s) =		14,6											
20	Interseção Crítica		13											

Figura IV.6 – Tela do Método para Cálculo da Banda e Interseção Crítica

O próximo passo é fixar as bandas de entrada e de saída e verificar se as mesmas são iguais ou maiores que a largura total da banda disponível. Caso positivo fixa a banda igual ao verde mínimo e segue para a Etapa 5. Do contrário, realiza outra verificação, ou seja, se a banda é igual ou maior que o verde mínimo. Sendo verdade, fixa a banda igual ao verde mínimo e vai para a Etapa 5, caso contrário ir direto para a Etapa 5.

Na Etapa 5 é fixada a banda da direção oposta igual ao resto da largura da banda disponível. Se o valor encontrado for negativo é estabelecido um valor nulo. De posse destes valores, determina-se a sincronização e avalia-se o desempenho do tráfego correspondente. Este processo é repetitivo, e termina quando a última iteração realizada é aquela em que o valor de uma das bandas se iguala ao verde mínimo (g_{\min}). Todo este procedimento é feito para ambos os sentidos.

Dando continuidade ao exemplo hipotético, elaborado para testar o método, é apresentada na Figura IV.7 a tela para obtenção da defasagem.

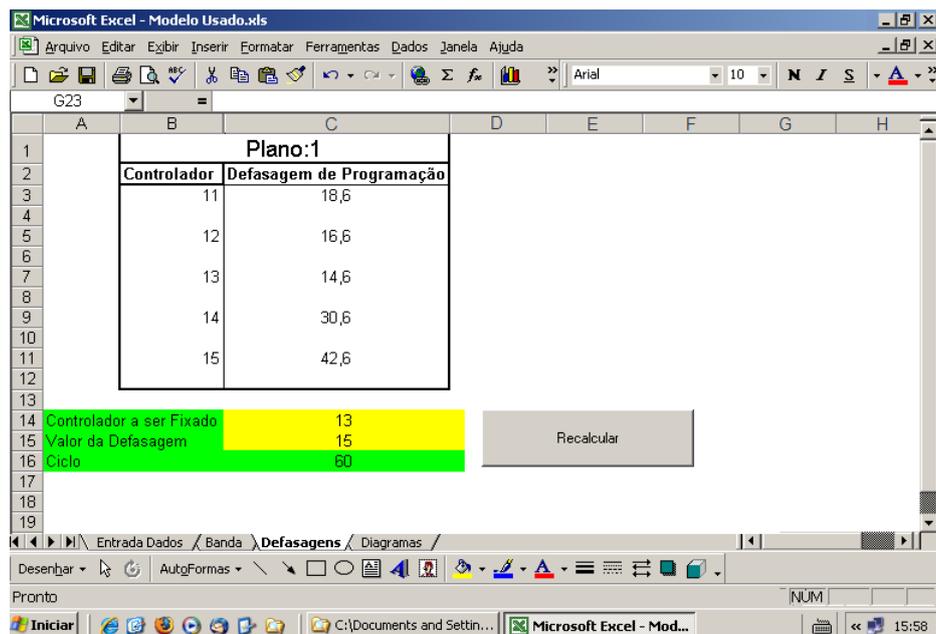


Fig.IV.7 – Tela do Método para Cálculo da Defasagem

A defasagem final para a largura de banda desigual é feita na Etapa 6, e na Etapa 7 é elaborado o diagrama de ondas com distâncias, velocidades, tempos e defasagens.

Na Etapa 8 é feita uma análise dos resultados da simulação, através do diagrama, onde é verificado se a largura da banda e o número de paradas, obtidos pelo método, são mais adequados que os da situação atual. Caso positivo, encerra-se o processo. Do contrário, é verificado se a velocidade de progressão pode ser alterada, respeitando a velocidade regulamentada para a via. Na possibilidade de alterar a velocidade, todo o processo é refeito, desde a Etapa 1. Caso contrário, a situação atual é mantida. Como o método proposto somente otimiza as defasagens, não alterando os demais parâmetros dos planos semafóricos, a situação atual é mantida.

A Figura IV.8 apresenta o diagrama de ondas para o exemplo hipotético, onde a quantidade de paradas e a largura de banda podem ser observadas.

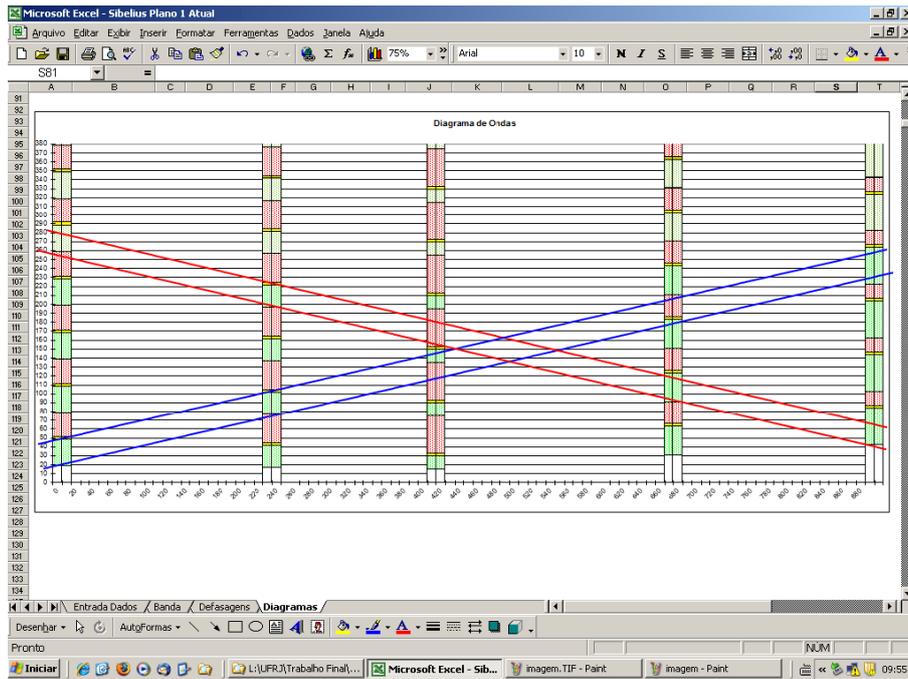


Fig.IV.8 – Diagrama elaborado pelo Método para o Exemplo Hipotético

A seguir, é apresentado o Fluxograma do Programa para Maximizar Larguras de Bandas (Fig.IV.9), onde podem ser constadas as diversas etapas do método proposto.

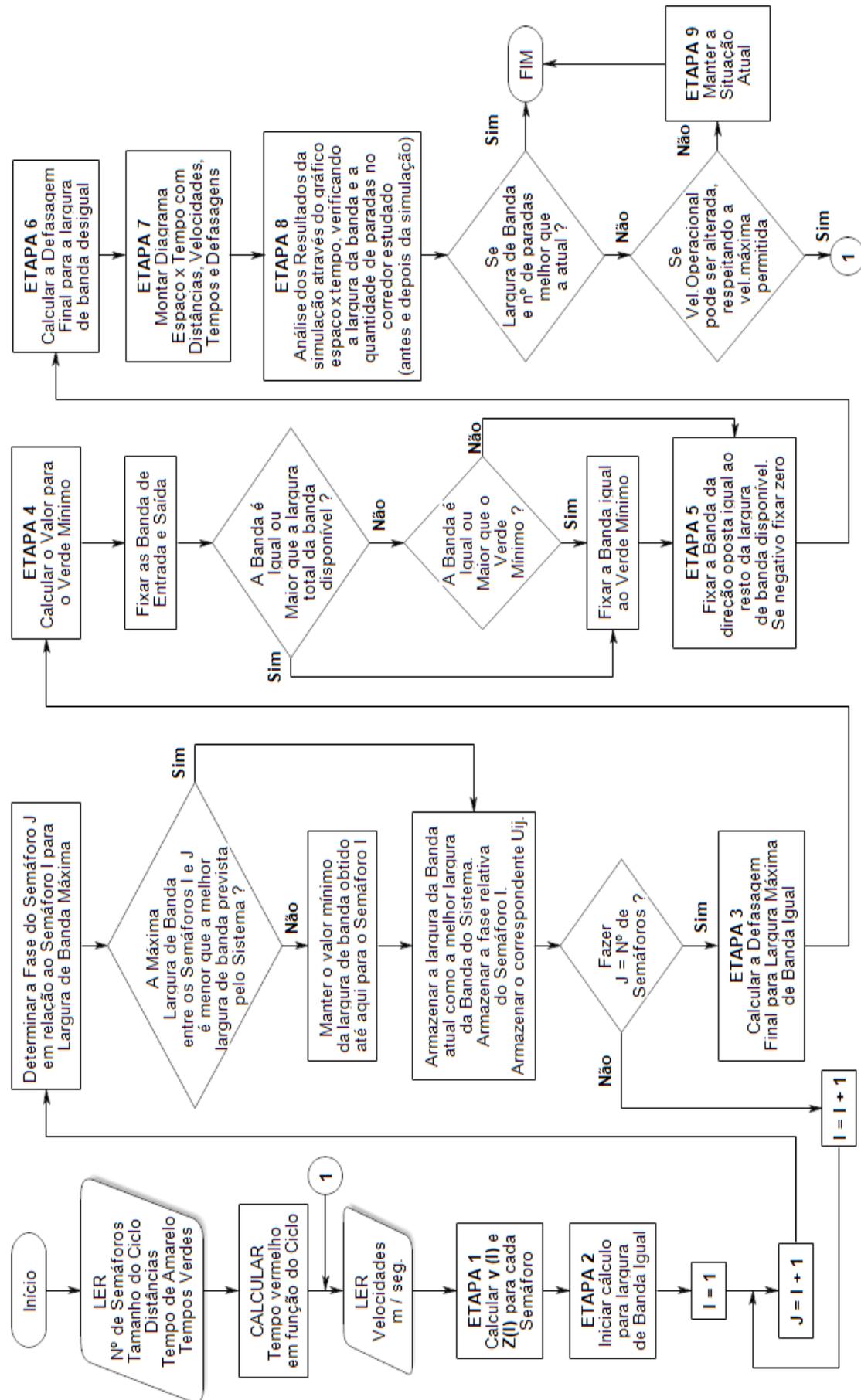


Figura IV.9 Fluxograma do Método Proposto

IV.9. Considerações Finais

O método proposto determina esquemas de coordenação flexível e calcula a largura de banda máxima de uma forma relativamente rápida e simples, podendo ser útil na definição das estratégias operacionais em vias arteriais.

Considerando que as velocidades das vias públicas são regulamentadas pelo corpo técnico municipal em função de suas características funcionais, de projeto e em função do Código de Trânsito Brasileiro, existe uma faixa de variação de velocidades de progressão possíveis que podem ser testadas com o uso do método proposto, visando identificar a solução que gera maiores larguras de banda para uma velocidade de progressão compatível com o tipo de via analisado.

Outra possibilidade é definir larguras de banda proporcionais à demanda de tráfego nos diferentes sentidos da via, possibilitando inclusive o uso de programações diferenciadas para períodos do dia. Da mesma forma, o ciclo comum e as programações semaforicas, podem ser testados na busca de uma solução que possibilite maiores larguras de banda. Entretanto, tais testes devem ser realizados com a modificação manual e sistemática dos parâmetros investigados. Novas rotinas podem ser elaboradas, no futuro para automatizar este processo de escolha de parâmetros. Da mesma forma, o método atual pode ser implementado com rotinas similares às existentes nos programas de coordenação atualmente disponíveis no mercado. Seria desejável, por exemplo, que o sistema levasse em consideração o movimento de conversão dos veículos (giro à esquerda), o que permitiria simular vias com conversões, aumentando a amplitude do sistema.

O procedimento apresentado neste trabalho tem como objetivo ser mais uma ferramenta que possibilite melhorar o fluxo de tráfego das vias arteriais, prejudicado pela ausência de sincronismo entre os sinais. Para tal, apresenta um método capaz otimizar as defasagens de corredores viários, operando em tempos fixos, sem a necessidade de contagens volumétricas, mas utilizando os antigos planos semaforicos como ponto de partida para a otimização. Tal proposta se deve à ausência de dotação orçamentária que várias cidades brasileiras têm para coleta periódica de dados de campo e aquisição de softwares de simulação, o que acarreta planos semaforicos defasados, ausência de

sincronismo e, conseqüentemente, prejuízo da fluidez do tráfego e da qualidade de vida da população.

No próximo capítulo é apresentado um estudo de caso, para uma área da cidade do Rio de Janeiro, para avaliação do método proposto.

CAPÍTULO V

ESTUDO DE CASO

V.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma aplicação do método, descrito no capítulo anterior, para uma área da zona sul da cidade do Rio de Janeiro. São definidas a estrutura da rede viária e os carregamentos, e ao final são apresentados os resultados.

Para analisar como as alterações propostas pelo método se comportam no corredor em estudo, utilizou-se um modelo de micro simulação de tráfego que permite uma análise qualitativa das alterações implantadas em campo, uma vez que, as medidas de velocidade média, tempo de percurso e quantidade de paradas obtidas em campo indicam apenas que houve melhoria.

Desta forma, foi utilizado o programa TSIS-NETSIM (FHWA, 2001), pela facilidade de acesso ao seu manual de procedimentos, maior familiaridade de uso e também aos diversos trabalhos publicados com base neste simulador.

A seguir é mostrado o motivo da escolha da área de estudo e em seguida é realizada a micro simulação, com a descrição de todas as etapas, pelo método proposto e pelo TSIS-NETSIM, para analisar os resultados obtidos pelo método apresentado no capítulo anterior.

V.2. Escolha da Área de Estudo

A área de estudo para aplicação do método está situada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, compreendendo as vias Av. Padre Leonel Franca (Praça Sibelius), R. Mário Ribeiro, Av. Visconde de Albuquerque, R. Bartolomeu Mitre, R. Ministro Raul Machado e Av. Borges de Medeiros, sendo denominado Corredor Sibelius.

O corredor Sibelius, continuação da autoestrada Lagoa-Barra, é a principal ligação entre a Barra da Tijuca e a Zona Sul (RJ), recebendo diariamente 120.000 veículos, com uma velocidade média de 30 km/h ao longo do dia, dados de 2010 da Gerência de Informações de Tráfego da CET-RIO, conforme pode ser constatado na Tabela V.1 e no Gráfico V.1, onde é mostrada a variação do tráfego ao longo do dia, enfatizando-se os períodos de pico e entrepico.

Tabela V.1 - Resumo dos Volumes de Tráfego

RESUMO DOS VOLUMES DE TRÁFEGO - 2010																						
 <p>RIO PREFEITURA</p> <p>CET-RIO</p> <p>DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO GERÊNCIA DE INFORMAÇÕES DE TRÁFEGO</p>			<p style="text-align: center;">LEGENDA</p> <table border="1"> <tr> <td>VPM</td> <td>Volume do Pico da Manhã (07:00 às 10:00 hs)</td> </tr> <tr> <td>VEP</td> <td>Volume do Entrepico (10:00 às 17:00 hs)</td> </tr> <tr> <td>VPT</td> <td>Volume do Pico da Tarde (17:00 às 20:00 hs)</td> </tr> <tr> <td>VDT</td> <td>Volume Diário Total (UCP)</td> </tr> <tr> <td>VR</td> <td>Velocidade Regulamentada</td> </tr> <tr> <td>VM</td> <td>Velocidade Média</td> </tr> </table>								VPM	Volume do Pico da Manhã (07:00 às 10:00 hs)	VEP	Volume do Entrepico (10:00 às 17:00 hs)	VPT	Volume do Pico da Tarde (17:00 às 20:00 hs)	VDT	Volume Diário Total (UCP)	VR	Velocidade Regulamentada	VM	Velocidade Média
			VPM	Volume do Pico da Manhã (07:00 às 10:00 hs)																		
			VEP	Volume do Entrepico (10:00 às 17:00 hs)																		
			VPT	Volume do Pico da Tarde (17:00 às 20:00 hs)																		
			VDT	Volume Diário Total (UCP)																		
			VR	Velocidade Regulamentada																		
			VM	Velocidade Média																		
Estudo	Bairro	AP	Local	VOLUME				VELOCIDADE		Data												
				VPM	VEP	VPT	VDT	VR (Km/h)	VM (Km/h)													
Praça Sibelius - Av. Padre Leonel Franca	Gávea	2.1	Sentido Barra da Tijuca	3790	3625	3866	57908	70	35	28/04/2010												
	Gávea	2.1	Sentido Centro	3952	4032	3258	60507	70	30	28/04/2010												

Fonte: Gerência de Informações de Tráfego (GIT) - CETRIO, 2010

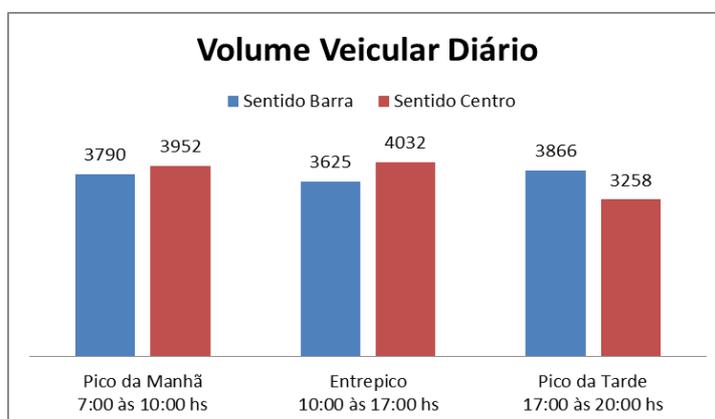


Gráfico V.1 - Variação do Tráfego ao Longo do Dia

(Fonte: Gerência de Informações de Tráfego – GIT, CET-RIO, 2010)

Para visualização das vias existentes na área de estudo foi elaborado a Figura V.1.

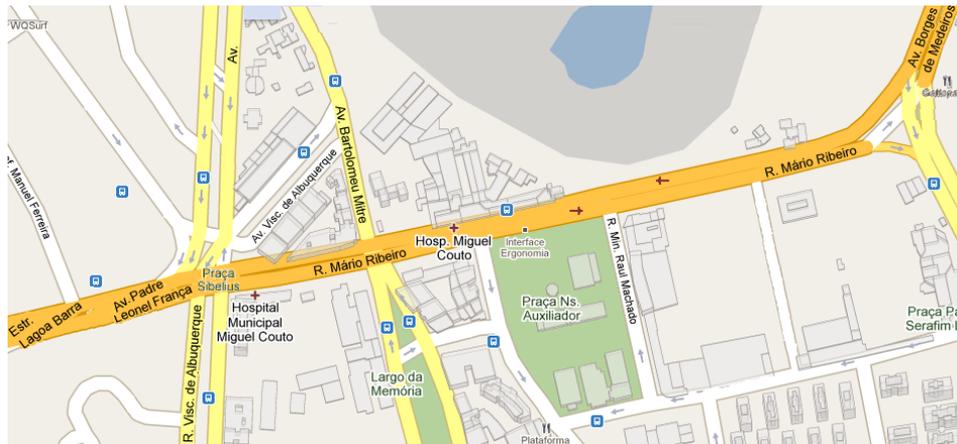


Figura V.1 - Identificação das Principais Vias da Área de Estudo

(Fonte: Google Maps, 2010)

O fluxo de veículos que inicia ou termina o trajeto, sentido Barra da Tijuca ou Zona Sul, esbarra no cruzamento das Avenidas Padre Leonel Franca com Visconde de Albuquerque (Praça Sibelius), que contem um controlador operando com 16 fases semaforicas distintas, o que demonstra a complexidade do local. A Figura V.2 mostra a localização espacial do corredor Sibelius, englobando a Autoestrada Lagoa-Barra, passando pelo corredor em estudo, até chegar a Av. Borges de Medeiros, próximo da Lagoa Rodrigo de Freitas, importante via de ligação com o Túnel Rebouças, para acesso ao centro do Rio de Janeiro.



Figura V.2 - Localização Espacial da Auto Estrada Lagoa-Barra

(Fonte: SOUZA, 2003)

As retenções no tráfego causadas pelo corredor Sibelius têm ocasionado vários transtornos às suas vias lindeiras, tais como: Avenidas Visconde de Albuquerque e Bartolomeu Mitre, Rua Ministro Raul Machado, entre outras, prejudicando a fluidez do tráfego nesta região.

A Figura V.3, mostra como fica o trânsito nas imediações da Praça Sibelius e nas proximidades da Lagoa Rodrigo de Freitas, no pico da manhã (07:00 às 10:00 hs). Pelas fotos, obtidas através das câmeras da CET-RIO (setembro/2009), pode-se visualizar o acúmulo excessivo de veículos em fila nas aproximações das interseções semaforizadas da área de estudo, bloqueando-as e ocasionando acréscimos no tempo de viagem dos motoristas, entre outros prejuízos sociais consequentes.

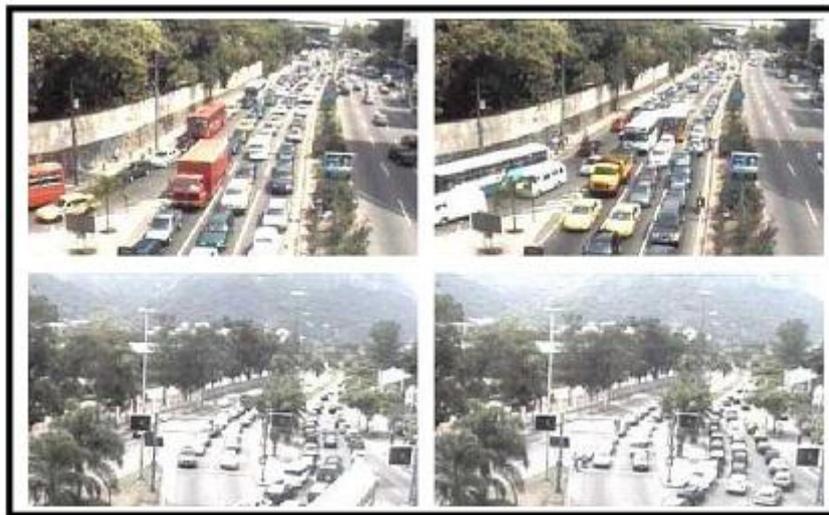


Figura V.3 - Trânsito nas Imediações da Praça Sibelius - Pico Manhã: 7 às 10 hs
(Fonte: Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro – CET-RIO, 2010)

Atualmente, vários são os projetos e/ou ideias propostas para solucionar os frequentes congestionamentos nesta área, sendo um dos corredores prioritários da gestão atual (2009-2012), para melhoria da fluidez do tráfego.

Portanto, com o problema caracterizado, justifica-se a escolha desse local para a aplicação do método proposto nesta pesquisa, já que se provou existir um gargalo no trânsito da Zona Sul do RJ.

V.3. Levantamento das Características Físicas e Operacionais

Primeiramente, com a utilização da base digitalizada, fornecida pelo Instituto Pereira Passos (IPP), disponibilizada na escala de 1:2000, Ano do Voo 1990, atualizada em 2000, pôde-se obter as principais características geométricas do corredor, como greide das vias, comprimento dos *links* e quantidade de faixas de tráfego, necessárias para simulação.

Para a obtenção de informações quanto à operação do corredor estudado, foram realizadas visitas ao local escolhido com o intuito de conhecer e entender o comportamento do tráfego circulante nesta área, como movimentos permitidos e proibidos (realizados irregularmente) e paradas irregulares, para tornar-se apto a realizar uma análise da circulação dos veículos desta área, caracterizando o tráfego da rede viária estudada, definindo as orientações e sentidos dos fluxos, realizando o mapeamento do tráfego que circula pelos nós e *links* da rede. Estas observações feitas *in loco* também tiveram o propósito de representar da maneira mais fiel possível as condições das vias, o comportamento dos motoristas e do tráfego no período em estudo, ou seja, pico da manhã (07:00 às 10:00hs).

Na Figura V.4, visualiza-se o corredor Sibelius digitalizado.

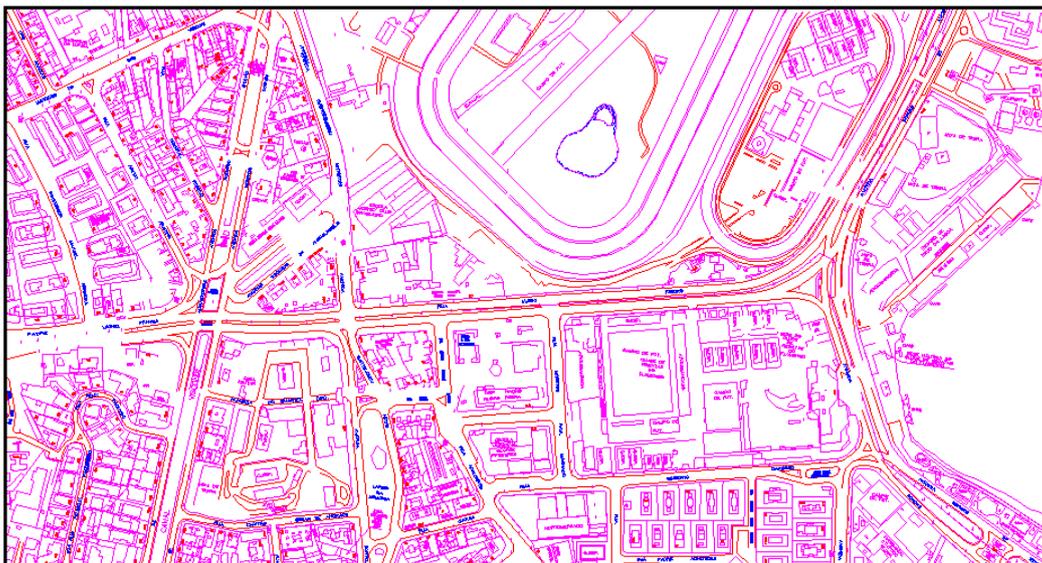


Figura V.4 - Base Digitalizada do Corredor Sibelius

(Fonte: Base de dados da CET-RIO, 2009)

Os dados para implementação do método foram obtidos junto à Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (CET-RIO), órgão municipal que dispõe dos planos semaforicos de todos os trechos e de câmeras para o monitoramento do tráfego alocadas nas interseções mais importantes da cidade do Rio de Janeiro.

Após um mapeamento das câmeras da CET-RIO, chegou-se à conclusão de quais poderiam auxiliar no desenvolvimento da pesquisa, estando situadas na Av. Visconde de Albuquerque x Padre Leonel Franca (Praça Sibelius), e na R. Mário Ribeiro x Av. Borges de Medeiros, apresentadas na Figura V.5.

Com relação aos semáforos existentes no corredor, também representados na Figura V.5, foram identificadas e obtidas as informações referentes aos planos semaforicos dos respectivos controladores, estabelecidos pela CET-RIO para determinados períodos do dia.

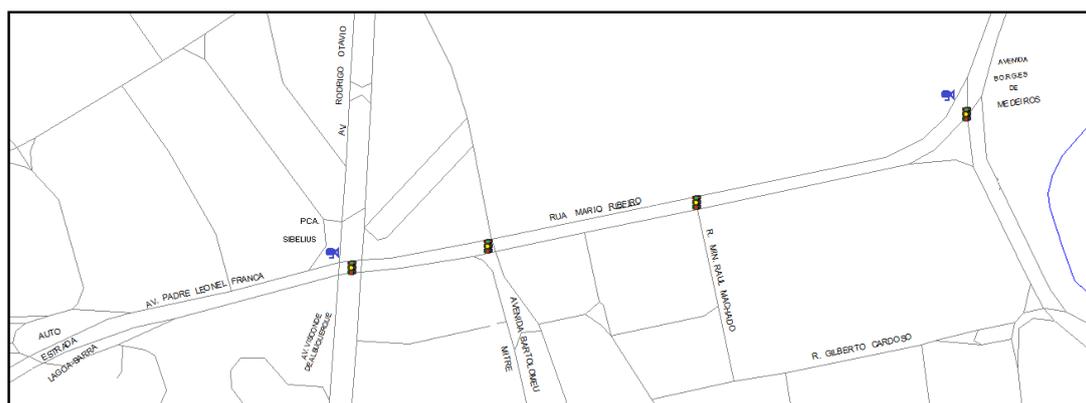


Figura V.5 - Localização dos Semáforos e das Câmeras da Área em Estudo

(Fonte: CET-RIO, 2010)

Com o auxílio das câmeras e planos semaforicos da CET-RIO, das distâncias entre os semáforos, obtidas na sua base de dados digitalizada e a velocidade mínima e máxima permitida nas vias em questão, a pesquisa dos dados foi facilitada e, por conseguinte, foram utilizadas as informações do ciclo, diagrama de estágios e defasagens (*offsets*) dos semáforos, para o pico da manhã, período simulado pelo método proposto e implantado posteriormente.

A CET-RIO também disponibilizou as contagens volumétricas do tráfego circulante nos principais cruzamentos requeridos pelo estudo, tais como: Av. Padre Leonel Franca (na

altura da Rua Prof. Manuel Ferreira), Av. Bartolomeu Mitre x Rua Mário Ribeiro e Rua Mário Ribeiro x Rua Ministro Raul Machado. Porém, em alguns pontos específicos da rede viária em estudo foram realizadas contagens volumétricas classificadas de veículos (*in loco* – pico da manhã), para complementar as informações obtidas através da CET-RIO.

Os dados de tempo de viagem e quantidade de paradas das situações atual e proposta foram obtidos através de pesquisas de velocidade retardamento, em um dia típico, realizada no corredor.

V.4. Aplicação do Método na Área de Estudo

Com a obtenção de todos os dados necessários para simulação, como descritos anteriormente e, conseqüentemente, com os devidos tratamentos e filtragens desses dados, foi iniciado o processo.

Conforme dito nos capítulos anteriores, os planos semaforicos utilizados pela CET-RIO estão defasados em mais de 10 anos, não representando mais o tráfego atual. Porém, como a proposta deste trabalho é otimizar corredores viários, modificando apenas as defasagens, estes planos serviram como ponto de partida para otimização do corredor em estudo.

O corredor Sibelius possui uma extensão total de 820 m, com as vias sinalizadas, vertical e horizontalmente, com faixas de rolamento variando entre 3,00 e 3,50 metros, com uma velocidade máxima de 70 km/h (controlada por radar instalado na praça Sibelius), e com um tráfego elevado tanto na via principal quanto nas vias transversais. Possui 4 cruzamentos semaforizados com diferentes espaçamentos entre eles, conforme pode ser observado na Figura V.6.

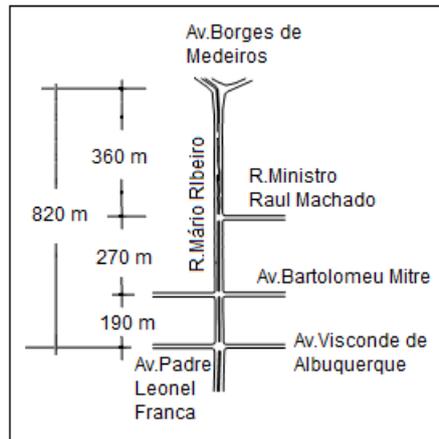


Figura V.6 - Desenho da Configuração Viária do Corredor Sibelius

A seguir, o corredor é simulado através do método proposto e, posteriormente, é realizada a verificação do mesmo através do TSIS-NETSIM.

V.4.1. Otimização da Área de Estudo Através do Método Proposto

Primeiramente é verificada a situação atual do corredor, mantendo as defasagens antigas e observando se o mesmo está ou não sincronizado. Após, é feita uma otimização, através do método proposto, para determinar a largura de banda máxima, as defasagens e o gráfico de ondas. Ao final, os resultados são comparados, antes e depois da otimização proposta, sendo feita uma análise das simulações e da pesquisa de velocidade retardamento realizada em campo, já que as alterações foram implantadas.

Para iniciar a simulação, tanto da situação atual como na proposta, é necessário entrar na aba Entrada Dados, e preencher as células destacadas em amarelo. Nestas células são introduzidas a velocidade (km/h), a distância entre semáforos (m), o nome da via ou numeração dos controladores, o ciclo, as porções de verde e o tempo de amarelo (em segundos), e o período do dia em que o plano semafórico é executado. Estes dados são obtidos dos planos semafóricos, da configuração viária (distância), e do resumo dos volumes de tráfego (Tabela V.1 - velocidade média).

Vale ressaltar novamente, que somente as defasagens serão alteradas, pois o método só otimiza as mesmas, não modificando os demais parâmetros dos planos semafóricos.

Para iniciar o processo de otimização do corredor basta preencher as células destacadas na aba Entrada Dados, conforme apresentado na Figura V.7. O método inicia os cálculos automaticamente, determinando o tempo de vermelho e os parâmetros iniciais.

Controlador	Distância Acumulada	Distância (m)	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Verde (s)	Vermelho (s)	Y	U _{ij}							
2425-0	0	0	0	0	87	49	0	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	0,5
2422-0	190	190	17,1	17,1	83	53	0,11	0,1	0,6	1	0,5	0,9	0,4	0,7	0,2
2424-0	460	270	24,3	24,3	64	72	0,21	0,2	0,7	0,1	0,6	1	0,5	0,8	0,3
2416-0	820	360	32,4	32,4	64	72	0,45	0,4	0,9	0,3	0,8	0,2	0,7	1	0,5

Figura V.7 - Entrada dos Dados no Método

A seguir, na Aba Banda, é determinada a banda de passagem e a interseção crítica, ambas destacadas em amarelo, conforme pode ser constatado na Figura V.8.

Controlador	Distância	Vermelho (s)	U _{ij} - r _j				δ _{ij}				B _i
			"2425-0"	"2422-0"	"2424-0"	"2416-0"	"2425-0"	"2422-0"	"2424-0"	"2416-0"	
2425-0	0	49	0,65	0,5136	0,27214	0,04071	0	0	0	0	0,0407
2422-0	190	53	0,25786	0,6214	0,38	0,14857	0,5	0	0	0	0,149
2424-0	270	72	0,36357	0,2271	0,48571	0,25429	0,5	0,5	0	0	0,227
2416-0	360	72	0,596	0,4566	0,21714	0,48571	0,5	0,5	0,5	0	0,2171
Banda (s) =		31,8									
Interseção Crítica		2424-0									

Figura V.8 - Cálculo da Banda e Interseção Crítica

Após, na aba Defasagens, são determinadas as defasagens de programação (otimizadas), como mostrado na Figura V.9.

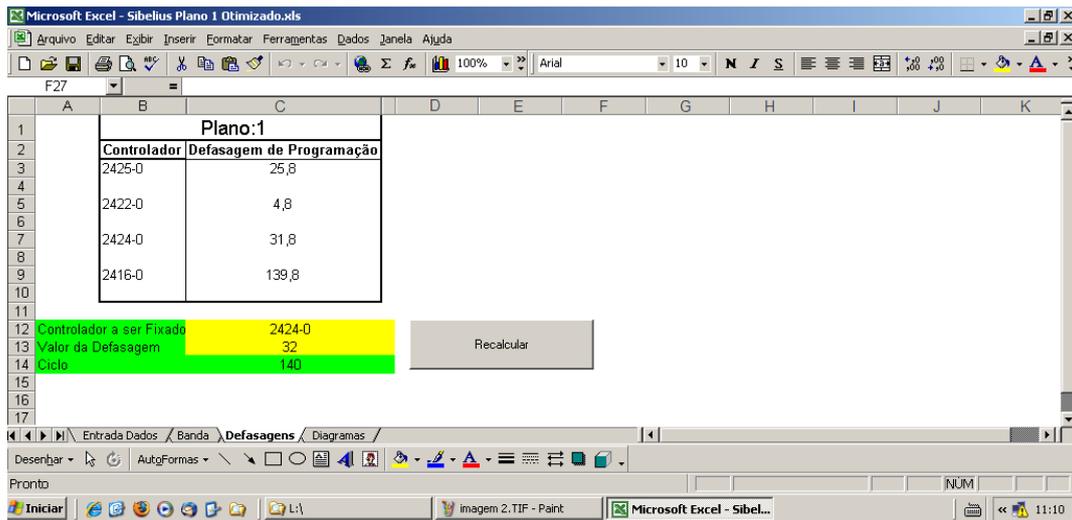


Figura V.9 – Defasagens de Programação (Otimizadas)

Por fim, o método elabora o Diagrama de Ondas, tendo como base todos os cálculos apresentados anteriormente. A Figura V.10 apresenta o gráfico.

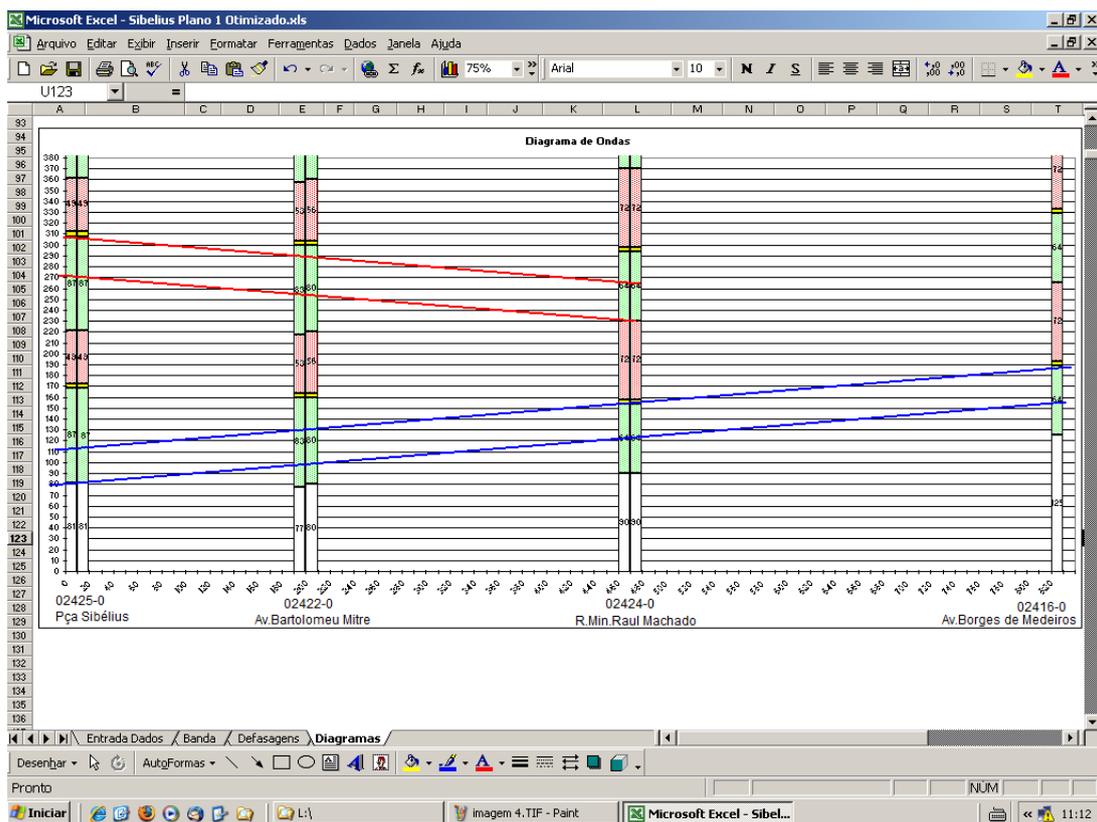


Figura V.10 - Diagrama de Onda Verde Otimizado

No caso da situação atual, onde as defasagens já são conhecidas, basta preencher as células em destaque da aba Entrada Dados (Figura V.7), seguir para aba Diagrama e

informar as defasagens atuais, pois não se está otimizando. Desta forma, após inserir estas defasagens na tabela, conforme ilustrado na Figura V.11, apresentada a seguir, o método elabora o Diagrama de Ondas desta situação (Figura V.12).

Diagrama de Onda Verde												
ciclo(s) = 140			Plano: 1									
n°	nó local	dist. relativa	distâncias absolutas	defasagens	primeiro verde	amarelo	vermelho	segundo verde	amarelo	vermelho		
2425-0	Praça Sibélius		0	80	87	4	49				NO	
			10	80	87	4	49				NO	
			20									
			30									
			40									
			50									
			60									
			70									
			80									
			90									
			100									
			110									
			120									
			130									
			140									
			150									
			160									
			170									
			180									
2422-0	Av. Bartolomeu Mitre		190	77	83	4	53				NO	
			200	80	80	4	56				NO	
			210									
			220									
			230									
			240									
			250									
			260									
			270									
			280									
			290									
			300									
			310									
			320									
			330									
			340									
			350									
			360									
			370									
380												
390												
2424-0	R. Min. Raul Machado		460	81	64	4	72				NO	
			470	81	64	4	72				NO	
			480									
			490									
			500									
			510									
			520									
			530									
			540									
			550									
			560									
			570									
			580									
			590									
			600									
			610									
			620									
			630									
			640									
650												
660												
670												
680												
690												
700												
710												
720												
730												
740												
750												
760												
770												
780												
790												
800												
810												
2416-0	Av. Borges Medeiros		820	81	64	4	72				NO	

Figura V.11 – Tela de Entrada dos Dados do Método - Situação Atual

Tal procedimento visa apenas verificar se o corredor está ou não sincronizado, o que pode ser constatado através do Diagrama de Ondas elaborado pelo método, mostrado na Figura V.12.

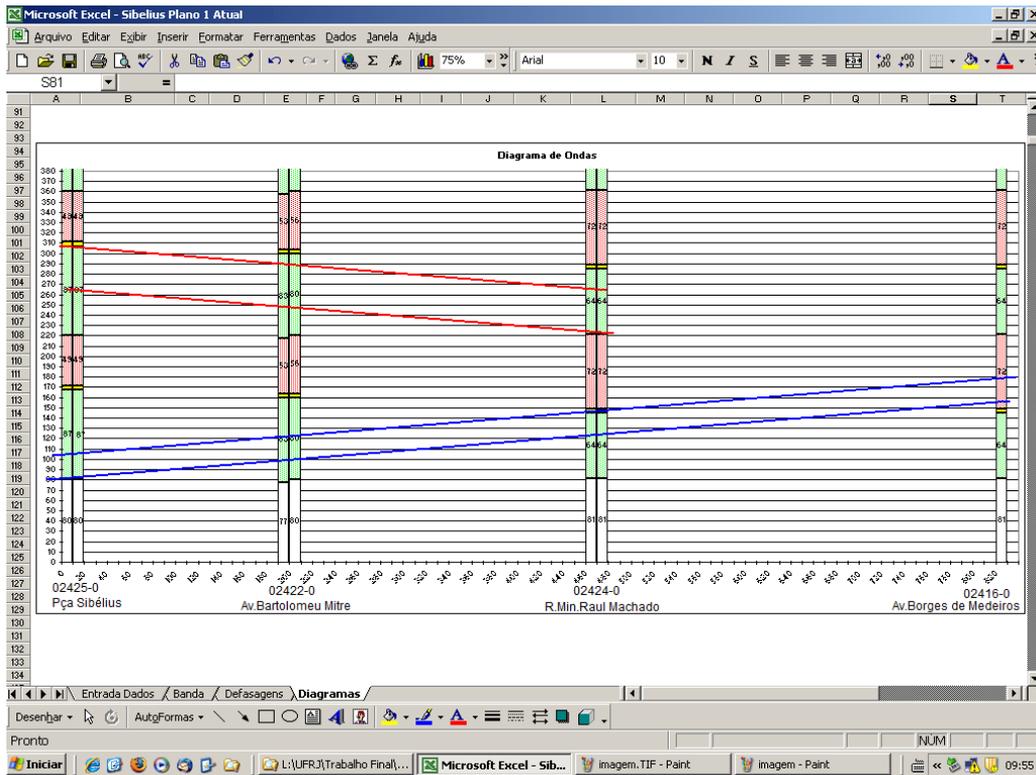


Figura V.12 - Diagrama de Onda Verde da Situação Atual

Como pode ser observado na Figura V.12, o sentido mais carregado, Praça Sibelius – Centro, para o pico da manhã (07:00 às 10:00 hs), possui uma banda de passagem menor (aproximadamente 20 segundos), que o sentido menos carregado (aproximadamente, 35 segundos), Centro – Barra da Tijuca, para o mesmo período. Também pode ser verificado que o fluxo é interrompido na altura da Av. Borges de Medeiros (controlador 2416-0), congestionando o corredor, conforme pode ser verificado através das câmeras da CET-RIO (Figura V.3), o que justifica a otimização do mesmo.

A Tabela V.2 apresenta as defasagens para os dois cenários simulados, atual e proposto, já que somente elas foram modificadas.

Tabela V.2 – Resumo das Defasagens

RESUMO DAS DEFASAGENS			
Trecho	Controlador	Defasagem (Seg)	
		Atual	Proposto
R. Mário Ribeiro x Av. Visconde de Albuquerque (Praça Sibélius)	2425-0	91	91
R. Mário Ribeiro x Av. Bartolomeu Mitre	2422-0	96	96
R. Mário Ribeiro x R. Min. Raul Machado	2424-0	81	90
R. Mário Ribeiro x Av. Borges de Medeiros	2416-0	81	125

Após a otimização (Figura V.10), a largura da banda verde do sentido mais carregado, Praça Sibélius – Centro, para o pico da manhã, passou de 20 para 35 segundos, não havendo mais interrupção no cruzamento da Av. Mário Ribeiro x Av. Borges de Medeiros. No sentido Centro – Barra, para o mesmo período, foi mantida a mesma banda, 35 segundos.

Desta forma, a aplicação do método resultou em uma melhoria para o corredor, para o pico da manhã, conforme já apresentado na Figura V.10.

V.4.2. Avaliação dos Resultados Obtidos pelo Método

Para testar os resultados obtidos é necessário avaliar quais condições de tráfego podem ser beneficiadas pela solução fornecida pelo método e qual é a melhoria no desempenho operacional do sistema viário em decorrência da otimização adotada. A eventual melhoria na qualidade operacional da via pode ser avaliada através das medidas de desempenho do sistema, tais como tempo de viagem, velocidade média e quantidade de paradas. Como as propostas obtidas pelo método foram implantadas no corredor Sibélius, foi possível obter *in loco* os tempos de viagem e a quantidade de paradas em cada sentido. Para tal, foram feitas diversas vistorias ao local, antes e depois da otimização, no período em estudo, o que permitiu avaliar se as medidas propostas pelo método surtiram o efeito esperado. Todas estas medidas de desempenho também foram analisadas pelo simulador TSIS-NETSIM, com o objetivo de avaliar o método.

Assim, após obter as medidas de eficiência, foram elaboradas tabelas para permitir uma melhor compreensão do que foi calculado. As tabelas V.3 e V.4 apresentam as

pesquisas de velocidade e retardamento feitas no corredor, em um dia típico, para a situação atual e proposta (otimizada), respectivamente, para o sentido Barra da Tijuca - Centro. Já as tabelas V.5 e V.6 apresentam a mesma pesquisa para o sentido oposto.

Tabela V.3 - Pesquisa Velocidade/Retardamento - Situação Atual

Sentido: Barra da Tijuca - Centro

PESQUISA VELOCIDADE / RETARDAMENTO: Sentido Barra - Centro (Situação Atual) - Terça: 06/10/09									
Viagem	Hora Início	Tempo Total (min)	Tempo Parado (min)		Tempo Movimento (min)		Vel. Média (km/h)	Vel. percurso (km/h)	Nº de paradas
			Absoluto	%	Absoluto	%			
1	8:45	5,02	2,20	43,8	2,82	56,2			2
2	9:00	7,69	3,82	49,7	3,87	50,3			3
3	9:13	6,90	3,37	48,8	3,53	51,2			3
4	9:25	10,32	3,72	36,0	6,60	64,0			4
5	9:36	3,20	1,10	34,4	2,10	65,6			1
6	9:45	2,70	0,88	32,6	1,82	67,4			2
7	9:54	3,20	1,10	34,4	2,10	65,6			1
Média		5,58	2,31		3,26		8,82	15,08	2,29
						Distância	0,82	km	

Tabela V.4 - Pesquisa Velocidade/Retardamento - Situação Proposta (Otimizada)

Sentido: Barra da Tijuca - Centro

PESQUISA VELOCIDADE / RETARDAMENTO: Sentido Barra - Centro (Situação Proposta) - Terça: 23/03/10									
Viagem	Hora Início	Tempo Total (min)	Tempo Parado (min)		Tempo Movimento (min)		Vel. Média (km/h)	Vel. percurso (km/h)	Nº de paradas
			Absoluto	%	Absoluto	%			
1	8:35	2,33	1,23	52,8	1,10	47,2			2
2	8:44	1,70	0,67	39,4	1,03	60,6			1
3	8:53	1,80	0,65	36,1	1,15	63,9			1
4	9:02	2,13	0,70	32,9	1,43	67,1			1
5	9:13	2,59	1,04	40,2	1,55	59,8			3
6	9:23	2,49	1,01	40,6	1,48	59,4			2
7	9:35	2,88	1,30	45,1	1,58	54,9			2
Média		2,27	0,94		1,33		21,63	36,95	1,71
						Distância	0,82	km	

Pelo que foi mostrado nas tabelas V.3 e V.4, houve uma melhoria das medidas de eficiência, já que diminuiu o tempo de viagem, consequência do aumento da velocidade média, e também a quantidade de paradas no corredor.

A seguir são apresentadas as tabelas V.5 e V.6, onde são mostradas as pesquisas de velocidade e retardamento para o sentido Centro - Barra da Tijuca, para a situação atual e proposta (otimizada), respectivamente.

Tabela V.5 - Pesquisa Velocidade/Retardamento - Situação Atual**Sentido: Centro - Barra da Tijuca**

PESQUISA VELOCIDADE / RETARDAMENTO: Sentido Centro - Barra (Situação Atual) - Terça: 06/10/09									
Viagem	Hora Início	Tempo Total (min)	Tempo Parado (min)		Tempo Movimento (min)		Vel. Média (km/h)	Vel. percurso (km/h)	Nº de paradas
			Absoluto	%	Absoluto	%			
1	8:53	3,78	1,00	26,5	2,78	73,5			2
2	9:10	1,45	0,25	17,2	1,20	82,8			2
3	9:21	1,63	0,63	38,7	1,00	61,3			1
4	9:33	0,40	0,00	0,0	0,40	100,0			0
5	9:42	1,46	0,58	39,7	0,88	60,3			1
6	9:50	1,27	0,30	23,6	0,97	76,4			1
7	10:00	1,05	0,38	36,2	0,67	63,8			1
Média		1,58	0,45		1,13		17,50	24,46	1,14
						Distância	0,46	km	

Tabela V.6 - Pesquisa Velocidade/Retardamento - Situação Proposta (Otimizada)**Sentido: Centro - Barra da Tijuca**

PESQUISA VELOCIDADE / RETARDAMENTO: Sentido Centro - Barra (Situação Proposta) - Terça: 23/03/10									
Viagem	Hora Início	Tempo Total (min)	Tempo Parado (min)		Tempo Movimento (min)		Vel. Média (km/h)	Vel. percurso (km/h)	Nº de paradas
			Absoluto	%	Absoluto	%			
1	8:30	2,17	0,90	41,5	1,27	58,5			2
2	8:40	2,04	0,97	47,5	1,07	52,5			1
3	8:50	1,28	0,50	39,1	0,78	60,9			1
4	8:58	1,50	0,75	50,0	0,75	50,0			1
5	9:10	0,72	0,00	0,0	0,72	100,0			0
6	9:20	0,47	0,00	0,0	0,47	100,0			0
7	9:27	0,90	0,10	11,1	0,80	88,9			1
Média		1,30	0,46		0,84		21,28	32,97	0,86
						Distância	0,46	km	

Pelo que foi mostrado nas tabelas V.5 e V.6, também houve uma melhoria das medidas de eficiência, diminuindo o tempo de viagem e a quantidade de paradas no corredor.

A Tabela V.7 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelo Método Proposto.

Tabela V.7 – Resultados Obtidos pelo Método Proposto

RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO PROPOSTO				
Parâmetros	Sentido: Barra da Tijuca - Centro		Sentido: Centro - Barra da Tijuca	
	Atual	Proposta	Atual	Proposta
Tempo Percurso (Min)	5,58	2,27	1,58	1,30
Velocidade Média (km/h)	8,82	21,63	17,5	21,28
Velocidade Percurso (km/h)	15,08	36,95	24,46	32,97
Quantidade de Paradas	2,29	1,71	1,14	0,86

Finalmente, conforme pode ser constatado no que foi apresentado, o corredor Sibelius apresentou uma melhoria após a implantação da otimização sugerida pelo método.

A seguir, para análise dos resultados obtidos pelo método, a área em estudo foi simulada pelo TSIS-NETSIM.

V.5. Avaliação do Método Proposto

Os pesquisadores que se dispuseram a discutir métodos de validação para modelos de simulação em geral são unânimes na constatação de que não há procedimento capaz de validar todo e qualquer tipo de modelo. A escolha da metodologia é sempre dependente do problema, e o método apropriado de validação dependente não só da natureza do fenômeno sendo simulado, mas também do uso que se pretende fazer do modelo. Vários exercícios de validação são realizados utilizando métodos estatísticos apenas para o nível macroscópico, deixando os testes visuais para os aspectos microscópicos do fenômeno simulado (SILVA e TYLER, 2001, apud SOUZA, 2003). Diante do exposto, estabeleceu-se para o presente estudo a forma de avaliação acima descrita.

Para avaliação do método foi utilizado o TSIS-NETSIM (FHWA, 2001), por ser o software que se tem facilidade de acesso ao seu manual de procedimentos (versão 5.1), familiaridade no uso e conhecimento, já que diversos trabalhos desenvolvidos no PET/COPPE/UFRJ, como POYARES (2000), SOUZA (2003), MOREIRA (2005) e TEIXEIRA (2006), o analisaram e utilizaram.

O TSIS-NETSIM tem sido o programa de micro simulação mais utilizado, tanto nos EUA quanto no resto do mundo, pela facilidade de modelar tanto os veículos que circulam na rede (automóveis, ônibus, etc.), como as interseções (desde as sem nenhum tipo de controle até as controladas em tempo real), além de permitir fazer carregamentos na rede. O software também realiza uma análise de toda a rede em estudo, fornecendo alguns índices de desempenho em relação à velocidade, fluxo, densidade, tempo de viagem, atraso, fila, movimento de giro, consumo de combustível e emissão de poluentes (POYARES, 2000).

Outro motivo da escolha deste software é a possibilidade de representar e verificar as alterações propostas pelo método (defasagens), sem alterar os resultados, pois possui vários parâmetros de avaliação, além da possibilidade de visualização do comportamento do tráfego, através da animação gráfica, ao contrário de outros métodos que não levam em consideração a interferência de uma interseção saturada nas seções a montante, e também não permitem visualizar o comportamento do tráfego em forma de animação.

Portanto, pelos motivos apresentados, o programa TSIS-NETSIM foi utilizado para avaliar a metodologia proposta.

V.5.1. Codificação da Rede Viária

As características dos dados de entrada são idênticas às utilizadas no método proposto, sendo algumas mantidas como padrão do TSIS-NETSIM, para execução das simulações. O modelo foi elaborado através de uma rede com todos estes componentes, sendo a mesma dividida em *links* e nós. Cada *link* representa um segmento de via entre duas interseções e as interseções são representadas pelos nós.

Para cada *link* é necessário seu comprimento, greide, número de faixas e capacidade das faixas segregadas para giro. E para a operação da rede é preciso a velocidade de fluxo livre, intervalo médio de descarga entre veículos, disciplina de movimentos nas interseções, tempo perdido no início do verde, programação dos sinais e defasagem entre eles.

No caso do corredor Sibelius foram introduzidos os seguintes dados:

- O Plano 1 (06:30 às 16:30 horas), foi estudado por abranger o pico da manhã, com um ciclo de 140 segundos;
- Utilização das contagens volumétricas;
- Período de simulação : 1 hora;
- Não existem estacionamentos no trecho em questão;
- Tipos de veículos : automóveis, ônibus e caminhões;
- Rotas de ônibus: para melhor representar o carregamento da rede, foram consideradas 5 rotas de ônibus, circulando pelas Ruas Mário Ribeiro e Ministro Raul Machado e pelas Avenidas Bartolomeu Mitre e Visconde de Albuquerque.

- Pontos de ônibus: um sem baía para embarque/desembarque (capacidade para 2 coletivos), na Av.Visconde de Albuquerque, e outro com baía (capacidade para 3 coletivos), na Rua Mário Ribeiro, próximo a R. Min. Raul Machado;
- Percentual utilizado de veículos pesados (ônibus e caminhões), 10% em toda a rede, com exceção para a R. Raul Machado que é de 6 %;
- Velocidade de fluxo livre: 25 mph.

A imagem utilizada como base para construção da rede de nós e *links* do modelo foi importada para o formato bitmap (*.bmp), através da base digitalizada no formato (*.dwg), fornecida pela CETRIO.



Figura V.13 - Configuração Viária Montada sobre Imagem do Corredor

(Fonte: Tela de edição gráfica do TRAFED)

Na Figura V.14 é mostrada a estrutura dos nós e *links*, previamente estabelecida, embutidos os dados no micro simulador TSIS-NETSIM. Todas as informações fornecidas ao software podem ser observadas nesta estrutura, assim como modificadas/alteradas com fins de verificação de melhores alternativas para a rede em estudo.

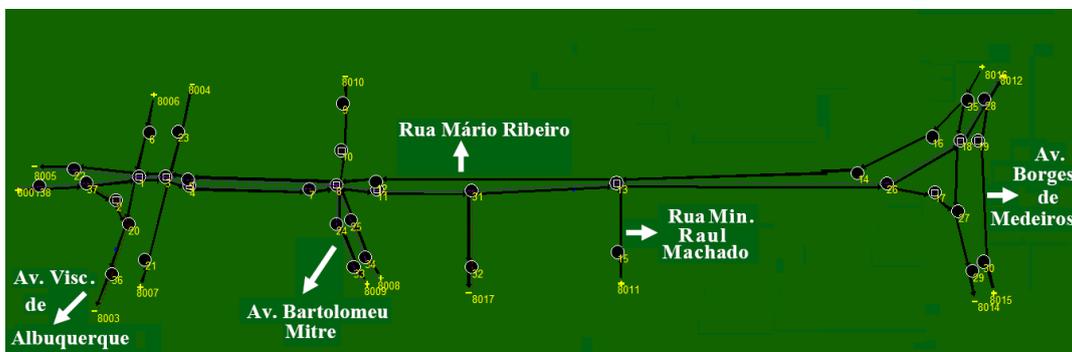


Figura V.14: Estrutura de Nós e Links no TSIS-NETSIM

(Fonte: Tela de animação do Modelo, 2010)

É através da entrada do nó (Figura V.15) que é possível saber quais são os movimentos permitidos no *link*, pois o mesmo indica de qual nó está chegando um determinado fluxo e para onde o mesmo está sendo direcionado, já com os percentuais de cada *link*.

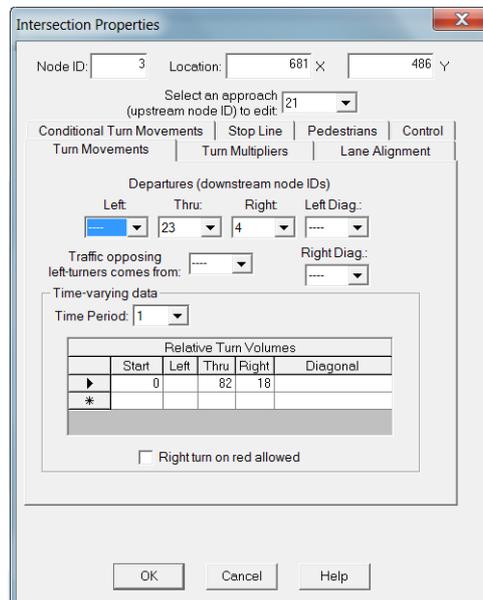


Figura V.15 - Janela de Entrada dos Dados dos Nós

(Fonte: Tela de configuração do TRAFED)

O estudo de movimentos conflitantes deve ser feito para que seja possível direcionar as faixas de tráfego da via. É na entrada dos *links* (Figura V.16) que se colocam os pontos de ônibus e as características físicas e operacionais da via.

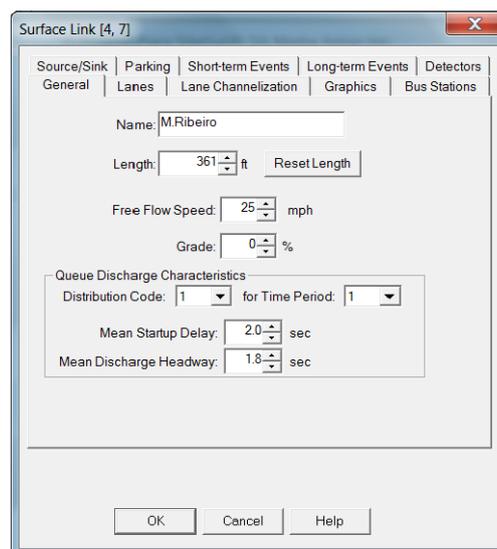


Figura V.16 - Janela de Entrada dos Dados dos Links

(Fonte: Tela de configuração do TRAFED)

Nos semáforos de tempo fixo, a mudança (ciclos, fases) ocorre de acordo com os dados de entrada especificados no micro-simulador, com os veículos obedecendo às indicações dos semáforos. Os semáforos do modelo são todos de tempo fixo e sua codificação foi elaborada de acordo com os planos semaforicos e obedecendo aos grupos focais e defasagens e sua entrada de dados pode ser vista na Figura V.17.

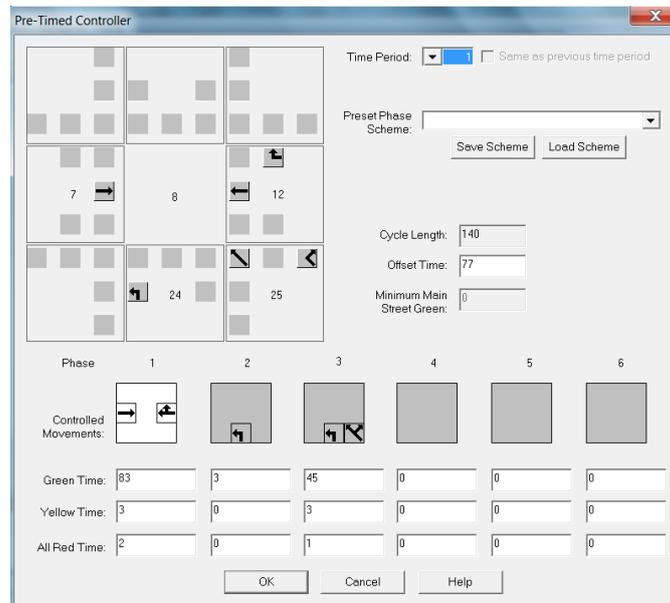


Figura V.17 - Janela de Entrada dos Dados dos Semáforos

(Fonte: Tela de configuração do TRAFED)

A seguir, na Figura V.18, é apresentado o desenho do corredor bem como as rotas de ônibus consideradas.

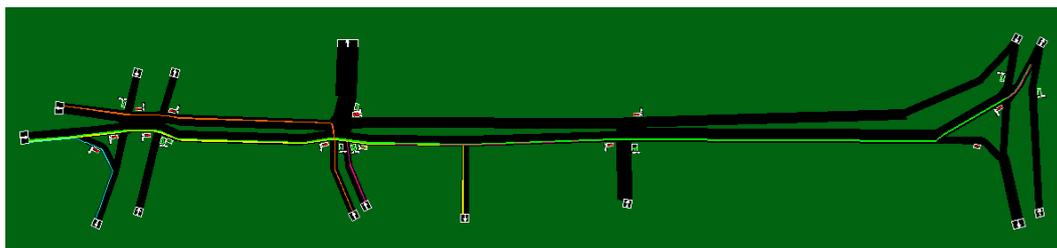


Figura V.18 - Visualização do Corredor e das Rotas de Ônibus

(Fonte: Tela de animação do TRAFVU)

Para representar corretamente o arranjo semaforico das interseções, devido à complexidade de algumas, às vezes é necessário implantar conjuntos de nós para representar uma só interseção. Isto ocorre devido à quantidade de movimentos possíveis em uma interseção, como, por exemplo, interseções com giro retido, caso da Rua Mário

Ribeiro com a Av. Visconde de Albuquerque. Com isto, o que deveria ser um nó (cada um representando uma interseção) passou a ser uma composição de nós, conforme mostrado na Figura V.19.

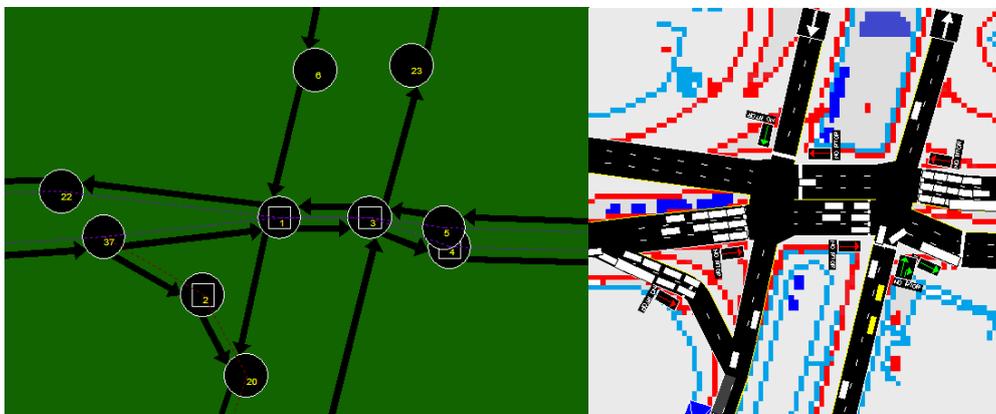


Figura V.19 - Composição de Nós de uma Interseção: Av. Mário Ribeiro x Av. Visconde de Albuquerque

(Fonte: Tela de configuração do TRAFED e respectiva tela de animação do TRAFVU)

V.5.2. Simulação da Área em Estudo

Após carregar a rede com os dados necessários, o TSIS-NETSIM simula a área em estudo possibilitando visualizar a animação da mesma, conforme pode ser constatado na Figura V.20.

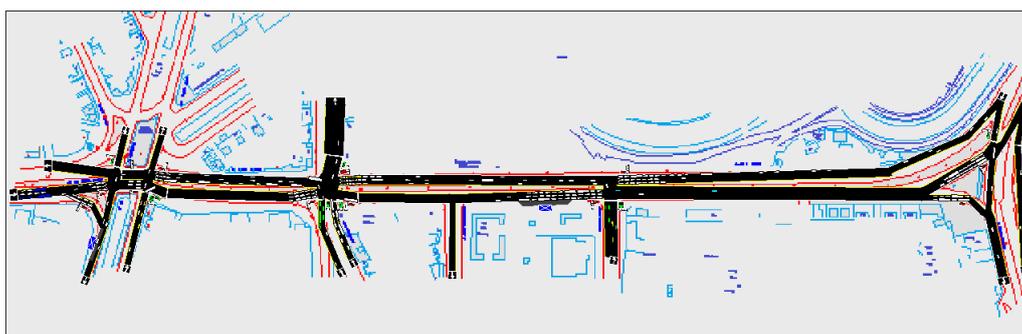


Figura V.20 – Visualização da Animação da Simulação

(Fonte: Tela de animação do TRAFVU)

A validação do modelo no nível microscópico constituiu-se de testes visuais comparativos da rede codificada no micro-simulador com a movimentação dos veículos observada em campo, utilizando-se para isso as câmeras da CET-RIO. Por intermédio destas, viabilizou-se a visualização espacial da área requerida, pois foram verificadas as

características operacionais da rede, o comportamento dos motoristas/veículos em diferentes situações, as interrupções no tráfego, a formação de filas, entre outros parâmetros relevantes. Diante disso, procederam-se as análises devidas, constatando-se a representatividade desejada (validação) da rede simulada, já que com a animação (TRAFVU) foi possível comparar o simulado com o observado.

Como resultado final do processo, foram obtidos o tempo total de viagem e médio de viagem por veículo, a velocidade média das viagens, a quantidade de paradas por viagem, além de outras medidas. Todos os resultados são referentes ao período de 1 hora de simulação. Para efeito de comparação com o modelo proposto, somente foi utilizado o tempo total de viagem e a velocidade média.

A velocidade média foi baseada no percurso como um todo, ou seja, os veículos circulam por toda a rede, em ambos sentidos, e ao final é determinada a velocidade média de percurso para as duas situações (atual e proposta). A Tabela V.8 apresenta os tempos de percurso e as velocidades médias para a área de estudo.

Tabela V.8 – Tempos de Percurso e Velocidade Média - TSIS-NETSIM

RESULTADOS OBTIDOS PELO TSIS-NETSIM				
Sentido Fluxo	Tempos de Percurso (Minutos)		Velocidade Média (km/h)	
	Atual	Proposta	Atual	Proposta
Barra da Tijuca - Centro	3,53	2,59	12	17
Centro - Barra da Tijuca	5,37	2,09		

(Fonte: TSIS-NETSIM)

De posse dos dados apresentados na Tabela V.8, pode-se constatar que houve uma redução no tempo de viagem e um aumento da velocidade média, fruto das medidas sugeridas pelo método proposto.

V.6. Avaliação do Método Proposto através do TSIS-NETSIM

Para avaliação do método proposto foram selecionadas algumas variáveis do tráfego escolhidas como parâmetros de análise, com o propósito de comparar com os resultados obtidos pelo método e pelo TSIS-NETSIM. Podem-se considerar como efeitos de

congestionamento o aumento dos tempos de viagem e a diminuição da velocidade média da viagem. O tempo de viagem tem sido o fundamento de muitos métodos de avaliação de congestionamentos, pois quanto maior for o congestionamento, maior será o tempo de viagem (TEIXEIRA, 2006).

Para esta análise são utilizadas as medidas indicadas por SOUZA (2003), que foram estabelecidas devido, principalmente, à sua representatividade global do desempenho da rede, avaliando e analisando toda a operacionalidade da malha viária de uma forma bastante ampla. As variáveis utilizadas são o tempo de viagem (*Travel Time – Average Values – All Vehicles*), e a velocidade média (*Speed – Average Values – All Vehicles*).

Assim, a Tabela V.9 foi elaborada contendo tanto as medidas obtidas pelo método proposto quanto pelo TSIS-NETSIM para análise do método.

Tabela V.9 – Resumo dos Resultados

RESUMO DOS RESULTADOS										
Sentido Fluxo	TSIS-NETSIM				%	MEDIDAS DE CAMPO				%
	Tempos de Percurso (Minutos)		Velocidade Média (km/h)			Tempos de Percurso (Minutos)		Velocidade Média (km/h)		
	Atual	Proposta	Atual	Proposta		Atual	Proposta	Atual	Proposta	
Barra da Tijuca - Centro	3,53	2,59	12	17	73	5,58	2,27	8,82	21,63	41
Centro - Barra da Tijuca	5,37	2,09			49	1,58	1,30	17,5	21,28	82

(Fonte: TSIS-NETSIM e Medidas de Campo)

Também foram comparadas as animações das simulações, feitas pelo TSIS-NETSIM, para ambas situações estudadas, o que permitiu visualizar as melhorias alcançadas pela otimização proposta, como, por exemplo, a limpeza do cruzamento das Avenidas Mário Ribeiro e Borges de Medeiros.

V.7. Considerações Finais

Este Capítulo comprovou, a partir de um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro, que o modelo proposto pode ser mais uma ferramenta para otimização de corredores arteriais. A avaliação do método pelo software TSIS-NETSIM só veio dar credibilidade para sua aplicação em novos estudos que tenham como objetivo sincronizar corredores de tráfego somente alterando as defasagens.

De acordo com os resultados obtidos, mostrados na Tabela V.9, pode-se afirmar que o modelo utilizado atingiu um nível de adequabilidade bem satisfatório para com a realidade, apresentando uma significativa redução das variáveis de tráfego (aumento da velocidade média e redução da quantidade de paradas).

No Gráfico V.2 é apresentada uma representação gráfica que permite visualizar melhor os resultados obtidos.

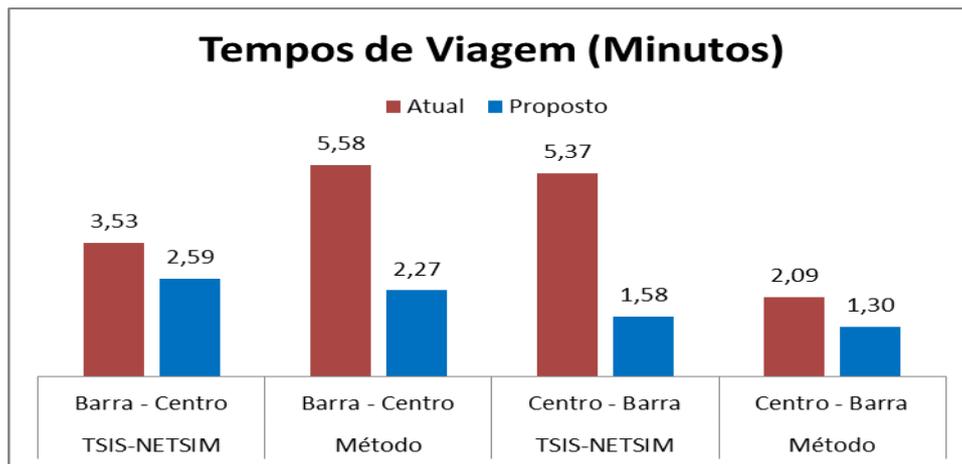


Gráfico V.2 – Representação Gráfica dos Resultados

(Fonte: TSIS-NETSIM e Método Proposto)

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

VI.1. Considerações Iniciais

O tema deste trabalho “Método de Otimização das Defasagens de Corredores Arteriais” tem como objetivo apresentar um método que possibilite, de forma rápida e prática, sincronizar os corredores de tráfego das cidades.

Coordenar adequadamente as defasagens dos semáforos de uma via arterial significa promover a fluidez do trânsito e melhorar a qualidade operacional do sistema viário, reduzindo tempos de percurso, atrasos e repetidas paradas, além de prevenir congestionamentos, desgaste dos veículos e também consumo excessivo de combustível, preservando o meio ambiente.

Este trabalho apresentou definições, benefícios e características das técnicas de coordenação semaforica, através da pesquisa bibliográfica elaborada sobre os métodos existentes e formas de utilização, incluindo ainda o desenvolvimento de um método para otimização das defasagens de corredores arteriais.

VI.2. Conclusão

Nesta dissertação de mestrado foram analisados os modelos clássicos de sincronização de semáforos, sendo observado em todos os trabalhos pesquisados que, a partir do modelo de LITTLE (1966), todos os demais usam o mesmo método, mudando apenas a abordagem para a execução, como é o caso do trabalho mais recente apresentado por GARTNER e STAMATIADIS (2002), onde é apresentada uma heurística para aumentar a velocidade computacional. O modelo escolhido teve como base o trabalho de MORGAN e LITTLE (1964), pois segundo eles, os engenheiros de tráfego preferem trabalhar com a maximização de largura de banda, já que exigem poucos dados, como a geometria da rua, a velocidade do tráfego e os tempos de verde. Também teve suporte no artigo de SUNKARI (2004), sobre benefícios da reavaliação do sincronismo semaforico, que demonstra a importância da revisão da sincronização semaforica para a

melhoria da circulação e segurança do tráfego. Outra fonte utilizada foi o artigo publicado no IX ANPET (1995), e curso ministrado à CET-SP (2005), ambos de EJZENBERG, sobre reprogramação de semáforos pelo método de observação de campo, onde não é levada em consideração a contagem volumétrica, além de vários outros trabalhos científicos pertinentes.

Desta forma, foi desenvolvido um método computacional, elaborado em Visual Basic e Excel, para otimização das defasagens dos corredores de tráfego com o objetivo de proporcionar um melhor desempenho dos fluxos de veículos em termos de redução do tempo de viagem e da quantidade de paradas.

No intuito de avaliar o método e verificar seus limites de aplicação efetiva, foi realizado um estudo de caso, para a cidade do Rio de Janeiro, sendo feitas simulações para a situação atual e proposta pelo método. Posteriormente, para ambos cenários, o modelo foi avaliado, através de vistorias em campo e também pelo software TSIS-NETSIM, para verificação da confiabilidade do mesmo. Os resultados das simulações foram comparados através de medidas de desempenho, para a situação atual e proposta, de forma que os benefícios ou prejuízos provocados pudessem ser observados separadamente. Esta foi a forma mais simples de se comparar os dois cenários simulados. As melhorias observadas, apresentadas na Tabela V.9 e no Gráfico V.2, foram tanto para a velocidade média quanto na quantidade de parada. Através deste teste, foi possível avaliar o método quanto à otimização adequada às condições de tráfego do corredor em estudo.

O programa de coordenação apresentado pode ser considerado como um modo alternativo e simplificado para obtenção da estratégia de coordenação semaforica, podendo substituir os métodos manuais de tentativa e erro ou os procedimentos de ajustes locais que demandam tempo e esforços repetitivos, ainda amplamente utilizados pelos órgãos públicos. Devido à sua facilidade de utilização e eficiência de aplicação, a otimização gerada pelo método apresentado pode contribuir com o trabalho de analistas e operadores de tráfego das principais cidades, possibilitando um gerenciamento mais adequado do trânsito das vias urbanas.

VI.3. Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Ainda que tenha sido atingido o objetivo do trabalho, apresentando um método que possibilite otimizar as defasagens de corredores de tráfego, a dissertação pode ter continuidade, tendo como objetivo melhorar cada vez mais o procedimento para se ter um sistema que reflita a realidade da melhor maneira possível. Um exemplo disto seria a otimização das defasagens de todos os planos semaforicos, para manter a fluidez do trânsito, devido à variação dos volumes de tráfego ao longo do dia.

Apesar de o programa não permitir no estágio atual de desenvolvimento, sua utilização para determinar bandas com largura variável e proporcional ao volume de tráfego nos diferentes segmentos de via, ele representa o ponto de partida para o desenvolvimento de rotinas mais sofisticadas. Novos parâmetros podem ser considerados no futuro, na busca da solução com maiores larguras de banda, como a verificação da velocidade utilizada, visto que por motivo de simplificação não foram considerados neste trabalho.

Vários trabalhos podem ser realizados de forma a dar continuidade a presente dissertação, já que não foram contemplados, devido à limitação de tempo. Recomenda-se que os seguintes procedimentos sejam incluídos:

- Introdução de outras variáveis na modelagem, como a influência dos giros permitidos na velocidade de progressão e outras variações do tráfego.
- Deve ser implantado um procedimento para verificar se a velocidade utilizada na simulação ainda representa a que é praticada na realidade, procurando manter a via constantemente sincronizada.
- Comparação do desempenho do método com o de outros softwares, tais como: TRANSYT, PASSER, entre outros.

Por fim, seria interessante a realização de estudos em diversos corredores de tráfego da cidade do Rio de Janeiro, visando não apenas aprimorar o modelo proposto como também alcançar uma maior adequação a nossa realidade, dada a facilidade de aplicação do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRA, I.N. (1999), *Análise das Prioridades para Altas Porcentagens de Ônibus nos Planos de Sincronismo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BAVAREZ, E., NEWELL, G.F. (1967), “Traffic Signal Synchronization on a One-Way Street”. *Transportation Science*, v.1, n.2, pp.55-73.
- BEZERRA, B.S. (2007), *Semáforos: Gestão Técnica, Percepção do Desempenho, Duração dos Tempos*. Tese de Doutorado em Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- BLEYL, R.L. (1967), “A Practical Computer Program for Designing Traffic-Signal-System Timing Plans”. *Highway Research Record*, 211, pp.19-33.
- BLOONBERG, L., DALE, J., (2000), “A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network”. *Transportation Research Record*, March, 2000.
- BROOKS W.D. (1965), *Vehicular Traffic Control Designing Arterial Progression Using a Digital Computer*. IBM Data Processing Division, Kingston, New York.
- CARLSON, R. C. (2006), *Aplicação de Maximização de Largura de Banda no Controle de Tráfego Urbano em Tempo-Real*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, Brasil.
- CET-RIO, Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (2002), *Curso Sistemas de Controle do Tráfego Semafórico Urbano*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CET-SP, Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (1997), *Uma Breve Descrição do Sistema SCOOT*. *Notas Técnicas 201/97*, São Paulo, SP, Brasil.
- CET-SP, Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (2000), *Manual de Sinalização Semafórica. Critérios de Programação*, 125p, São Paulo, SP, Brasil.

- CERVANTES, S.G.S. (2005), *Um Algoritmo Descentralizado para Controle de Tráfego Urbano em Tempo Real*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, Brasil.
- CHANG, E.C.P., MESSER, C.J. (1985), “Minimum Delay Optimization of a Maximum Bandwidth Solution Arterial Signal Timing”. *Transportation Research Record*, 1005, pp.89-95.
- CHANG, E.C.P., MESSER, C.J.; COHEN, S.L. (1986), “Directional Weighting for Maximal Bandwidth Arterial Signal Optimization Programs”. *Transportation Research Record*, 1057, pp.10-19.
- CLOWES, D.J. (1986), “Urban Traffic Control: Past, Present and Future”. *Transport and Road Research Laboratory. Second International Conference on Road Traffic Control*, Institution of Electrical Engineers, UK.
- COELHO, J. C., FREITAS J. A., MOREIRA, M.E.P. (2004), “Implantações Semafóricas são Medidas Eficazes para a Redução de Acidentes de Trânsito? O Caso de Fortaleza, CE”. *Universidade Federal do Ceará*, Ceará, CE, Brasil.
- COHEN, S.L. (1983), “Concurrent Use of MAXBAND and TRANSYT Signal Timing Programs for Arterial Signal Optimization”. *Transportation Research Record*, 906, pp.81-84.
- COHEN, S.L., LIU, C.C. (1986), “The Bandwidth-Constrained TRANSYT Signal - Optimization Program”. *Transportation Research Record*, 1057, pp.1-9.
- CUCCI NETO, J. (1999), *Projeto Semafórico: Legislação, Arranjo Físico e Sinalizações Relacionadas*. Extraído do CTB e Manual Sinalização Semafórica CET-SP, São Paulo, SP, Brasil.
- DEMARCHI, S.H., DUTRA, C.B. (2004a), “Coordenação Semafórica Através do Método de Maximização da Banda Verde”. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v.1, p.503-514, Florianópolis, SC, Brasil.

- DEMARCHI, S.H., DUTRA, C.B. (2004b), “SBAND: Implementação em Planilha Eletrônica de um Método para Maximização da Banda Verde em Vias Semaforizadas”. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Florianópolis, SC, Brasil.
- DENATRAN (1984), *Manual de Sinalização de Trânsito – Manual de Semáforos*. Coleção Serviços de Engenharia, Volume 4, 2a. edição, Brasília, DF.
- DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura em Transportes (2004), *Custo dos Acidentes de trânsito nas Rodovias Federais*. Publicação IPR – 733, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DUTRA, C.B. (2005), *Avaliação da Eficiência de Métodos de Coordenação Semafórica em Vias Arteriais*. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- EJZENBERG, S. (1995), “Reprogramação de Semáforos pelo Método de Observação de Campo”. *IX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, São Carlos, SP, Brasil.
- EJZENBERG, S. (2005), *Reprogramação de Semáforos pelo Método de Observação de Campo*. Apostila para Treinamento da CET-SP, Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, SP, Brasil.
- ENDO, W. (2006), *Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição de Estágio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, PR, Brasil.
- FWHA (2001), *TSIS - Traffic Software Integrated System, Users Guide*, Department of Transportation of Federal Highway Administration.
- FHWA (2005), Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/pubstats.htm>>. Acesso em: 29/05/2009.
- GARCIA, T. R., CURY, J. E. R., JUNIOR, W. K., e DEMONGODIN, I. (2007), “Traffic Light Coordination of Urban Corridors Using Max-Plus Algebra”. In:

Proceedings of International Modeling and Simulation Multiconference, pp. 255–260, Buenos Aires, Argentina.

GARCIA, T.R. (2007), *Modelagem e Controle da Coordenação do Tráfego Urbano Através de Formalismos para Sistemas a Eventos Discretos e Híbridos*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.

GARTNER, N.H. (1991), “Road Traffic Control: Progression Methods”. *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. University of Massachusetts Lowell, USA.

GARTNER, N. H. (1972), “Constraining Relations Among Offsets in Synchronized Signal Networks”. In: *Transportation Science*, Vol. 6, pp. 88-93.

GARTNER, N. H., J. D. C. LITTLE, e H. GABBAY (1975), “Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed – Integer Linear Programming, Part I and II”. In: *Transportation Science*, Vol. 9, pp. 321-363.

GARTNER, N.H., ASSMANN, S.F., LASAGA, F., HOU, D.L. (1990), “MULTIBAND: A Variable - Bandwidth Arterial Progression Scheme”. *Transportation Research Record*, 1287, pp. 212-222.

GARTNER, N.H., STAMATIADIS, C. (2002), “Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks”. *Department of Civil and Environmental Engineering*. University of Massachusetts, Lowell, USA.

GREEN, F.B., ROBERTSON, D.I. (1974), “Traffic Signal Control Using Cableless Linking – The Experiment”. In: *Transportation Science*, Vol. 9, pp. 547-551.

HILLIER, J. A. (1965), “Glasgow’s Experiment in Area Traffic Control”. In: *Traffic Engineering Control*, Vol. 7, pp. 502-509.

HOMBURGER, W.S., KELL, J.H., PERKINS, D.D. (1992), “Fundamentals of Traffic Engineering”. In: *Institute of Transportation Studies*. University of California at Berkeley.

- IHT - Institution of Highways and Transportation (1987), *Roads and Traffic in Urban Areas*, Washington, DC.
- ITE - Institute of Transportation Engineers (1999), *Traffic Engineering Handbook*, 5th Edition.
- LAN, C.J., MESSER, C.J., CHAUDHARY, N.A., CHANG, E.C.P. (1992), “Compromise Approach to Optimize Traffic Signal Coordination Problems During Unsaturated Conditions”. *Transportation Research Record*, 1360, pp.112-119.
- LAND, A.H., POWELL, S. (1973), *Fortran Codes for Mathematical Programming: Linear, Quadratic and Discrete*. New York, John Wiley and Sons, Inc. 1973.
- LEANDRO, C. H. P. (2001), *Procedimento Multicriterial para Estruturação e Caracterização de Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego Urbano*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LITTLE, J. D. C. (1966), “The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming”. In: *Operations Research*, Vol. 14, pp. 568-594.
- LITTLE, J.D.C., MARTIN, B.V., MORGAN, J.T. (1966), “Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth”. *Highway Research Record* 1340, pp. 21-47.
- LITTLE, J.D.C., KELSON, M.D., GARTNER, N.H. (1981), “MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks”. *Transportation Research Record* 795, pp.40-46.
- LOUREIRO, C. F. G., OLIVEIRA, M. V. T., LEANDRO, C. H. P. LEANDRO (2002), “Sistema Centralizado de Controle de Tráfego de Fortaleza: ITS Aplicado à Gestão Dinâmica do Trânsito Urbano”. *Anais XVI Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes*, ANPET, Natal, RN, Brasil.
- MCTRANS (2009), PASSER - *Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine*. Disponível em: <<http://www.mctrans.ce.ufl.edu/store/description.asp>>. Acesso em: 15/10/2009.

- MCTRANS (2009), TEAPAC - *Traffic Engineering Applications Package*. Disponível em: <<http://www.mctrans.ce.ufl.edu/store/description.asp>>. Acesso em: 15/10/2009.
- MAGALHÃES, D.J.A.V. (1981), *Sincronização de Semáforos em um Corredor Urbano: Desenvolvimento de um Modelo Simplificado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia - IME, RJ, Brasil.
- MENESES, H. B. (2003), *Interface Lógica em Ambiente SIG para Bases de Dados de Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego Urbano em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Ceará.
- MESSER, C.J., WHITSON, R.H., DUDEK, C.L., ROMANO, E.J. (1973), “A Variable - Sequence Multiphase Progression Optimization Program”. *Highway Research Record 445*, pp. 24-33.
- MING, S.H., VILANOVA, L.M., ESPEL, M. e PICHIELLO, V. (2001), *Manual de sinalização semafórica - Critérios de programação*. CET-SP, Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, SP, Brasil.
- MOREIRA, R.B. (2005), *Uma Contribuição para Avaliação do Modelo “CORSIM” em Simulações de Tráfego Urbano no Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MORGAN, J.T., LITTLE, J.D.C. (1964), “Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth”. *Operations Research*, Vol.12, pp.896-912.
- OLIVEIRA, M. G. S. (1997), *Produção e Análise de Planos Semafóricos de Tempo Fixo usando Sistemas de Informação Geográficas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA NETO, F.M. (2004), *Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego*. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil.
- OWEN L.E., ZHANG Y., RAO L., MCHALE G. (2000), “Traffic Flow Simulation Using CORSIM, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference”, J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang and P. A. Fishwick, eds.

- OZELIM, L.C.S.M, e JACQUES, M.A.P. (2008), “Estudo da Operação do Tráfego em Via Arterial Urbana Controlada por Semáforos com o uso de Simulador”. *Revista de Pesquisa Aplicada à Engenharia*, Vol.1, nº1, PET-ENC, DF, Brasil.
- PAIVA NETO, P. M, M. M. CASTRO NETO e C. F. G. LOUREIRO (2003), “Progressão em Tempo Real *Versus* Tempo Fixo por Banda de Passagem em Períodos de Baixa Demanda – Estudo de Caso”. *Anais XVII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes*, ANPET, RJ, Rio de Janeiro.
- PORTUGAL, L.S. (2005), *Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem*. 1ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda, 2005.
- POYARES, C. N. (2000), *Critérios para Análise dos Efeitos de Políticas de Restrição ao Uso de Automóveis em Áreas Centrais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RAKHA, H. (2004), *INTEGRATION Release 2.30 for Windows: User’s Guide, Vol. I e II*. Ontario, Michel Van Aerde and Associates, Ltd. Kingston, Canada.
- RAKHA, H., VAN AERDE, M. (1996), “Comparison of Simulation Modules of TRANSYT and INTEGRATION Models”. *Transportation Research Record*, 1566, pp.1-7.
- RIBEIRO, P. C. M. (2007), *Controle de Tráfego Urbano*. Notas de Aula, Programa de Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ.
- RENTERÍA, A. R. (2002), *Controle de Semáforos por Lógica Fuzzy e Redes Neurais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROBERTSON, D. I. (1969), “TRANSYT: A Traffic Network Study Tool”. In: *Road Research Laboratory Report*, LR 253, Crowthorne.
- ROBERTSON, D.I. (1997), “The TRANSYT Method of Coordinating Traffic Signals”. In: *Traffic Engineering and Control*, pp.76-77.

- ROBERTSON, D.I., LUCAS, C.F., BAKER, R.T. (1980), "Coordinating Traffic Signals to Reduce Fuel Consumption". In: *Transport and Road Research Laboratory*, 934.
- ROESS, R.P., MC SHANE, W.R., PRASSAS, E.S. (1998), *Traffic Engineering*. 2ed., New Jersey, Prentice Hall.
- ROGNESS, R.O., MESSER, C.J. (1983), "Heuristic Programming Approach to Arterial Signal Timing". *Transportation Research Record* 906, pp. 67-75.
- SAITO, M., J. WALKER, A. ZUNDEL (2001), "Using Image Analysis to Estimate Average Stopped Delays per Vehicle at Signalized Intersections". In: *80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Janeiro.
- SCHRANK, D., LOMAX, T. (2005). The 2005 Urban Mobility Report. Texas Transportation Institute.
- SHEPERD, S.P. (1992), "A Review of Traffic Signal Control". *Institute for Transport Studies (ITS)*349, The University of Leeds.
- SILVA, P. C. M., e TYLER N. (2001), "Sobre a Validação de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego". In: *Anais do XV Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Campinas.
- SOUZA, D.L.M. (2003). *Análise dos Impactos Causados no Tráfego por Alterações na Rede Viária, Utilizando Micro Simulação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- STAMATIADIS, C., GARTNER, N.H. (1996), "MULTIBAND 96: A Program for Variable - Bandwidth Progression Optimization of Multiarterial Traffic Networks". *Transportation Research Record* 1554, pp.9-17.
- STRONGS & CONCEPTS (2008). Strong's & Concepts Newsletter, volume 19 nº1. Disponível em: <<http://www.StrongConcepts.com>>. Acesso em: 15 Outubro 2009.
- SUNKARI, S. (2004), "The Benefits of Retiming Traffic Signals". *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, april, 2004.

- SUNKARI, S.R., ENGELBRECHT, R.J., BALKE, K.N. (2004), "Evaluation of Advance Coordination Features in Traffic Signal Controllers". Department of Transportation, FHWA/TX-05/0-4657-1, US.
- TÁPIA, S.C.L. (2003), *Avaliação de Alternativas de Operação de um Trecho de Via SemafORIZADO Utilizando o Simulador INTEGRATION*. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.
- TEIXEIRA, E.H.S.B. (2006), *Um Procedimento para Geração de Alternativas Operacionais de Gerenciamento do Tráfego através da Micro Simulação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- TRINDADE FILHO, H. H. (2002), *Análise Comparativa do Potencial de Sistemas Centralizados para Controle de Tráfego no Brasil*. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.
- TRL - Transport Research & Development (2000), "Executive Summary – Description of SCOOT". In: *Transportation Research Laboratory*, Inglaterra.
- VAN AERDE, M. (1997), INTEGRATION Realease 2.10: User's Guide Vol. I e II. Fundamental Model Features. Ontario, Canada.
- VILANOVA, L.M. (2007), *SIRI - UM NOVO SIMULADOR PARA REDES DE SEMÁFOROS*. CET-SP, Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo, SP, Brasil.
- VINCENT, R. A., MITCHELL, A. I. e ROBERTSON, D. I. (1980), User Guide to TRANSYT version 8. TRRL Laboratory Report 888.
- WALLACE, C. E., COURAGE, K. G. (1982), "Arterial Progression – New Design Approach". *Transportation Research Record* 881, pp. 53-59.
- WALLACE, C. E., COURAGE, K. G., HADI, M. A. (1998), User Guide to TRANSYT-7F. Transportation Research Center, University of Florida, USA.
- WEBSTER, F.V. (1958), Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper nº 39, Road Research Laboratory, London.

WEBSTER, F.V., COBBE, B.M. (1966), Traffic Signals. Road Research Technical Paper n° 56, Road Research Laboratory, London.

WOHL M., MARTIN B.V. (1967), *Traffic System Analysis for Engineers and Planners*. 1 ed. McGraw-Hill Book Company, USA.

WOOD, K. (1993), "Urban Traffic Control, Systems Review". In: *Transport Research Laboratory*, report 41.