

Scarlett Leiva Tapia

**Avaliação de Alternativas de Operação  
de um Trecho de Via Semaforzado  
utilizando o Simulador INTEGRATION**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 01/07/03

Ass.: *Kamaghi*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100043539



ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Clóvis Pinto Ferraz

São Carlos  
2003

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Ingeniero **SCARLETT DEL CARMEN LEIVA TAPIA** ?

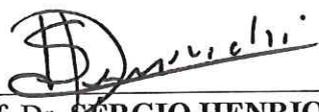
Dissertação defendida e julgada em 10-06-2003 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **ANTONIO CLÓVIS PINTO FERRAZ (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

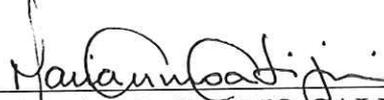
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **PAULO CESAR MARQUES DA SILVA**  
(Universidade de Brasília/UNB)

aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **SÉRGIO HENRIQUE DEMARCHI**  
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Assoc. **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico esta dissertação aos meus pais, Pablo e Melania, aos meus irmãos, Pablo Martin e Marta Lorena, e a minha sobrinha Michelle, por seu carinho.

Ao meu irmão Jimmy José Leiva Tapia (“in memoriam”), pelo apoio e carinho em todos os momentos da sua vida.

Amo o Senhor, porque ele ouviu a minha voz e as minhas súplicas.  
Porque inclinou para mim os seus ouvidos, invocá-lo-ei em quanto eu viver.  
Laços de morte me cercaram, e angustias do inferno se apoderaram de mim;  
Caí em tribulação e tristezas então, invoquei o nome do Senhor.

**Salmos 116 (1-5)**

## AGRADECIMENTOS

---

Ao Prof. Dr. Antonio Clóvis Pinto Ferraz, pela orientação, apoio, carinho e amizade.

Ao Prof. Dr. Jose Reynaldo Anselmo Setti pelos ensinamentos e disponibilidade que contribuíram ao andamento da pesquisa.

Aos professores Dr. Edson Martins de Aguiar e Dr. Archimedes Azevedo Raia Júnior pelas sugestões no exame da qualificação.

À OEA (Organização dos Estados Americanos), pela bolsa de estudos concedida.

À Prefeitura da cidade de Manágua – Nicarágua, pelo apoio financeiro e fornecimento das informações para a realização da pesquisa.

À Eng. Maritza Maradiaga Guillên, da Prefeitura de Manágua, e ao Eng. Vladimir Kastak, do Ministério de Transportes, pela orientação e o conhecimento que me passaram nos anos que trabalhamos juntos.

Aos colegas de trabalho e aos pesquisadores de campo do *Departamento de Vialidad* da Prefeitura da cidade de Manágua, com quem compartilhei anos de trabalho.

As minhas amigas Alina Haydee, Asunción, Marielos, Sobeyda, Jeanet, Susana e Maria José, pelo carinho e palavras de encorajamento nos momentos de fraqueza.

A todos os professores do STT/EESC/USP que contribuíram para minha formação na área de Transportes.

A todos os colegas do Departamento de Transportes da EESC/USP, pela amizade, carinho, apoio e incentivo. E por fazerem de nosso ambiente de trabalho um lugar agradável e de cooperação durante minha estadia em São Carlos. Em especial a Andréa Hora, Sandra, Cinthia, Geovane, Cira, Cida, Cynthia Lotti, Karênina, Bárbara, Ana Paula Furlan, Márcia, Marta e Pastor.

Aos irmãos cristãos da Igreja em São Carlos, em especial aos integrantes do meu grupo de oração: Cássia e Edson, Antonieta, Júlio, Cleyde, Israel, Regina e Martins e Ângela.

Aos funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP, pelo suporte dado durante o programa de mestrado. Em especial, à Heloisa, Betti e Magali.

## SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS .....	xv
RESUMO .....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações iniciais .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Justificativa.....	2
1.4 Estrutura do texto .....	4
<b>2. OPERAÇÃO DE SEMÁFOROS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grupo focal, estágio e fase .....	5
2.2 Semáforos com conversão à esquerda.....	11
2.3 Outros casos de operação de semáforos .....	14
2.4 Escolha do plano semafórico.....	18
2.5 Controladores semafóricos .....	19
2.6 Conceitos básicos na operação .....	22
2.7 Duração do amarelo e do entreverdes.....	28
2.8 Duração do ciclo e dos verdes em semáforos isolados.....	30
2.9 Parâmetros de desempenho em semáforos isolados .....	37

2.10 Observações complementares.....	40
2.11 Coordenação de semáforos .....	43
2.11.1 Coordenação de semáforos numa via de sentido único.....	44
2.11.2 Coordenação de semáforos numa via de duplo sentido.....	48
2.11.3 Coordenação de semáforos numa rede com vias de sentido único.....	54
2.12 Estimativa do atraso médio em todas as situações .....	57
2.14 Nível de serviço para trechos de vias semaforizados .....	60
<b>3. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO DE VEICULOS .....</b>	<b>63</b>
3.1 Considerações iniciais .....	65
3.2 Classificação dos modelos de simulação .....	65
3.3 Vantagens e desvantagens da simulação .....	67
3.4 Entradas requeridas pelos simuladores.....	68
3.5 Saídas disponibilizadas pelos simuladores .....	69
3.6 Escolha do simulador .....	70
3.7 Breve descrição de alguns simuladores de tráfego .....	70
<b>4. O SIMULADOR INTEGRATION .....</b>	<b>75</b>
4.1 Considerações iniciais .....	75
4.2 Estrutura básica do simulador .....	77
4.3 Lógicas fundamentais.....	78
4.4 Modelagem de semáforos .....	84
4.5 Parâmetros de desempenho fornecidos pelo INTEGRATION.....	86
4.6 Arquivos de saída .....	88
<b>5. ANÁLISE DE RESULTADOS DO INTEGRATION.....</b>	<b>90</b>
5.1 Considerações iniciais .....	90
5.2 Caso 1: Semáforo isolado no cruzamento de duas vias de sentido único.....	90

5.3 Caso 2: Semáforo isolado com conversão à esquerda .....	100
5.4 Caso 3: Dois semáforos próximos numa via de sentido único .....	106
5.5 Caso 4: Dois semáforos próximos numa via de sentido duplo.....	109
5.6 Caso 5: Rede de semáforos próximos .....	113
<b>6. O TRECHO DE VIA DA CIDADE DE MANÁGUA .....</b>	<b>115</b>
6.1 O município de Manágua .....	115
6.2 O sistema viário e de trânsito de Manágua.....	116
6.3 O trecho de via estudado .....	117
6.4 Volumes de tráfego.....	123
6.5 Matriz origem-destino .....	130
6.6 Hipóteses adotadas na simulação .....	131
6.7 Definição dos cenários a serem simulados.....	132
6.8 Cenários simulados.....	133
6.9 Programações semafóricas.....	135
6.10 Resultados obtidos nas simulações.....	139
6.11 Análise dos resultados .....	140
6.12 Conclusões.....	145
6.13 Nível de serviço no trecho estudado.....	146
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>148</b>
<b>ANEXO A (ARQUIVOS DO INTEGRATION).....</b>	<b>151</b>
A.1 ARQUIVO MESTRE .....	152
A.2 ARQUIVO DE NÓS .....	153
A.3 ARQUIVO DE TRAMOS.....	154
A.4 ARQUIVO DE SEMAFOROS.....	156
A.5 ARQUIVO DE DEMANDA .....	156
A.6 ARQUIVO DE INCIDENTES .....	157

A.7 ARQUIVO LANE_STRIPING.DAT .....	158
A.8 ARQUIVO DE RESULTADOS (File 10.out).....	158
A.9 ARQUIVO DE ESTATISTICAS DA SIMULAÇÃO (RUNERR.OUT).....	159
A.10 ARQUIVO DE RESULTADOS (File 11.out).....	160
<b>ANEXO B: ARQUIVOS DE QUEENS OD .....</b>	<b>161</b>
B.1 ARQUIVO MESTRE .....	164
B.2 ARQUIVO DO FLUXOS OBSERVADOS NO LINK .....	165
B.3 ARQUIVO DO MOVIMENTOS DE CONVERSÃO.....	165
B.4 Matriz origem destino gerada para o cenário base (0) pico da tarde.....	166
B.5 Matriz origem destino gerada para o cenário base (0) pico da manhã.....	167
B.6 Matriz origem destino gerada para o cenário base (0) Fora de pico.....	168
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>169</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1.1	Trechos de via a serem coordenados	3
FIGURA 2.1	Indicações luminosas em semáforos	5
FIGURA 2.2	Tipos de movimentos nos semáforos	7
FIGURA 2.3	Operação de semáforo no cruzamento de duas vias de mão única	9
FIGURA 2.4	Conceito de vermelho total	9
FIGURA 2.5	Operação de semáforo com fase exclusiva para pedestres	10
FIGURA 2.6	Operação com conversão à esquerda não protegida	11
FIGURA 2.7	Operação com conversão à esquerda protegida- Alternativa 1	11
FIGURA 2.8	Operação com conversão à esquerda protegida- Alternativa 2	12
FIGURA 2.9	Operação com conversão à esquerda protegida- Alternativa 3	13
FIGURA 2.10	Semáforo com 4 fases e 4 estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla	14
FIGURA 2.11	Semáforo com 2 fases e 4 estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla	15
FIGURA 2.12	Desvio em forma de alça para a conversão à esquerda	15
FIGURA 2.13	Esquema de operação denominado interseção com fluxo contínuo	16
FIGURA 2.14	Via central para conversão à esquerda com sentido alternado	16

FIGURA 2.15	Semáforo com fase exclusiva para pedestres	17
FIGURA 2.16	Semáforo com movimentos de conversão à direita e à esquerda simultâneos	17
FIGURA 2.17	Semáforo numa interseção em T	18
FIGURA 2.18	Verde efetivo e tempo perdido	25
FIGURA 2.19	Diagrama de fases de um semáforo duas fases	26
FIGURA 2.20	Esquema da duração do amarelo e do vermelho total	29
FIGURA 2.21	Identificação das fases veiculares críticas-exemplo 1	32
FIGURA 2.22	Identificação das fases veiculares críticas – exemplo 2	33
FIGURA 2.23	Atraso médio num semáforo em função da duração do ciclo	36
FIGURA 2.24	Proporção de ciclos saturados	40
FIGURA 2.25	Variação típica dos principais parâmetros em função do ciclo	42
FIGURA 2.26	Ilustra o funcionamento do sistema de onda verde	44
FIGURA 2.27	Antecipação dos inícios dos verdes	47
FIGURA 2.28	Situação ótima para coordenação em vias de duplo sentido	49
FIGURA 2.29	Coordenação com abertura simultânea dos verdes para dois semáforos	49
FIGURA 2.30	Coordenação com abertura simultânea dos verdes para três semáforos	50
FIGURA 2.31	Coordenação com progressão alternada	51
FIGURA 2.32	Coordenação com progressão alternada dupla	52
FIGURA 2.33	Solução ótima de coordenação de semáforos num trecho de via de duplo sentido	53
FIGURA 2.34	Rede simples de semáforos	54
FIGURA 2.35	Rede fechada e rede aberta	55
FIGURA 4.1	Relações entre as variáveis de tráfego	80

FIGURA 4.2	Relação entre espaçamentos de caminhão e automóvel	82
FIGURA 5.1	Esquema da interseção e plano semaforico empregado	91
FIGURA 5.2	Atraso e número de paradas x ciclo para $V_1 = 500$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	92
FIGURA 5.3	Atraso e número de paradas x ciclo para $V_1 = 800$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	93
FIGURA 5.4	Atraso e numero de paradas x ciclo para $V_1 = 855$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	93
FIGURA 5.5	Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para $V_1 = 500$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	95
FIGURA 5.6	Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para $V_1 = 800$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	95
FIGURA 5.7	Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para $V_1 = 855$ veíc/h e $V_2 = 400$ veíc/h	96
FIGURA 5.8	Curvas atraso e número de paradas x relação entre os tempos de verde	100
FIGURA 5.9	Esquema da interseção e plano semaforico empregado	101
FIGURA 5.10	Curvas do atraso e número de paradas x duração do ciclo	102
FIGURA 5.11	Esquema da interseção e plano semaforico do cenário 1	104
FIGURA 5.12	Esquema da interseção e plano semaforico do cenário 2	104
FIGURA 5.13	Esquema da interseção e plano semaforico do cenário 3	105
FIGURA 5.14	Esquema da situação analisada	106
FIGURA 5.15	Atraso e número de paradas x defasagem	108
FIGURA 5.16	Gráfico espaço x tempo movimento dos veículos entre os semáforos	108
FIGURA 5.17	Esquema da situação analisada	109
FIGURA 5.18	Atraso e número de paradas x defasagem	111
FIGURA 5.19	Tempo na rede x defasagem	112
FIGURA 5.20	Esquema da situação analisada	113
FIGURA 6.1	Mapa reduzido do município e da cidade de Manágua	115
FIGURA 6.2	Rede de semáforos da cidade de Manágua	116

FIGURA 6.3	Mapa com indicação do trecho de via estudado	118
FIGURA 6.4	Características da operação dos semáforos	119
FIGURA 6.5	Ligações consideradas no trecho estudado	121
FIGURA 6.6	Ligações e nós do trecho de via estudado	122
FIGURA 6.7	Variação do volume dos semáforos ao longo do dia	124
FIGURA 6.8	Volumes de tráfego nos três períodos estudados	125
FIGURA 6.9	Volume de tráfego nas ligações no pico da manhã	126
FIGURA 6.10	Volume de tráfego nas ligações no pico da tarde	127
FIGURA 6.11	Volumes de tráfego nas ligações no período de baixa demanda	128
FIGURA 6.12	Processo de funcionamento do modelo QUEENS <sub>OD</sub>	130
FIGURA 6.13	Trecho modelado no INTEGRATION	132
FIGURA 6.14	Valores de atraso	140
FIGURA 6.15	Valores do número de paradas	141
FIGURA 6.16	Valores do tempo de viagem	142
FIGURA 6.17	Consumo de combustível	144
FIGURA 6.18	Emissão de HC	144
FIGURA 6.19	Emissão de CO	144
FIGURA 6.20	Emissão de NOx	145

## LISTA DE TABELAS

---

TABELA 2.1	Tamanho da fila crítica	39
TABELA 2.2	Nível de serviço x tempo médio parado	41
TABELA 2.3	Características dos tipos de chegada dos veículos	58
TABELA 2.4	Valores típicos de $P_f$ e $f_{PA}$	59
TABELA 2.5	Valores de $l$ em função dos valores de $x$ do fluxo que segue em frente relativo ao semáforo anterior	60
TABELA 2.6	Nível de serviço x velocidade média de viagem em trechos longos de vias semaforizadas	62
TABELA 5.1	Atraso e número de paradas	92
TABELA 5.2	Consumo de combustível e emissão de poluentes	94
TABELA 5.3	Faixas de variação do ciclo com menores valores dos parâmetros	97
TABELA 5.4	Valores do atraso e do número de paradas	98
TABELA 5.5	Resultados obtidos para diferentes relações do tempo de verde	99
TABELA 5.6	Resultados obtidos	102
TABELA 5.7	Atraso e número de paradas nos três cenários	106
TABELA 5.8	Atraso e número de paradas x duração do ciclo	107
TABELA 5.9	Atraso e número de paradas x defasagem	110
TABELA 5.10	Tempo na rede x defasagem	112
TABELA 5.11	Atraso e número de paradas nos três cenários	114
TABELA 6.1	Características da operação dos semáforos	120
TABELA 6.2	Volume de tráfego no pico da manhã	126
TABELA 6.3	Volume de tráfego no pico da tarde	127
TABELA 6.4	Volumes de tráfego no período de baixa demanda	128

TABELA 6.5	Índices de congestionamento	133
TABELA 6.6	Cenário 0 (mesmos valores em todos os períodos)	135
TABELA 6.7	Cenário 1	136
TABELA 6.8	Cenário 2	136
TABELA 6.9	Cenário 3	137
TABELA 6.10	Cenário 4	137
TABELA 6.11	Cenário 5	138
TABELA 6.12	Cenário 6	138
TABELA 6.13	Resultados para o pico da manhã	139
TABELA 6.14	Resultados para o pico da tarde	139
TABELA 6.15	Resultados para o período de menor demanda	139
TABELA 6.16	Valores de atraso	140
TABELA 6.17	Valores do número de paradas	141
TABELA 6.18	Valores do tempo de viagem	142
TABELA 6.19	Consumo de combustível e emissão de poluentes	143
TABELA 6.20	Resumo das medidas de desempenho avaliadas	146
TABELA 6.21	Nível de serviço do trecho nos três períodos de estudo	146

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

MOE <sub>s</sub>	Medidas de desempenho
JICA	Japan Interamerican Cooperation Agency
TRB	Transportation Research Board
HCM	Highway Capacity Manual
CO	Monóxido de Carbono
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
HC	Hidrocarbonetos
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
MP	Material Particulado
ITS	Sistemas Inteligentes de Transportes
ATMS	Sistemas Avançados de Gerenciamento de Tráfego
HOV	High Occupancy Vehicle
IVHS	Sistemas Inteligentes de Tráfego
TRL	Transportation Research Board
TRRL	Transportation Research Record Laboratory
SMARTTEST	Simulation Modeling Applied – Road Transport European Scheme

## RESUMO

LEIVA TAPIA, S; (2003). Avaliação de alternativas de operação de um trecho semaforizado utilizando o simulador INTEGRATION. São Carlos, 2003. 172p Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho contém os seguintes tópicos: fundamentos sobre a operação de semáforos e descrição de alguns modelos analíticos de avaliação do desempenho de semáforos isolados e coordenados; considerações sobre simulação do tráfego de veículos e comentários sobre alguns dos principais modelos de simulação desenvolvidos; descrição do simulador de tráfego INTEGRATION; análise dos valores obtidos com o INTEGRATION em alguns casos simples de cruzamentos com semáforos isolados e coordenados, através da comparação com os resultados fornecidos por outros modelos teóricos de avaliação do desempenho de semáforos; e emprego do simulador INTEGRATION na avaliação de algumas alternativas de operação de um trecho de via semaforizado da cidade de Manágua – Nicarágua. Os valores obtidos com o INTEGRATION nos casos simples de cruzamentos com semáforos isolados e coordenados mostram-se próximos dos fornecidos por outros modelos teóricos, bem como consistentes com o comportamento real da operação de veículos em semáforos isolados e coordenados. A análise da situação atual do trecho de via de Manágua analisado mostrou dois pontos importantes: primeiro, o trânsito no local se encontra totalmente congestionado nos horários de pico; segundo, alterações na programação dos semáforos não resolvem o problema, sendo necessário o aumento de uma faixa em cada sentido na via principal. Considerando o aumento das duas faixas, foram gerados seis cenários de operação, numa combinação envolvendo os seguintes aspectos: semáforos isolados ou coordenados, existência de conversão à esquerda ou não e coordenação na via principal num e no outro sentido. Todos esses cenários mais o cenário atual foram avaliados utilizando o simulador INTEGRATION. Os resultados apontam que os melhores cenários são aqueles em que é proibida a conversão à esquerda. Por circunstâncias particulares, a coordenação dos semáforos não apresentou os benefícios que normalmente apresenta.

**Palavras-chave:** Trecho semaforizado, Simulação, Modelos de simulação, Coordenação semafórica, Otimização, Medidas de desempenho, INTEGRATION.

## RESUMEN

LEIVA TAPIA, S; (2003). Avaluación de alternativas de operación de un trecho semaforizado utilizando el simulador INTEGRATION San Carlos, 2003 172p. Tesis (Maestría) – Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo.

Este trabajo contiene los siguientes tópicos: fundamentos sobre la operación de semáforos aislados y coordinados; consideraciones sobre simulación de tráfico de vehículos y comentarios sobre algunos de los principales modelos de simulación desarrollados; descripción del simulador INTEGRATION; análisis de los valores obtenidos con el INTEGRATION en algunos casos simples de cruces con semáforos aislados y coordinados, a través de la comparación con los resultados obtenidos por otros modelos teóricos de evaluación de desempeño de semáforos; el empleo del simulador INTEGRATION en la evaluación de algunas alternativas de operación de un trecho de vía semaforizada de la ciudad de Managua-Nicaragua. Los valores obtenidos con el INTEGRATION en los casos simples de cruces con semáforos aislados y coordinados se mostraron próximos a los obtenidos por otros modelos teóricos, bien como consistentes con el comportamiento real de la operación de vehículos en semáforos aislados y coordinados. El análisis de la situación actual del trecho de vía de Managua analizado mostró dos puntos importantes: primero, el tránsito en el local se encuentra totalmente congestionado en los horarios de pico; segundo, alteraciones en la programación de los semáforos no resuelve el problema, siendo necesario el aumento de un carril en cada sentido de la vía principal. Considerando el aumento de los dos carriles, fueron generados seis escenarios de operación, en una combinación envolviendo los siguientes aspectos: semáforos aislados y coordinados, existencia de la conversión a la izquierda o no y la coordinación en la vía principal en un y en otro sentido. Todos esos escenarios más el escenario actual fueron evaluados utilizando el simulador INTEGRATION. Los resultados apuntan que los mejores escenarios son aquellos en que es prohibida la conversión a la izquierda. Por circunstancias particulares, la coordinación de los semáforos no presentó los beneficios que normalmente presenta.

Palabras -clave: Tramo semaforizado, Simulación, Modelos de simulación, Coordinación semaforica, Optimización, Medidas de desempeño, INTEGRATION.

## ABSTRACT

LEIVA TAPIA, S; (2003). Evaluation of alternatives of a signalized stretch operation using INTEGRATION simulator. São Carlos 2003, 172p M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The following topics are enclosed in this work: fundamentals about traffic signals operation and description of some analytical models of evaluation of isolated and co-ordinated traffic signals performance; considerations about the traffic of vehicles simulation and comments regarding some of the main developed simulation models; description of the traffic simulator INTEGRATION; analysis of the values obtained using INTEGRATION in some simple cases of intersections with isolated traffic signals and coordinated, through the comparison with the supplied results obtained in other theoretical evaluation models of the traffic signals performance; and INTEGRATION simulator application in the evaluation of some operation alternatives of a signalized stretch in the city of Managua-Nicaragua. The values obtained with the INTEGRATION in the simple cases of intersections with isolated and co-ordinated traffic signals are close to the supplied ones by theoretical models, as well as consistent with the real behavior of vehicles operation at isolated and co-ordinated traffic signals. The current situation analysis of the stretch of way of Managua indicated that : the local traffic is totally congested in the peak times; and the alterations in the traffic signals programing do not solve the problem; having the necessity of increasing an additional lane in the main lane. Considering the increase of these two lanes, six scenary of operation were generated, in a combination involving the following aspects: isolated and co-ordinated traffic signals, existence of conversion the left turn or not and co-ordinated traffic signals in the main way in one on the other direction. All these scenes and the current scene had been more evaluated using simulator INTEGRATION. The results point that the best scenes are those where it is forbidden the left turn. For particular circumstances, the co-ordinated traffic signals did not present benefits that normally present.

Keywords: Signalized stretch, Simulation, Traffic signals coordination, Optimization, Simulation Modeling, Effectiveness measures, INTEGRATION.

### **1.1. Considerações iniciais**

As baixas velocidades nos deslocamentos urbanos, bem como os valores excessivos do consumo de combustível e da emissão de poluentes na rede viária, devem-se em grande parte aos atrasos e as paradas nas interseções semaforizadas.

A programação adequada dos semáforos e a coordenação dos semáforos próximos são fundamentais para melhorar a fluidez do tráfego de veículos, redundando em aumento da velocidade média redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes.

A simulação é uma importante ferramenta para a determinação dos benefícios e impactos de projetos de transportes, pois proporciona aos engenheiros de transportes condições para avaliar o desempenho de um sistema antes de ser implementado, como também, muitas vezes, a otimização da operação do sistema

Os simuladores de tráfego constituem uma ferramenta extremamente útil no processo de avaliação de alternativas de operação de uma interseção, de uma via ou de um conjunto de vias.

Contudo, a geração de cenários adequados depende do conhecimento e da experiência do engenheiro de tráfego.

No planejamento e no projeto da operação do sistema viário ambos são fundamentais: o engenheiro de tráfego competente e o ferramental técnico adequado (onde se incluem os simuladores de tráfego).

## 1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo principal da dissertação é analisar a operação do tráfego de veículos num trecho de via semaforizado da cidade de Manágua – Nicarágua, utilizando o simulador INTEGRATION. Será avaliado o desempenho da situação atual e de outros cenários gerados visando a melhoria da fluidez do trânsito no local.

Também são objetivos do trabalho: realizar revisão bibliográfica sobre os temas semáforos e simulação de tráfego; estudar e descrever detalhadamente as principais características do simulador INTEGRATION; e analisar os valores obtidos com esse simulador em alguns casos simples de cruzamentos semaforizados isolados e coordenados, através da comparação com os resultados fornecidos por outros modelos teóricos de avaliação de desempenho de semáforos.

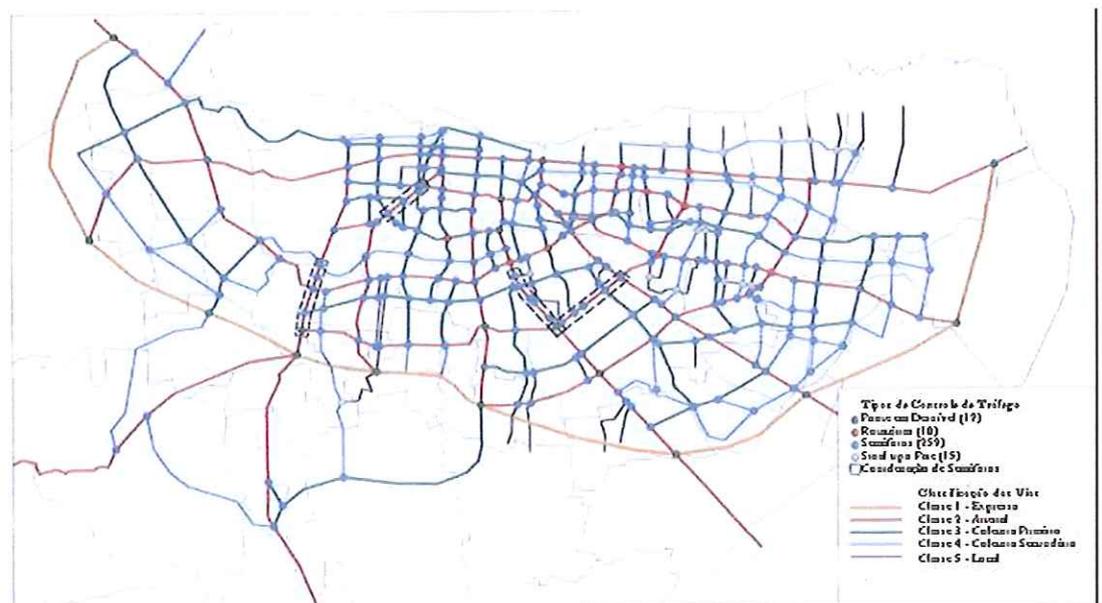
## 1.3. Justificativa

Em 1998, foi elaborado para a cidade de Manágua – Nicarágua um Plano Diretor para o Transporte Urbano, incluindo a Rede Viária e o Transporte Público, com ano meta 2018. Este trabalho foi realizado pela *Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA)*, mediante convênio com a Prefeitura de Manágua.

De acordo com o trabalho de *JICA*, atualmente a magnitude e a seriedade dos problemas de tráfego não são tão notáveis em Manágua como em outras grandes cidades do mundo. Contudo, em razão do incremento populacional e do crescimento econômico, os problemas de trânsito começarão a surgir a médio prazo.

O trabalho de *JICA* estima que a relação volume/capacidade, que em 1998 era de 0,6, alcance 1,1 no ano de 2003. O congestionamento do tráfego em Manágua chegará a ser extremamente sério em muitos trechos da malha viária para o ano 2008, quando a relação volume/capacidade deverá estar entre 1,38 e 2,20 nos horários de pico.

O trabalho de *JICA* faz recomendações essenciais em relação ao melhoramento da operação do tráfego. Uma delas é que até o ano de 2018 devem ser semaforizadas um total de 259 interseções, incluindo as 90 já semaforizadas. Além disso, todos os semáforos devem ser modernizados com sistema atuado ou semi-atuado, e três segmentos de vias que têm uma série de semáforos próximos estão propostas para ter controle coordenado. As linhas pretas da figura 1.1 indicam os trechos a serem coordenados.



**Figura 1.1 - Trechos de vias a serem coordenados.**

Contudo, até o momento não foi realizado nenhum estudo específico sobre a otimização das programações semaforizadas e a coordenação dos semáforos nesses trechos de vias.

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de dar início ao estudo da coordenação dos semáforos nesses locais, começando pelo trecho da Avenida Ruben Dário.

Pelas estimativas de tráfego realizadas no ano de 2001, nesse segmento de via circulam cerca de 24.000 veículos por dia, com previsão para, num horizonte de 10 anos, chegar a 33.500 veículos por dia.

#### **1.4. Estrutura do texto**

O trabalho está dividido em sete capítulos, dentre os quais este capítulo introdutório. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos sobre a operação de semáforos e descritos alguns modelos analíticos de avaliação do desempenho de semáforos isolados e coordenados.

O capítulo 3 contém considerações sobre simulação do tráfego de veículos e comentários sobre alguns dos principais modelos de simulação desenvolvidos.

No capítulo 4 são descritas de forma detalhada as principais características do INTEGRATION, bem como comentados alguns aspectos relevantes sobre esse simulador.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos com o INTEGRATION em alguns casos simples de cruzamentos com semáforos isolados e coordenados, através da comparação com os resultados fornecidos por outros modelos teóricos de avaliação do desempenho de semáforos.

O capítulo 6 relata o estudo da operação de um trecho de via semaforizado da cidade de Manágua – Nicarágua, onde o simulador INTEGRATION é utilizado na avaliação de diferentes alternativas de operação.

No capítulo 7 são feitas algumas considerações finais consideradas relevantes no contexto do trabalho.

## Capítulo 2

# OPERAÇÃO DE SEMÁFOROS

Este capítulo apresenta conceitos básicos acerca da operação de semáforos, parâmetros de desempenho em semáforos isolados e um breve histórico de coordenação de semáforos e os diferentes tipos de coordenação. A revisão bibliográfica é baseada nas seguintes publicações: Roess *et al* [1998], TRB [2000], Ferraz *et al* [1999], Silveira [1992] e Françaço [1990].

### 2.1. Grupo focal, estágio e fase

#### Grupo focal

Denomina-se grupo focal o conjunto de focos (lentes coloridas nas cores vermelha, amarela e verde) que controlam cada conjunto de movimentos no cruzamento semaforizado. A letra V é utilizada para designar grupo focal para veículos e a letra P para pedestres.

As indicações luminosas padrões dos focos semaforicos são mostradas na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Indicações luminosas em semáforos

Os focos para veículos são circulares, com diâmetro de 200 ou 300 mm, e os focos para pedestres quadrados, com lado de 200 ou 300 mm.

Nos semáforos para veículos, a liberação de passagem é dada pela luz verde e a de proibição de passagem pela luz vermelha. O aviso de que o direito de passagem está terminando é dado pela luz amarela, que, usualmente, é utilizada apenas após a luz verde.

A luz amarela deve ser utilizada pelos veículos que estão se aproximando do cruzamento quando a luz está verde e se encontram tão próximos que não podem parar com segurança e comodidade antes de ultrapassar a linha de retenção colocada antes da faixa de pedestres. Esses veículos devem prosseguir e entrar no cruzamento com a luz amarela. Daí a razão de dizer que “o amarelo é do verde”.

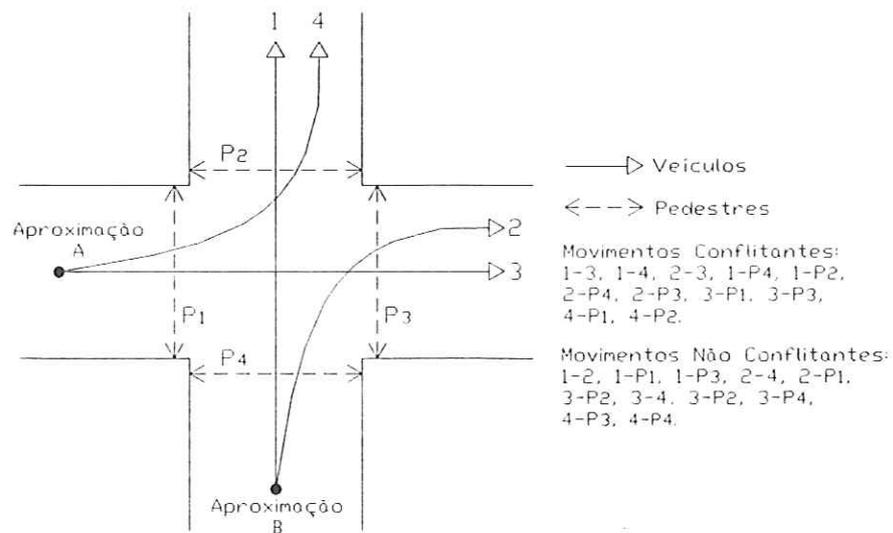
Nos semáforos para pedestres, a liberação de passagem é, geralmente, dada pelo boneco verde em posição de caminhada e a proibição de passagem pela mão aberta em vermelho, ou por boneco vermelho em posição estática.

A advertência de que o direito de passagem está terminando não é feita por luz amarela, mas pela luz vermelha piscando. Quando a luz vermelha estiver piscando, os pedestres que já iniciaram a travessia devem concluí-la, e aqueles que ainda estão no passeio não devem iniciar a passagem, pois não terão tempo suficiente para atravessar com segurança – antes de concluírem a travessia o sinal vai estar verde para algum fluxo de veículos que cruza a faixa de pedestres.

A lente seta é utilizada nos cruzamentos semaforizados quando os movimentos em frente e de conversão à esquerda e/ou à direita são realizadas em intervalos distintos. Quando se usa lente seta em semáforos é importante a sinalização horizontal do pavimento para que os motoristas possam posicionar adequadamente os veículos, de acordo com a direção que vão seguir.

### Movimentos conflitantes e não conflitantes

A figura 2.2 mostra os movimentos conflitantes e não conflitantes no caso de um semáforo simples localizado na confluência de duas vias de mão única.



**Figura 2.2 - Tipos de movimentos nos semáforos**

Os movimentos de veículos e pedestres num semáforo podem ser protegidos ou permitidos. São protegidos quando realizados em fase exclusiva com preferência. Exemplos: fase exclusiva para conversão à esquerda, fase exclusiva para travessia de pedestres. São permitidos quando autorizados, porém realizados sem preferência através de fluxos conflitantes de veículos e/ou pedestres. Exemplos: conversão à esquerda em fase não exclusiva, travessia de pedestres em cruzamentos sem semáforo para pedestres.

### Estágio, fase e diagrama de tempos.

A denominação estágio é empregada para designar cada uma das diferentes configurações de movimentos no cruzamento semaforizado. Assim, durante um estágio a indicação luminosa de todos os grupos focais não se altera. Sempre que houver mudança de indicação luminosa interrompendo um ou mais fluxos (de veículos e/ou

pedestres) para permitir o movimento de outro ou outros fluxos (de veículos e/ou pedestres) que estavam interrompidos, passa-se de um estágio para outro.

O termo fase é utilizado para designar cada uma das diferentes configurações de movimentos onde pelo menos um dos fluxos continua em movimento, ainda que um ou mais fluxos sejam interrompidos para permitir o movimento de outro ou outros fluxos que estavam interrompidos. As várias configurações distintas dentro de uma mesma fase são denominadas de subfases. Assim, as subfases coincidem com os estágios.

O diagrama de tempos mostra o comportamento das indicações de luzes nos vários grupos focais ao longo do tempo (ciclo).

As indicações luminosas (verde, amarelo e vermelho) dos vários grupos focais dos semáforos se repetem, normalmente, de maneira idêntica ao longo do tempo, caracterizando um fenômeno periódico ou cíclico. Dessa forma, denomina-se ciclo de um semáforo ao período de tempo em que a sucessão de indicações luminosas se repete de forma análoga.

Na figura 2.3 é mostrado o plano de operação semaforico (diagramas de estágios, fases e tempos) usualmente empregado no caso simples de um cruzamento de duas vias de mão única. Notar que as letras G, R e Y são utilizadas para designar os períodos de verde, vermelho e amarelo, por serem as letras iniciais das palavras em Inglês correspondentes (green, red e yellow).

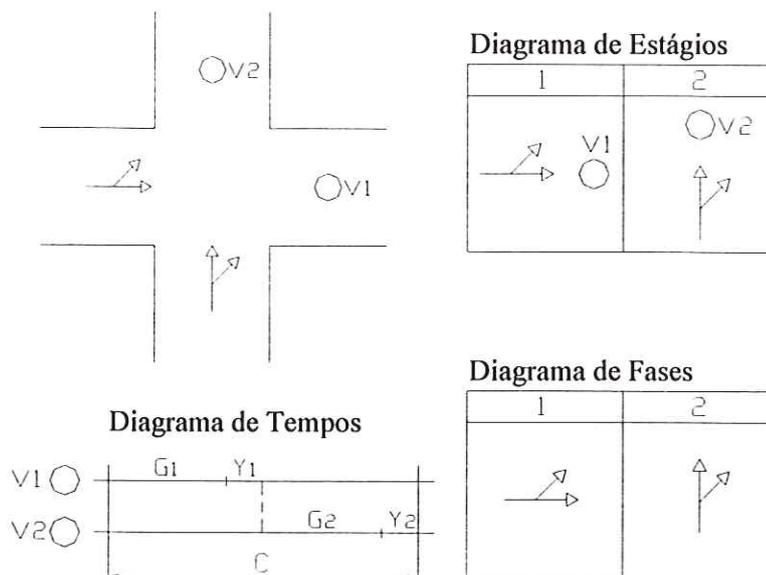


Figura 2.3 – Operação de semáforo no cruzamento de duas vias de mão única.

**Vermelho total e entreverdes**

Após o último veículo entrar no cruzamento no final do amarelo é indicado, por razões de segurança, proibir a passagem dos fluxos conflitantes fazendo com que a luz fique vermelha para os mesmos. Esse tempo de vermelho superposto é denominado de vermelho total, como indicado na figura 2.4.

A soma do amarelo (Y) com o vermelho total

( $R_t$ ) é denominada de período entreverdes (I – Intergreen, em Inglês), ou seja:

$$I = Y + R_t.$$

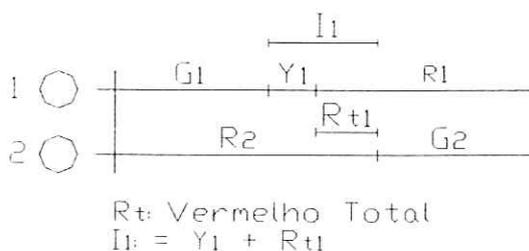


Figura 2.4 – Conceito de vermelho total.

### Semáforo com fase exclusiva para pedestres

No caso do exemplo da figura 2.3, a travessia de pedestres nas chegadas dos veículos ao cruzamento não constitui problema, pois no período em que o fluxo de entrada é interrompido com indicação luminosa vermelha, os pedestres podem atravessar com segurança – o que caracteriza um movimento protegido, mesmo sem a existência de grupo focal para pedestres.

Contudo, nas saídas do cruzamento não é programado que exista nenhum período de tempo sem a passagem de veículos. Assim, o movimento de pedestres é permitido mas não protegido. Os pedestres devem buscar intervalos maiores entre a passagem dos veículos para atravessar. Nos países desenvolvidos, é adotada e respeitada a regra de que imediatamente após o fluxo que segue em frente ser interrompido no vermelho, os pedestres podem atravessar, tendo prioridade sobre os fluxos que fazem a conversão à direita ou à esquerda.

No Brasil, isso não ocorre, havendo conflitos sérios entre motoristas e pedestres nessas travessias.

Nos casos em que o movimento de pedestres é intenso no cruzamento, pode ser necessário utilizar uma fase exclusiva para garantir a travessia protegida dos pedestres, como indicado na figura 2.5.

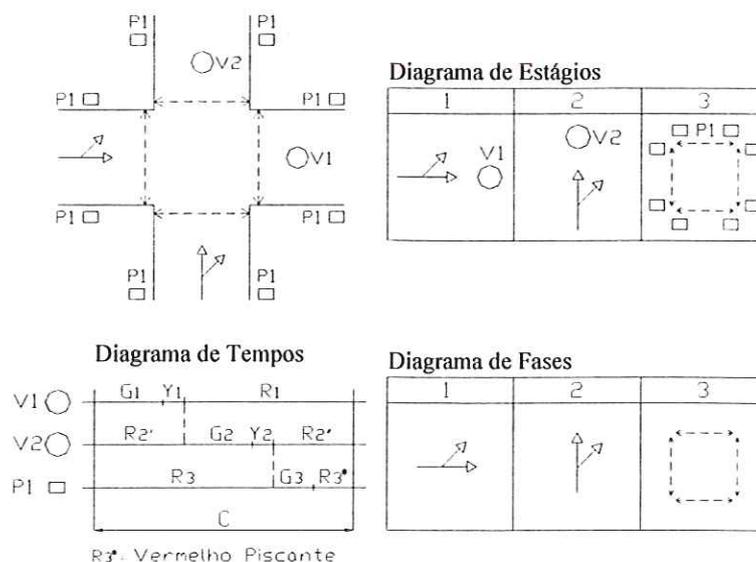


Figura 2.5 - Operação de semáforo com fase exclusiva para pedestres.

## 2.2. Semáforos com conversão à esquerda

A figura 2.6 mostra as características de um semáforo no cruzamento de uma via de mão única com uma via de mão dupla, no qual a conversão à esquerda é permitida, mas não protegida.

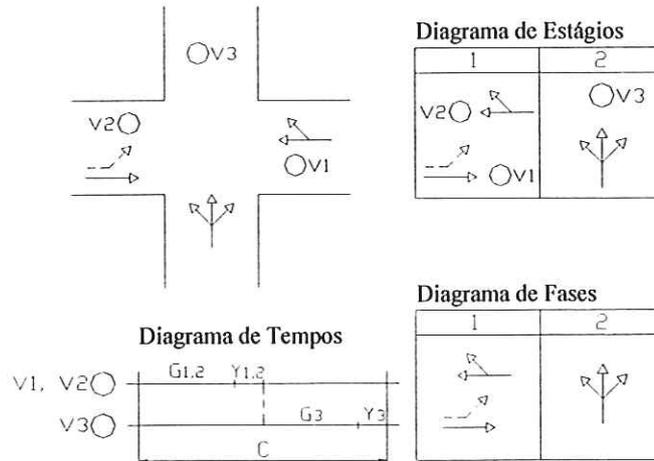


Figura 2.6 – Operação com conversão à esquerda não protegida.

Na figura 2.7 é mostrada uma primeira alternativa de operação onde a conversão à esquerda na via de mão dupla é protegida. Nesse caso, não há necessidade da utilização de grupo focal com lente seta para sinalizar o movimento de conversão à esquerda.

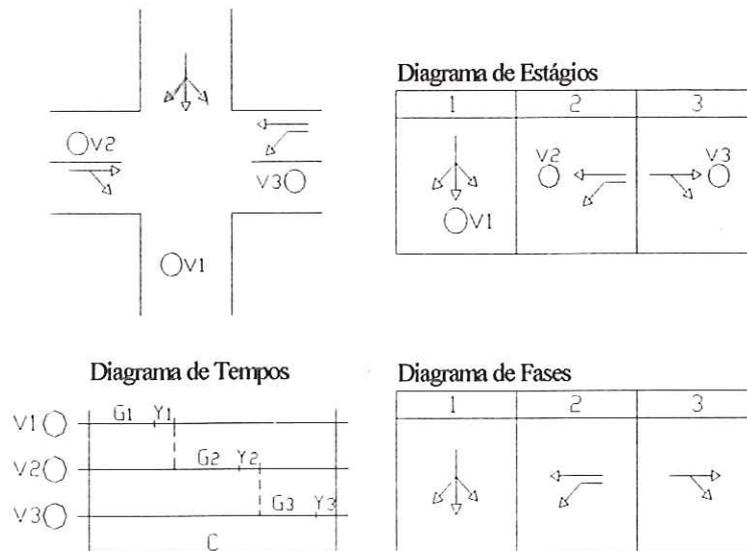
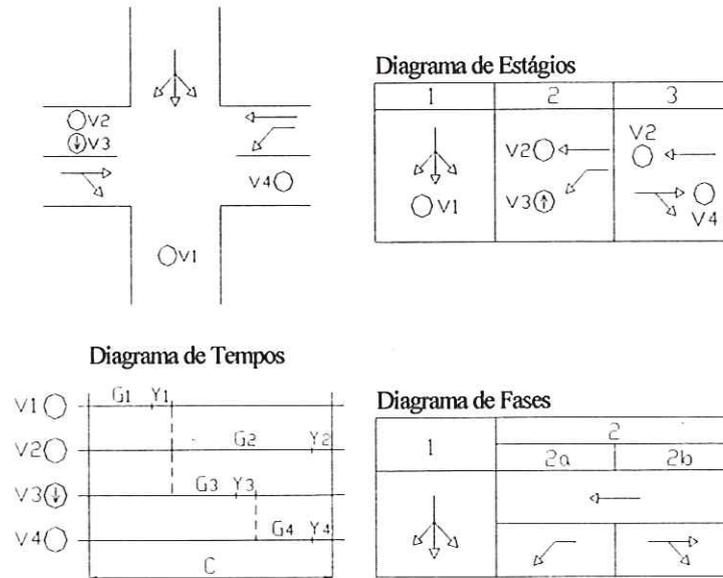


Figura 2.7 – Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 1.

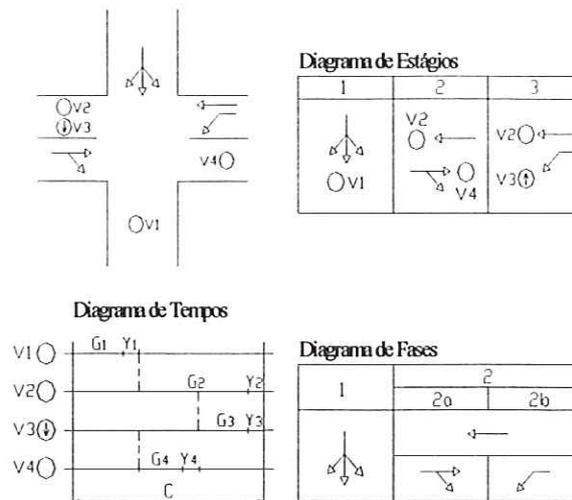
Na figura 2.8 é mostrada uma segunda alternativa de operação, onde a conversão à esquerda na via de mão dupla é protegida. Nessa situação, há necessidade da utilização de grupo focal com lente seta para sinalizar o movimento de conversão à esquerda.



**Figura 2.8 – Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 2.**

Essa segunda opção apresenta a vantagem de proporcionar maior tempo de verde para o fluxo que segue em frente (sinalizado pelo grupo focal V<sub>2</sub>), pois este fluxo se movimenta durante dois estágios. Isso aumenta a capacidade deste fluxo e reduz o tempo que os veículos permanecem parados, aumentando a eficiência geral da operação dos veículos no cruzamento.

Na seqüência de estágios mostrada na figura 2.8, o movimento de conversão à esquerda é liberado antes do movimento no sentido oposto, razão pela qual a operação é referida como “conversão à esquerda com verde adiantado ou avançado”. Se a seqüência for diferente, com o movimento de conversão à esquerda ocorrendo após o movimento do fluxo oposto, conforme mostrado na figura 2.9, a denominação dada é “conversão à esquerda com verde atrasado ou retardado”.



**Figura 2.9 – Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 3.**

A alternativa de operação mais indicada para permitir a conversão à esquerda protegida depende do volume de veículos e pedestres nos vários fluxos, do emprego de faixa exclusiva ou compartilhada (caso em que os veículos que seguem em frente também podem utilizar a faixa destinada aos veículos que fazem a conversão), necessidade de coordenação com outros semáforos próximos, etc.

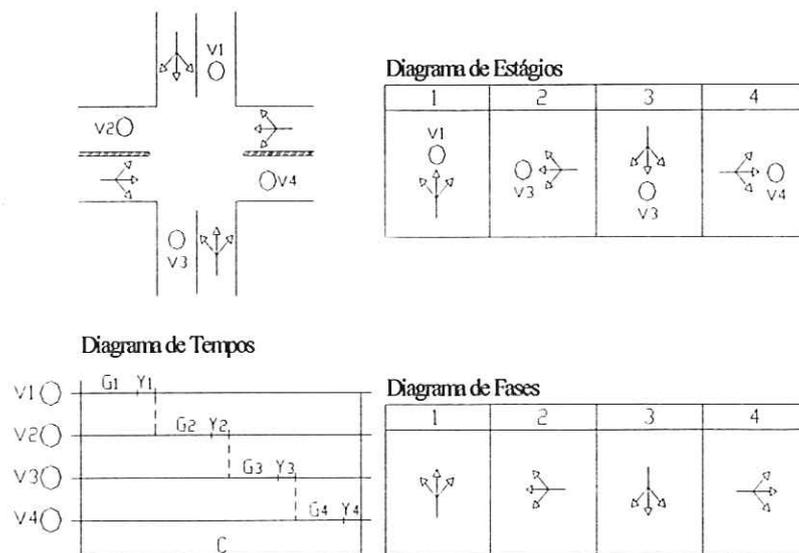
O uso compartilhado da faixa de conversão à esquerda é problemático. Primeiro, porque quando a conversão está impedida (luz vermelha) e um ou mais veículos estão aguardando para executar esta manobra, muitos veículos que vão em frente e que estão na faixa da esquerda tentam passar para as faixas da direita próximo do cruzamento, criando uma zona de entrelaçamento que prejudica a segurança, a fluidez e a comodidade do trânsito no local. Segundo, porque os veículos que vão em frente e utilizam a faixa da esquerda prejudicam os veículos que vão fazer a conversão retardando a passagem de muitos deles pelo semáforo. Se o volume de conversão é grande, isso prejudica bastante a fluidez, a segurança e a comodidade do trânsito no local.

Assim, a faixa de conversão à esquerda compartilhada somente deve ser empregada quando o volume de conversão é baixo, sendo nesse caso, a princípio, mais apropriado à operação com verde adiantado, pois isso reduz os problemas citados.

### 2.3. Outros casos de operação de semáforos

Na seqüência são apresentados outros exemplos de planos de operação semaforicos, bem como comentados outros aspectos relevantes sobre a operação de semáforos.

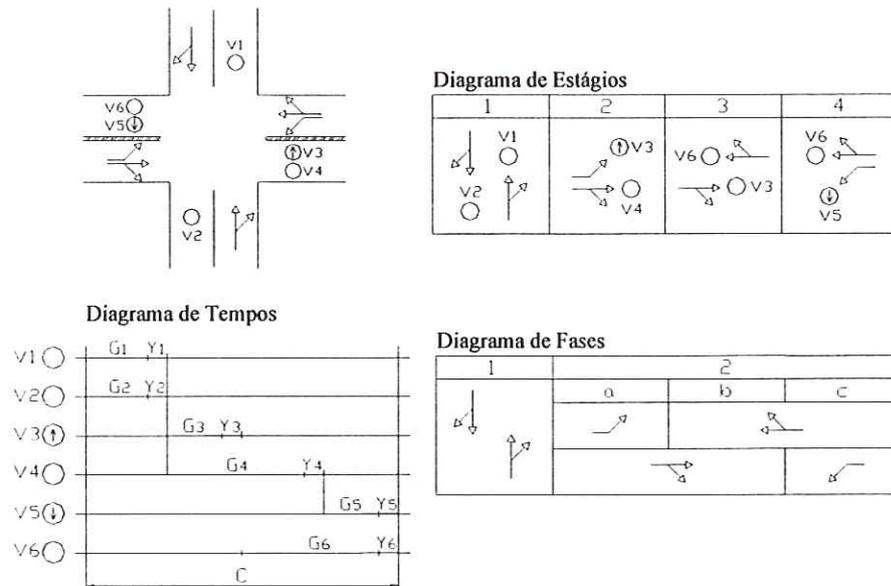
Na figura 2.10 é mostrado o caso do cruzamento de duas vias de mão dupla com semáforo de 4 fases e 4 estágios, sendo o direito de passagem concedido para cada aproximação por vez. Dessa forma, todos os movimentos são permitidos, com exceção do movimento de retorno. Este tipo de cruzamento apresenta o inconveniente de apresentar um grande tempo total perdido no ciclo, pois o valor perdido em cada fase deve ser multiplicado por 4 (número de fases). O que reduz a capacidade da interseção. Além disso, a indicação de verde demora bastante para voltar à cada aproximação, causando grandes esperas aos veículos.



**Figura 2.10 – Semáforo com 4 fases e 4 estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla**

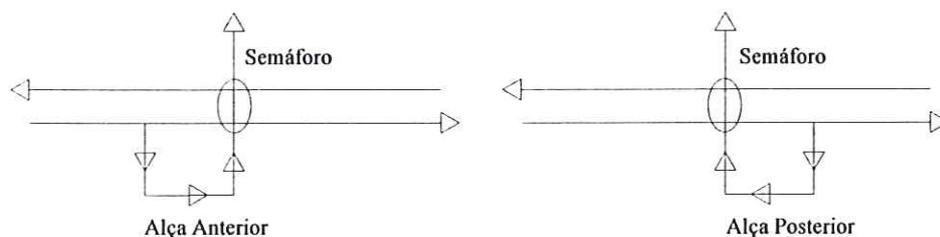
A figura 2.11 mostra uma outra alternativa de operação para o mesmo cruzamento da figura 2.10. Nesse caso, a conversão à esquerda na via “vertical” é

proibida, e o semáforo opera com 4 estágios e 2 fases. Em relação à solução anterior, o tempo perdido por ciclo é menor e também são menores as esperas dos veículos. A desvantagem é que os veículos que desejam fazer conversão à esquerda na via “vertical” (que é proibida) têm de percorrer maiores distâncias para chegar ao destino.



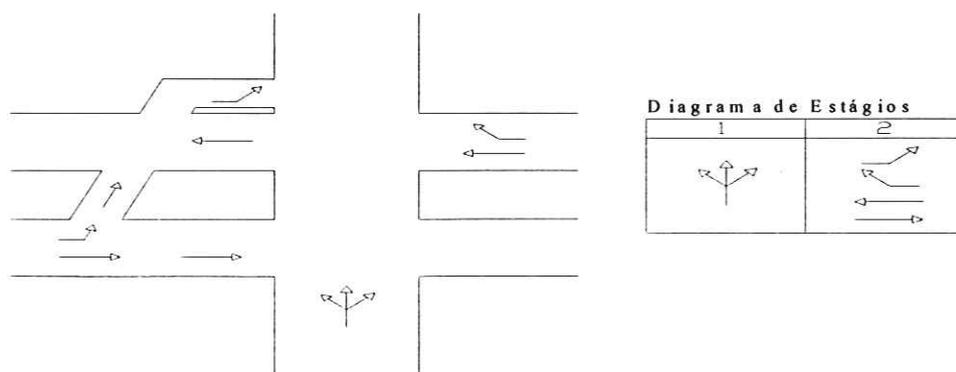
**Figura 2.11 – Semáforo com 2 fases e 4 estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla**

Para evitar o uso de um grande número de fases (estágios) que levam à redução da capacidade da interseção e aumento do tempo de espera dos veículos, muitas vezes é indicado proibir a conversão à esquerda no semáforo, obrigando os veículos a fazer alças para seguir na direção perpendicular à via em que se encontram, conforme mostrado na figura 2.12..



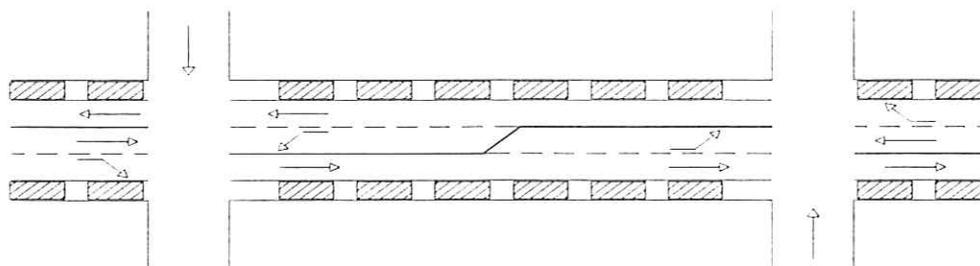
**Figura 2.12 – Desvio em forma de alça para a conversão à esquerda.**

Outra alternativa, é utilizar a estratégia de operação indicada na figura 2.13, denominada de interseção com fluxo contínuo. Esta solução exige bastante espaço e obriga a criação de um novo cruzamento (que muitas vezes também necessita ter semáforo) antes do cruzamento semaforizado principal. Nesse caso, é importante operar de forma coordenada os dois semáforos.



**Figura 2.13 – Esquema de operação denominado interseção com fluxo contínuo**

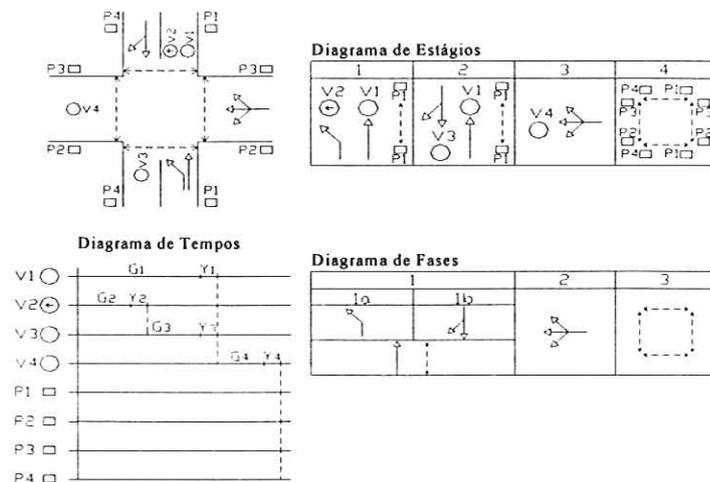
Na figura 2.14 é mostrada a solução comumente utilizada em vias com três faixas e duplo sentido, onde é permitida a conversão à esquerda. A faixa central é utilizada ora num sentido ora no outro, como faixa de conversão à esquerda.



**Figura 2.14 – Via central para conversão à esquerda com sentido alternado**

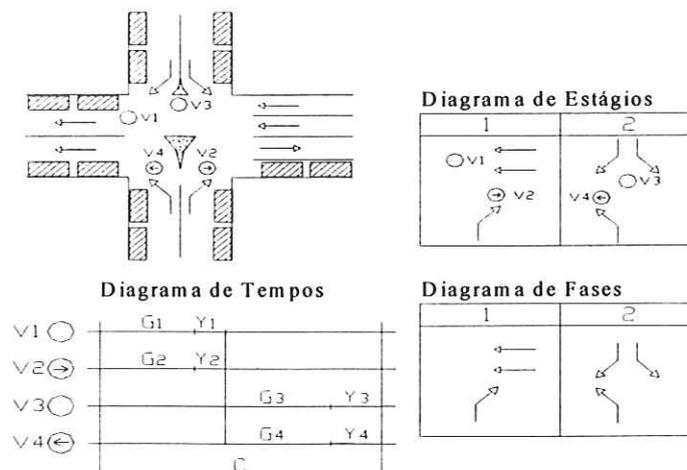
A figura 2.15 mostra o caso de um cruzamento de via de mão dupla com via de mão única, com movimento de conversão à esquerda protegido e fase exclusiva para a travessia de pedestres. Embora, como assinalado, o direito de passagem para os

pedestres no semáforo P1 possa ser sinalizado nos estágios 1 e 2 (fases 1a e 1b), isso não é comum. O normal é sinalizar verde para a travessia de pedestres no semáforo P1 apenas no estágio 4 (fase 3), junto com os outros semáforos (P2, P3 e P4).



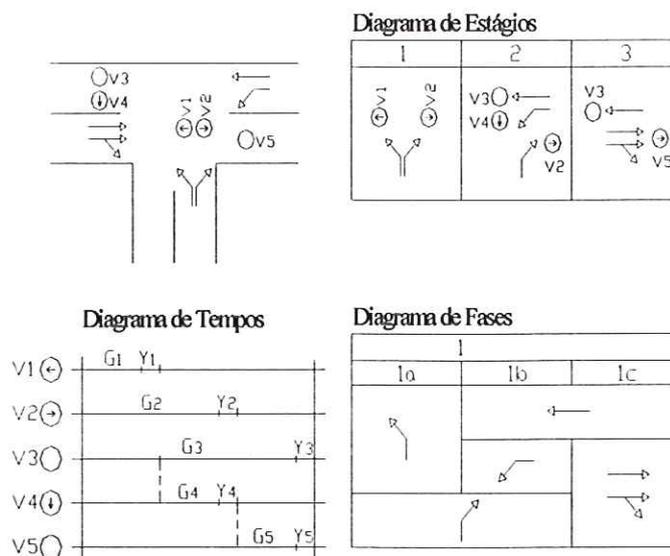
**Figura 2.15 – Semáforo com fase exclusiva para pedestres.**

Na figura 2.16 é mostrado um semáforo onde os movimentos de conversão à direita A e à esquerda B ocorrem simultaneamente, adentrando a via destino em faixas separadas – que devem ser separadas por linha branca contínua para indicar que a mudança de faixas é proibida próximo ao semáforo, garantindo, assim, total segurança dos movimentos A e B.



**Figura 2.16 – Semáforo com movimentos de conversão à direita e à esquerda simultâneos.**

Na figura 2.17 é mostrado o caso de um semáforo numa interseção em T, com um dos possíveis planos semaforicos que podem ser utilizados.



**Figura 2.17 – Semáforo numa interseção em T**

Em muitos países o movimento de conversão à direita é permitido mesmo quando a luz está vermelha. Nesse caso, contudo, a preferência é da travessia de pedestres, ou seja, o veículo somente pode fazer a conversão à direita se não tiver nenhum pedestre para atravessar. No Brasil, isso não é, em geral, permitido.

## 2.4. Escolha do plano semaforico

A escolha do plano de operação dos semáforos (configuração dos estágios, fases e grupos focais) deve seguir as orientações gerais colocadas a seguir.

Quanto mais simples o sistema, mais fácil o entendimento por parte dos usuários e maior a segurança. Lentas setas devem ser usadas somente nos casos realmente necessários.

O número de fases deve ser o menor possível, a fim de minimizar o tempo perdido em cada ciclo, 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 amarelo pela necessidade de se ter um intervalo de segurança entre as passagens do último e do primeiro veículo que se cruzam em direções distintas.

Na prática, o número de fases é normalmente limitado a 3. Somente em casos excepcionais é que são utilizados 4 fases. Na maioria dos cruzamentos são usadas 2 fases.

O número de movimentos não conflitantes em cada estágio deve, do ponto de vista da eficiência e da capacidade, ser o máximo possível.

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.

## **2.5. Controladores Semafóricos**

### **Tipos de controladores**

Os comandos para acender e apagar as lâmpadas dos focos semafóricos, ou seja, o controle da duração das fases do semáforo é realizado por um dispositivo denominado de controlador semafórico.

Basicamente são empregados dois tipos de controladores: controladores de tempo fixo e por demanda de tráfego.

Nos controladores de tempo fixo o tempo de ciclo é constante, e a duração e os instantes de mudança das fases verde e vermelha são fixos em relação ao ciclo. Assim, controlar uma interseção isolada em tempo fixo significa ter sempre o mesmo tempo de verde e vermelho para cada corrente de tráfego, independentemente da variação do

fluxo de veículos que chegam ao cruzamento. A duração dos tempos é calculada em função das características e volumes médios do tráfego no período considerado.

Os controladores por demanda de tráfego são mais complexos e mais caros que os de tempo fixo, por serem providos de detectores de veículos e lógica de decisão.

Sua finalidade básica é dar o tempo de verde a cada corrente de tráfego de acordo com a sua necessidade, ajustando esses tempos às flutuações momentâneas de tráfego.

O princípio de funcionamento do controlador atuado baseia-se na variação do tempo de verde de cada fase entre um valor mínimo e um valor máximo, ambos programáveis no equipamento. O tempo de verde (compreendido neste intervalo) será definido pelo controlador em função das solicitações de veículos passando e que percebidas por detectores instalados sob o pavimento. O mínimo período de verde corresponde ao tempo necessário para a passagem segura de um veículo, ou para a travessia de pedestres no cruzamento. A partir da duração mínima, são adicionadas extensões de verde, acionadas pela detecção de veículos na faixa de tráfego com direito de passagem. O número de extensões será limitado pelo máximo período de verde predefinido.

Se num determinado período todas as correntes de tráfego atingirem seu nível de saturação (volume máximo capaz de passar pela interseção), as demandas serão tão frequentes que forçarão todos os tempos de verde a serem estendidos até seus valores máximos, e o controlador estará operando o tráfego como se fosse um equipamento de tempo fixo.

Os controladores semaforicos antigos eram eletro-mecânicos: basicamente uma engrenagem que girava, acionada por um pequeno motor elétrico. A velocidade de giro da engrenagem e a posição de cursores acoplados a mesma definiam a duração da cada indicação luminosa do semáforo.

Os controladores de tempo fixo antigos mais simples tinham capacidade para armazenar apenas um plano de tráfego. Ou seja, a duração do ciclo e das fases verde de vermelha permanecia constante durante todo o dia. Alguns controladores mais sofisticados permitiam o emprego de mais de uma programação semafórica ao longo do dia.

Os controladores de tempo fixo modernos são eletrônicos (dotados de chips), e têm capacidade de armazenar uma grande quantidade de planos de tráfego, permitindo, assim, que a programação semafórica seja modificada ao longo do dia, pois possuem, inclusive, um relógio interno (timer). Assim, por exemplo, é possível operar com o plano 1 no pico da manhã, o plano 2 no meio do dia, o plano 3 no pico da tarde e o plano 4 no período noturno, etc.

Independentemente da capacidade de armazenamento, os controladores de tempo fixo são equipamentos bastante simples, de custo relativamente baixo e fácil operação e manutenção.

### **Formas de controle do tráfego em semáforos**

O controle empregado nos cruzamentos semaforizados pode ser de três tipos:

- Controle isolado de cruzamento – O controle dos movimentos de tráfego baseia-se apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não sendo consideradas as eventuais influências exercidas pela operação de interseções sinalizadas adjacentes. O objetivo é minimizar a demora no cruzamento, ou o número de paradas, ou uma função que incorpore os dois parâmetros.
- Controle arterial de cruzamentos (rede aberta) - Este tipo de controle preocupa-se em operar os semáforos de uma via principal (corredor) de forma coordenada a dar continuidade de movimentos entre as interseções adjacentes (sistema progressivo ou onda verde), minimizando a demora total nos semáforos da via, ou o número de paradas, ou ainda uma função que incorpore os dois parâmetros.

- Controle de cruzamentos em áreas (rede fechada) - Neste tipo de controle são consideradas todas as interseções sinalizadas de uma determinada região (o caso comum é a área central das cidades maiores), sendo o objetivo minimizar a demora global em todos os semáforos da rede, ou o número de paradas, ou uma função que combina os dois parâmetros.

## 2.6. Conceitos Básicos na operação

### Fluxo de saturação

O máximo fluxo de veículos numa faixa de tráfego que pode passar por um cruzamento semaforizado quando a luz está verde é denominado de fluxo de saturação.

O fluxo de saturação deve, preferencialmente, ser medido no campo, pois depende de muitos fatores: largura da faixa de tráfego, inclinação longitudinal da via, porcentagem de veículos pesados (ônibus e caminhões), porcentagem de veículos que fazem conversão à direita e/ou à esquerda, número de manobras para estacionamento de veículos na faixa contígua, número de paradas de ônibus na faixa contígua, fluxo de pedestres cruzando a faixa, etc.

Pesquisas de campo mostram que o fluxo de saturação no caso ideal (faixa de tráfego larga, trânsito constituído apenas com carros passando direto, sem manobras de estacionamento de veículos ou paradas de ônibus na faixa contígua, pequeno número de pedestres cruzando a faixa, etc.) situa-se em torno de 1900 carros/hora, o que corresponde a um intervalo de tempo entre a passagem de carros consecutivos (headway) de 1,89s.

A medida do fluxo de saturação no campo é relativamente simples. Basta contar a quantidade de veículos que passam pela linha de retenção quando a fila de veículos em movimento na luz verde é ininterrupta e dividir o valor obtido pelo tempo da contagem. Para obter valores representativos é importante efetuar a contagem para

diversos períodos de verde e calcular a média dos valores obtidos – que é o mesmo que dividir a soma do número de veículos obtido em cada contagem pela soma dos tempos correspondentes a cada contagem.

Na ausência de valores medidos no campo, e no caso de cruzamentos com pequeno número de manobras para estacionamentos de carros, baixo fluxo de bicicletas e sem paradas de ônibus próximas, o valor do fluxo de saturação pode ser estimado com a seguinte expressão 2.6.1.

$$s = 1900 \cdot f_w \cdot f_g \cdot f_{hv} \cdot f_{rt} \cdot f_{lt} \quad [2.6.1]$$

Onde:

s: fluxo de saturação real da faixa (veíc/h);

$f_w$ : fator de ajuste para a largura da faixa dado pela expressão 2.6.2:

$$f_w = 1 + (w - 3,6) / 9 \quad [2.6.2]$$

w: largura da faixa em metros ( $2,4m \leq w \leq 4,8m$ );

$f_g$ : fator de ajuste para a inclinação da rampa dado pela expressão 2.6.3:

$$f_g = 1 - (g/200) \quad [2.6.3]$$

Onde:

g o valor da inclinação em porcentagem ( $-6\% \leq g \leq 10\%$ );

$f_{hv}$ : fator de ajuste para veículos pesados dado pela expressão 2.6.4:

$$f_{hv} = 1 / (1 + P_{hv}) \quad [2.6.4]$$

Onde:

$P_{hv}$ : fração de veículos pesados (caminhões, ônibus, etc.);

frt: fator de ajuste para as manobras de conversão à direita,

frt = 0,85 no caso de faixa exclusiva,

frt = 1,00 – 0,15.Prt no caso de faixa compartilhada com os veículos que seguem direto

Prt é a fração de veículos que fazem conversão à direita,

frt = 1,00 – 0,135.Prt no caso de faixa única compartilhada;

flt: fator de ajuste para as manobras de conversão à esquerda em fase protegida, sendo

flt = 0,95 no caso de faixa exclusiva

flt = 1 / (1 + 0.05.Plt) no caso de faixa compartilhada com os veículos que seguem direto.

Em condições normais do tráfego, o fluxo de saturação situa-se entre 1300 e 1700 veíc/h.

### **Tempo perdido e verde efetivo**

A partida das filas de veículos nos semáforos não é instantânea quando a luz fica verde. Existe um tempo perdido para a fila partir ( $l_1$ ), devido ao tempo de percepção e reação dos motoristas e o tempo de aceleração dos veículos. Esse tempo depende do comportamento dos motoristas (função do porte da cidade), do tipo de veículo, da inclinação da via, etc. Valores típicos observados no campo:  $l_1 = 1 - 3$  seg.

O tempo amarelo dos semáforos deve ser utilizado para passar pelos veículos que estão muito próximos do cruzamento quando a luz muda do verde para o amarelo e, por isso, não têm condições de parar antes da linha de retenção (daí a razão de se dizer que "o amarelo é do verde"). Os veículos que estão relativamente distantes do cruzamento e tem condições de parar sem ultrapassar a faixa de retenção devem fazê-lo.

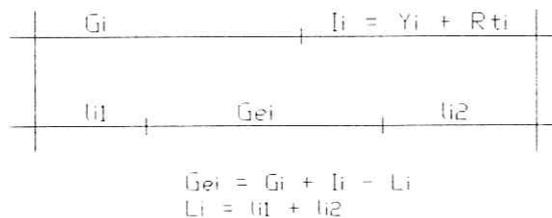
Em vista disso, uma certa parcela no final do tempo amarelo (ou do entreverdes se existir vermelho total) não é utilizada por razões de segurança ( $l_2$ ), pois deve existir um intervalo de tempo entre a passagem do último veículo de uma fase e o início da movimentação do 1º veículo da fase subsequente. Valores típicos observados no campo:  $l_2 = 0 - 2$  seg.

Assim, o tempo total perdido em cada fase  $i$  é igual a:  $L_i = l_1 + l_2$ . Valores típicos de  $L_i$  observados no campo:  $L_i = 2 - 4$  seg. Na ausência de dados coletados no local, adotar nas aplicações práticas  $L_i = 3$ s.

Em virtude do tempo perdido no início do verde e no fim do entreverdes (amarelo mais vermelho total), o tempo realmente disponível para a travessia de veículos na fase  $i$ , e que é denominado de verde efetivo, dado pelo expressão 2.6.5.

$$G_{ei} = G_i + I_i - L_i \quad [2.6.5]$$

A figura 2.18 ilustra o conceito de tempo perdido e verde efetivo.



**Figura 2.18 – Verde efetivo e tempo perdido.**

O verde efetivo total do ciclo é, portanto igual dada pela expressão 2.6.6:

$$G_e = \sum G_{ei} = \sum (G_i + I_i - L_i) = \sum (G_i + I_i) - \sum L_i = C - L \quad [2.6.6]$$

Dessa forma, o verde efetivo total no ciclo é igual ao tempo de ciclo menos a soma dos tempos perdidos nas mudanças de fase (tempo total perdido no ciclo).

Para o caso simples de um semáforo de duas fases, conforme ilustrado na figura 2.19, o verde efetivo total do ciclo é igual na expressão 2.6.7.

$$G_e = G_{e1} + G_{e2} = (G_1 + I_1 - L_1) + (G_2 + I_2 - L_2) = (G_1 + I_1 + G_2 + I_2) - (L_1 + L_2) = C - L \quad [2.6.7]$$

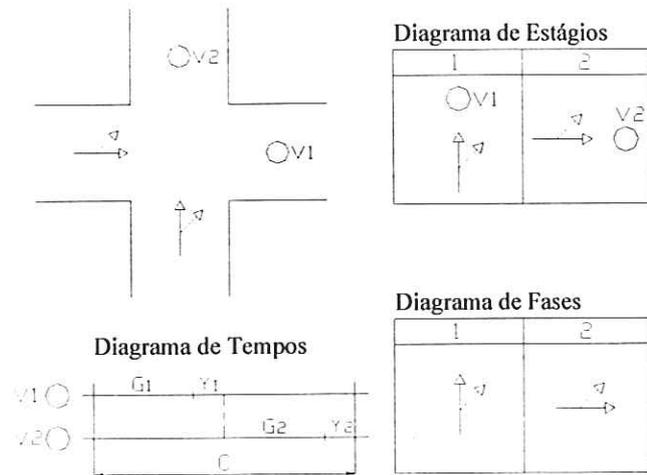


Figura 2.19 – Diagrama de fases de um semáforo duas fases.

### Capacidade, taxa de ocupação e grau de saturação (índice de congestionamento)

A capacidade de tráfego de cada faixa  $j$  que se movimenta na fase  $i$  é calculada pela expressão 2.6.8:

$$c_j = s_j \cdot G_{e_i} / C = s_j \lambda \quad [2.6.8]$$

Onde,  $c_j$  : capacidade de tráfego,  $s_j$  : fluxo de saturação,  $G_{e_i}$  : duração do verde efetivo,  $C$ : duração do ciclo e  $\lambda = G_e/C$ : fração do verde efetivo no ciclo.

A taxa de ocupação da faixa  $j$  é dada pela expressão 2.6.9:

$$y_j = q_j / s_j \quad [2.6.9]$$

Onde,  $y_j$  : taxa de ocupação,  $q_j$  : fluxo de tráfego e  $s_j$  : já definido.

O grau de saturação ou índice de congestionamento da faixa  $j$  é dado pela expressão 2.6.10:

$$x_j = q_j / c_j = q_j \cdot C / s_j \cdot G_{e_i} = (q_j / s_j) \cdot (C / G_{e_i}) = q_j / \lambda \cdot s_j \quad [2.6.10]$$

Onde:  $x_j$  : grau de saturação e  $q_j$ ,  $c_j$ ,  $C$ ,  $G_{e_i}$ ,  $\lambda$ : já definidos.

Se  $x_j > 1$ , a faixa está congestionada e as esperas dos veículos são elevadas. Na realidade, a partir de  $x = 0,9$  as esperas já começam a ser elevadas e a qualidade da operação (nível de serviço) já se torna insatisfatória.

O maior grau de saturação da fase  $i$  é denominado grau de saturação crítico da fase  $i$ , e a faixa onde isso ocorre de faixa crítica da fase  $i$ .é dado pela expressão 2.6.11.

$$x_c^i = \text{maior } x_j^i \quad [2.6.11]$$

Como  $C/G_{e_i}$  tem o mesmo valor para todas as faixas que se movem na fase  $i$  do semáforo, na faixa crítica também ocorre a maior taxa de ocupação (taxa de ocupação crítica), é dado pela expressão 2.6.12.

$$y_c^i = \text{maior } y_j^i = (q_j / s_j)_c^i = (q/s)_c^i \quad [2.6.12]$$

O grau de saturação (índice de congestionamento) global da interseção é dado pela expressão 2.6.13.

$$X = (\sum q_c^i \cdot x_c^i) / (\sum q_c^i) \quad [2.6.13]$$

Onde,  $X$ : índice de congestionamento global do cruzamento,  $q_c^i$  : fluxo na faixa crítica da fase  $i$  e  $x_c^i$  : grau de saturação na faixa crítica da fase  $i$ .

O valor de  $X$  é indicativo de quanto à capacidade da interseção está sendo utilizada.

A capacidade total do cruzamento semaforizado é igual à soma das capacidades individuais das faixas críticas, é dado pela expressão 2.6.14.

$$\text{Cap} = \sum c_j = \sum s_j \cdot G_{e_i} / C \quad [2.6.14]$$

Se o valor de  $s$  for o mesmo para todas as faixas críticas, resulta da expressão 2.6.15.

$$\text{Cap} = \sum s_j \cdot G_{e_i} / C = s / C \cdot \sum G_{e_i} = s \cdot G_e / C = s \cdot (C - L) / C \quad [2.6.15]$$

Quanto maior o valor do ciclo, maior a capacidade total do cruzamento. Considerando, por exemplo, um ciclo máximo de 120 seg e um tempo perdido em cada fase de 3 seg, resultam os seguintes valores para a capacidade máxima, para 2 fases na expressão 2.6.16, para 3 fases na expressão 2.6.17, para 4 fases na expressão 2.6.18.

- Para 2 fases:  $\text{Cap}_{\text{máx}} = s \cdot (120 - 6) / 120 = 0,950 \cdot s \quad [2.6.16]$

- Para 3 fases:  $\text{Cap}_{\text{máx}} = s \cdot (120 - 9) / 120 = 0,925 \cdot s \quad [2.6.17]$

- Para 4 fases:  $\text{Cap}_{\text{máx}} = s \cdot (120 - 12) / 120 = 0,900 \cdot s \quad [2.6.18]$

Supondo, por exemplo,  $s = 1500$  veíc/h, os valores da capacidade total resultam: 1425 veíc/h para 2 fases, 1387,50 veíc/h para 3 fases e 1350 veíc/h para 4 fases.

## 2.7. Duração do amarelo e do entreverdes

### Duração do amarelo

A duração do amarelo deve ser suficiente para que os veículos que estão muito próximos do cruzamento, portanto sem condições de parar com segurança e conforto antes da faixa (linha) de retenção, possam prosseguir e passar por essa linha ainda no amarelo, ou seja, não entrando na interseção no vermelho.

Define-se distância de frenagem, para efeito de análise da operação de paradas de veículos em semáforos, como a distância percorrida por um veículo desde que

apareceu a luz amarela até a parada final. De acordo com as leis da Física, esta distância é dada pela seguinte expressão 2.7.1.

$$Df = V.T_{pr} + \frac{V^2}{2.a} \quad [2.7.1.]$$

Onde,  $Df$ : distância de frenagem em m,  $T_{pr}$ : tempo de percepção e reação em s (normalmente adotado igual a 1s),  $V$ : velocidade de aproximação em m/s e  $a$ : desaceleração em  $m/s^2$  (normalmente adotada igual a  $3 m/s^2$ ).

Considerando um veículo se aproximando a uma distância  $Df$  quando aparece à luz amarela (situação crítica, pois se trata do último veículo a passar), a duração do amarelo deve ser igual ao tempo que o veículo demora para percorrer a distância  $Df$ , como é dado na expressão 2.7.2

$$Y = \frac{Df}{V} \quad \text{ou} \quad Y = T_{pr} + \frac{V}{2.a} \quad [2.7.2]$$

Onde,  $Y$ : duração do amarelo em s e  $Df$ ,  $T_{pr}$ ,  $V$  e  $a$  já definidos.

### Duração do entreverdes

Após passar na faixa de retenção no final do amarelo, o último veículo deve sair da área da interseção antes do sinal ficar verde para os fluxos conflitantes de veículos e pedestres. Isso significa que, nos casos mais comuns, à distância  $S+F+V+F+C$ , conforme indicado na figura 2.20, deve ser percorrida durante o vermelho total.

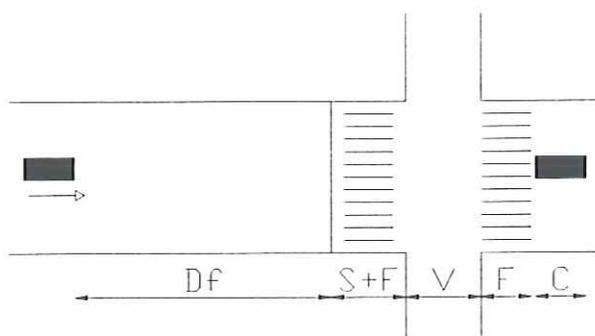


Figura 2.20 – Esquema da duração do amarelo e do vermelho total.

Admitindo que o veículo percorra essa distância com velocidade constante, a duração do vermelho total deve ser igual à expressão 2.7.3.

$$Rt = \frac{S + 2F + V + C}{V} \quad [2.7.3]$$

Onde, Rt: vermelho total em s, S: distância da linha de retenção até a faixa de pedestres em m (normalmente igual a 1m), F: largura da faixa de pedestres em m (normalmente igual a 4m), V: largura da via a ser cruzada em m, C: comprimento do veículo em m (normalmente adotado igual a 6m).

Essa expressão não leva em conta, contudo, que tanto condutores como pedestres não partem imediatamente após a luz ficar verde. Na realidade, eles somente começam a se movimentar após o tempo de percepção e reação. Assim, ainda dentro de um padrão adequado de segurança, pode-se calcular a duração do vermelho total através da expressão 2.7.4.

$$Rt = \frac{S + 2F + V + C}{V} - T_{pr} \quad [2.7.4]$$

Dessa forma, a duração do entreverdes deve ser igual à expressão 2.7.5:

$$I = Y + Rt = \frac{V}{2.a} + \frac{S + 2F + V + C}{V} \quad [2.7.5]$$

Na grande maioria dos cruzamentos urbanos, o amarelo resulta em torno de 3s e o vermelho total entre 1 e 2s.

Muitas cidades não utilizam o vermelho total, utilizando o amarelo durante todo o período de entreverdes.

## 2.8. Duração do ciclo e dos verdes em semáforos isolados

### Considerações iniciais

A metodologia aqui apresentada é conhecida como metodologia de Webster, por ter sido apresentada originariamente no trabalho *Traffic Signal Settings*, publicado em 1958, de autoria de F. V. Webster - pesquisador do TRRL (*Transportation and Road Research Laboratory*) da Inglaterra.

### Semáforo Isolado

Um semáforo é considerado isolado quando o processo de chegada dos veículos ao mesmo é totalmente (aleatória), isto é, não sofre influência de outros semáforos situados a montante, ou outros fatores que possam interferir na aleatoriedade do fenômeno. Do ponto de vista prático, pode-se considerar um semáforo como isolado quando não existe outro a montante numa distância de 400 - 500m.

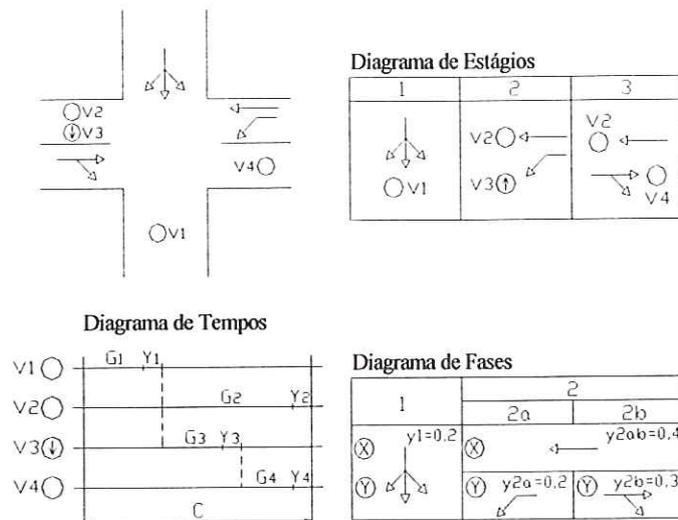
### Ciclo ótimo

A duração ótima do ciclo proposta por Webster [1958] é aquela que minimiza o atraso médio experimentado pelos veículos na interseção. O valor do ciclo ótimo deve ser calculado pela seguinte expressão empírica é dada pela expressão 2.8.1:

$$C_0 = \frac{1,5.L + 5}{1 - Y} \quad [2.8.1]$$

Onde,  $C_0$  : duração do ciclo ótimo em s, L: tempo total perdido no ciclo em s e  $Y = \sum y_c^i$  : somatória das taxas de ocupação críticas das fases/subfases veiculares críticas.

As fases/subfases veiculares críticas são aquelas que apresentam o maior valor de Y. No caso de semáforos sem foco com lente seta, não há problema na identificação das fases críticas, pois só existe uma trajetória. No caso de semáforos com lente seta, é necessário comparar as várias trajetórias possíveis para descobrir as subfases críticas, como exemplificado nos casos apresentados nas figuras 2.21 e 2.22.



**Figura 2.21 – Identificação das fases veiculares críticas – exemplo 1**

No caso da figura 2.21, existem duas trajetórias possíveis, assinaladas com as letras X e Y. Os valores de Y em cada uma delas são os seguintes dadas nas expressões 2.8.2 e 2.8.3.

$$Y_X = y_1 + y_{2ab} = 0,2 + 0,4 = 0,6 \quad [2.8.2]$$

$$Y_Y = y_1 + y_{2a} + y_{2b} = 0,2 + 0,2 + 0,3 = 0,7 \quad [2.8.3]$$

Como  $Y_Y > Y_X$ , o número de fases/subfases críticas é igual a 3, e, portanto,  $L = 3 l$  (admitindo  $l = 3s$ , resulta  $L = 9s$ ).

Se, por exemplo,  $y_{2ab} = 0,6$ ,  $Y_X > Y_Y$ , e o número de fases/subfases críticas seria igual a 2 e, portanto,  $L = 2 l$  (admitindo  $l = 3s$ ,  $L = 6s$ ).

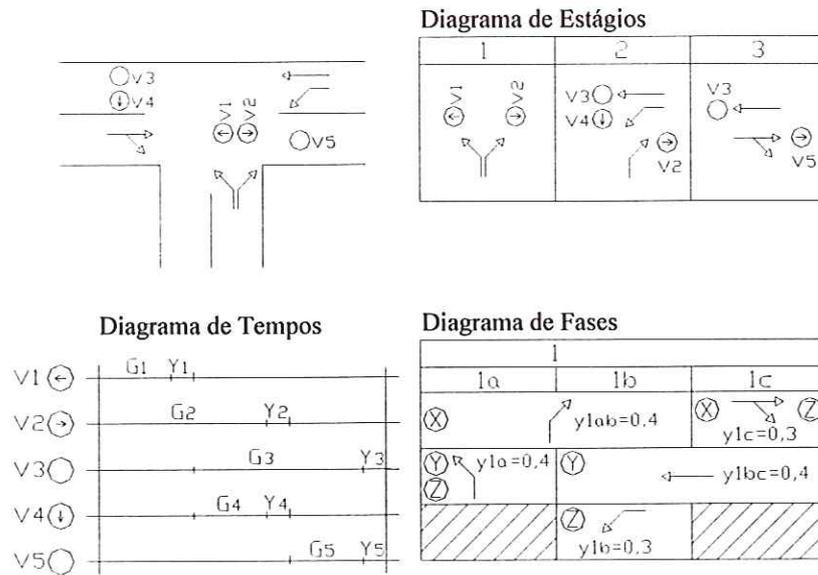


Figura 2.22 – Identificação das fases veiculares críticas – exemplo 2.

No caso da figura 2.22, existem três trajetórias possíveis, assinaladas com as letras X, Y e Z. Os valores de Y em cada uma delas nas seguintes expressões 2.8.4, 2.8.5 e 2.8.6.

$$Y_X = y_{1ab} + y_{1c} = 0,4 + 0,3 = 0,7 \quad [2.8.4]$$

$$Y_Y = y_{1a} + y_{1bc} = 0,2 + 0,4 = 0,6 \quad [2.8.5]$$

$$Y_Z = y_{1a} + y_{1b} + y_{1c} = 0,2 + 0,3 + 0,3 = 0,8 \quad [2.8.6]$$

Como  $Y_Z = 0,8$  é o maior valor, o número de fases/subfases críticas é igual a 3, e, portanto,  $L = 3 l$  (admitindo  $l = 3s$ , resulta  $L = 9s$ ).

Se, por exemplo,  $y_{1b} = 0,1$ , resultaria  $Y_X = 0,7$ ;  $Y_Y = 0,6$ ;  $Y_Z = 0,6$ , sendo  $Y_X = 0,7$  o maior valor. Assim, o número de fases/subfases críticas seria igual a 2 e, portanto,  $L = 2 l$  (admitindo  $l = 3s$ ,  $L = 6s$ ).

## Repartição do verde

A divisão (repartição) do verde efetivo entre as diversas fases do semáforo deve ser proporcional às taxas de ocupação crítica das mesmas para que o atraso médio global dos veículos no cruzamento resulte mínimo. É dado na expressão 2.8.7.

$$Ge_i = \frac{y_c^i}{\sum_i y_c^i} \cdot Ge \quad [2.8.7]$$

Onde,  $Ge_i$  : verde efetivo da fase  $i$ ,  $y_c^i$  : taxa de ocupação crítica da fase  $i$  e  $Ge$ : verde efetivo total do ciclo ( $Ge = C - L$ ).

Com a distribuição dos tempos de verde proporcional às taxas de ocupação críticas, os índices de congestionamentos nas faixas críticas das fases críticas resultam iguais, ou seja, na expressão 2.8.8.

$$x^c_1 = x^c_2 = x^c_3 = x^c_j = x^c_j \quad [2.8.8]$$

A duração dos verdes reais das diversas fases é determinada através da expressão 2.8.9:

$$G_i = Ge_i - I_i + L_i \quad [2.8.9]$$

Onde,  $G_i$ : duração real do verde,  $Ge_i$  : verde efetivo,  $I_i$  : período entreverdes e  $L_i$  : tempo total perdido na fase.

## Observações sobre o tempo de ciclo

Por razões de segurança e psicológicas (comportamento dos usuários), recomenda-se:  $30s \leq C \leq 120seg$ . Deve-se arredondar o valor de  $C$  obtido com a expressão de Webster para cima para um número múltiplo de 5.

Também recomenda-se que  $G_i \geq 10$  seg, quando não for crítica a travessia de pedestres. Caso contrário à expressão 2.8.10

$$G_i^{\min} = \frac{L}{V_p} + T_s \quad [2.8.10]$$

Onde, L: largura da via a ser cruzada em m,  $V_p$ : velocidade de caminhada dos pedestres em m/s e T: intervalo estabelecido à luz da segurança e da capacidade necessária na travessia.

Nas aplicações práticas adotar:  $V_p=1,4$  m/s e  $T_s = 2-5$  seg em função da quantidade de pedestres (2 seg no caso de poucos pedestres e 5 seg quando se trata de grandes concentrações de pedestres).

O verde ou vermelho piscante do semáforo de pedestres deve ser igual a  $L/V_p$ .

Como no mundo real os fluxos de veículos variam ao longo do tempo, o ideal é utilizar controladores de semáforos atuados pelo tráfego, os quais permitem variar a duração do ciclo e dos tempos de verde em função das flutuações momentâneas dos fluxos de veículos, que são detectadas por dispositivos especiais usualmente colocados sob o pavimento das vias. Contudo, como os controladores atuados e os detectores custam muito caro, a utilização de controladores que permitem variar o ciclo e a repartição de verde ao longo do dia de acordo com programação prévia, e que são muito mais baratos, têm desempenho plenamente satisfatório.

O procedimento a ser adotado em cada período com ciclo, verde e vermelho constantes é o seguinte:

1. Calcular o ciclo ótimo considerando os volumes médios horários:  $C_o^m$ .
2. Determinar o ciclo ótimo para os volumes dos horários de pico dentro do período:  
 $C_o^p$
3. Adotar o maior dos 2 valores:  $C = \text{maior} (C_o^m, 0,75 \cdot C_o^p)$

3. A repartição do verde efetivo deve ser feita com base nos valores dos volumes referentes aos horários de pico.

Esse método empírico encontra respaldo no gráfico da figura 2.23 apresentado por Webster [1958] e comprovado por Françaço [1990], que mostra que pequenas variações no tempo de ciclo não afetam significativamente a demora média dos veículos no semáforo, sobretudo se a variação for para mais. Em termos numéricos: valores do ciclo entre  $0,75 \cdot C_0$  -  $1,50 \cdot C_0$  conduzem à, no máximo, 10 a 20% de acréscimo da demora mínima ( $d = 1,10$  a  $1,20$   $d_{\min}$ ).

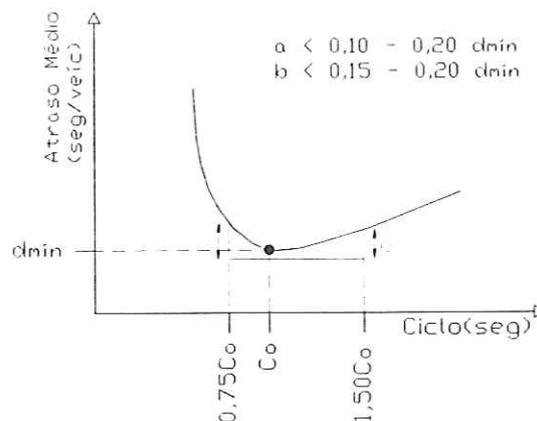


Figura 2.23 - Atraso médio num semáforo em função da duração do ciclo.

### Ciclo ótimo com fase exclusiva para pedestres

Quando um semáforo opera com uma fase exclusiva para a travessia de pedestres, havendo paralisação total do fluxo de veículos mediante o vermelho geral, recomenda-se a seguinte expressão para determinação do ciclo ótimo (duração do ciclo que minimiza o tempo médio de espera dos veículos na interseção) é dado pela expressão 2.8.11.

$$C_0 = \frac{Gp + 1,5 \cdot L + 5}{1 - Y} \quad [2.8.11]$$

Onde,  $C_o$ : duração do ciclo ótimo em s,  $L$ : tempo total perdido no ciclo em s,  $G_p$  a duração da fase verde destinada a travessia de pedestres em s,  $Y = \sum y_c^i$ : somatória das taxas de ocupação críticas das fases veiculares críticas.

A duração da fase destinada à travessia de pedestres, como visto, é dada pela expressão 2.8.12.

$$G_p = \frac{L}{V_p} + Ts \quad [2.8.12]$$

Onde,  $L$ : largura da via mais larga a ser cruzada em m,  $V_p$ : velocidade de caminhada dos pedestres em m/s e  $T$ : intervalo estabelecido à luz da segurança e da capacidade necessária na travessia. Nas aplicações práticas adotar:  $V_p=1,4$  m/s e  $Ts = 2-5$  seg em função da quantidade de pedestres (2 seg no caso de poucos pedestres e 5 seg quando se trata de grandes concentrações de pedestres).

O vermelho piscante do semáforo de pedestres deve ser igual a  $L/V_p$ .

Nesse caso, o verde efetivo do ciclo a ser distribuído entre as fases veiculares é igual à expressão 2.8.13.

$$G_e = C - L - G_p \quad [2.8.13]$$

## 2.9. Parâmetros de desempenho em semáforos isolados

Diversos parâmetros têm sido utilizados na avaliação do desempenho do tráfego em interseções semaforizadas. Os principais são: tempo parado - tempo que os veículos ficam parados, atraso - tempo perdido pelos veículos (diferença entre o tempo efetivamente gasto para passar, incluindo desaceleração, parada e aceleração, e o tempo teórico se a velocidade fosse constante), número de paradas, tamanho médio das filas de veículos, tamanho máximo das filas, proporção de veículos que param pelo menos uma vez, consumo de combustível, emissão de poluentes, etc.

A seguir são apresentadas algumas expressões para o cálculo dos principais parâmetros de acordo com Webster [1958].

### Atraso médio

O atraso total médio experimentado pelos veículos (acréscimo de tempo devido à presença do semáforo em relação à situação sem semáforo) é dado pela expressão 2.9.1:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{C}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad [2.9.1]$$

Onde, d: atraso médio em seg/veíc, C: ciclo em seg,  $\lambda = Ge/C$ : fração do verde efetivo no ciclo, x: índice de congestionamento e q: volume de tráfego em veíc/seg.

Considerando que o terceiro termo da fórmula anterior representa na ordem de 5 a 15% da soma dos dois primeiros, a seguinte expressão simplificada pode ser utilizada como alternativa para o cálculo do atraso médio é dado pela relação 2.9.2.

$$d = 0,9 \left[ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \quad [2.9.2]$$

### Tamanho da fila

O tamanho médio da fila crítica (no final do vermelho ou início do verde) é calculado pela expressão 2.9.3:

$$n = \text{Maior} \left[ q \cdot \left( \frac{Re}{2} + d \right), q \cdot Re \right] \quad [2.9.3]$$

Onde, n: tamanho médio da fila crítica em veíc, q, Re e d já definidos anteriormente.

O tamanho da fila que é excedido em 5% e 1% das vezes – o que pode ter interesse em razão do bloqueio que as filas podem provocar em interseções próximas ou saídas de garagens - são fornecidos na tabela 2.1 em função de  $m = q \cdot C$  (número médio de veículos que chegam num ciclo),  $x$  e  $\lambda$ , que já foram definidos anteriormente.

Tabela 2.1 – Tamanho da fila crítica.

x	m		2.5	5.0	10.0	20.0	40.0	x	m		2.5	5.0	10.0	20.0	40.0
	λ	λ													
0.3	0.4	λ	5	7	12	20	34	0.3	0.4	λ	6	9	14	23	
	0.6	λ	4	5	9	15	24		0.6	λ	5	6	11	17	
	0.8	λ	3	4	6	9	15		0.8	λ	3	5	7	12	
0.5	0.2	λ	6	7	15	26	47	0.5	0.2	λ	7	9	17	29	
	0.4	λ	5	7	12	20	35		0.4	λ	6	9	14	23	
	0.6	λ	4	5	9	15	24		0.6	λ	5	7	11	17	
0.7	0.2	λ	7	9	15	25	44	0.7	0.2	λ	9	12	17	28	
	0.4	λ	6	8	12	20	34		0.4	λ	9	9	15	23	
	0.6	λ	5	7	9	15	25		0.6	λ	8	9	12	18	
0.8	0.2	λ	5	5	7	9	15	0.8	0.2	λ	7	7	8	12	
	0.4	λ	9	12	16	25	46		0.4	λ	13	15	19	28	
	0.6	λ	8	11	14	21	35		0.6	λ	12	13	17	24	
0.9	0.2	λ	8	9	11	16	25	0.9	0.2	λ	12	13	14	20	
	0.4	λ	7	8	9	11	16		0.4	λ	11	12	12	15	
	0.6	λ	19	18	22	30	49		0.6	λ	29	25	29	38	
0.95	0.2	λ	19	17	20	23	39	0.95	0.2	λ	28	24	27	33	
	0.4	λ	19	16	17	21	34		0.4	λ	27	24	26	28	
	0.6	λ	18	15	15	18	22		0.6	λ	27	23	24	25	
0.975	0.2	λ	36	28	33	40	55	0.975	0.2	λ	40	36	38	47	
	0.4	λ	35	27	30	35	47		0.4	λ	40	34	37	44	
	0.6	λ	34	26	25	34	39		0.6	λ	40	32	30	42	
0.995	0.2	λ	34	25	27	27	32	0.995	0.2	λ	39	32	34	36	
	0.4	λ	74	63	65	62	84		0.4	λ	82	70	79	69	
	0.6	λ	74	57	65	59	75		0.6	λ	83	66	75	65	
Tamanho da fila superado em 5% dos ciclos								Tamanho da fila superado em 1% dos ciclos							

Número médio de paradas

O número médio de paradas por veículo no semáforo é dado pelas expressões 2.9.4 e 2.9.5.

$$p = \frac{n}{q \cdot C \cdot (1 - q / s)} \quad \text{se } n < (s - q) \cdot Ge \quad [2.9.4]$$

$$p = \frac{n}{q \cdot C} + \frac{Ge}{C} \quad \text{se } n > (s - q) \cdot Ge \quad [2.9.5]$$

Onde,  $p$ : número médio de paradas por veículo em paradas/veíc,  $n$ ,  $q$ ,  $C$ ,  $s$  e  $G_e$  já definidos anteriormente.

### Proporção de veículos que param pelo menos uma vez

A proporção de veículos que param pelo menos uma vez no semáforo é dado pela expressão 2.9.6

$$z = \frac{1 - \lambda}{1 + y} \quad [2.9.6]$$

Onde,  $z$ : proporção dos veículos que param pelo menos uma vez,  $\lambda$  e  $y$  já definidos anteriormente.

### Proporção de ciclos saturados

A proporção de ciclos saturados:  $w$  (ciclos nos quais pelo menos um veículo da fila não pode ser atendido e, portanto, sobram veículos para o próximo verde), é dado na figura 2.24 em função de  $m$  e  $x$ , que já foram definidos anteriormente.

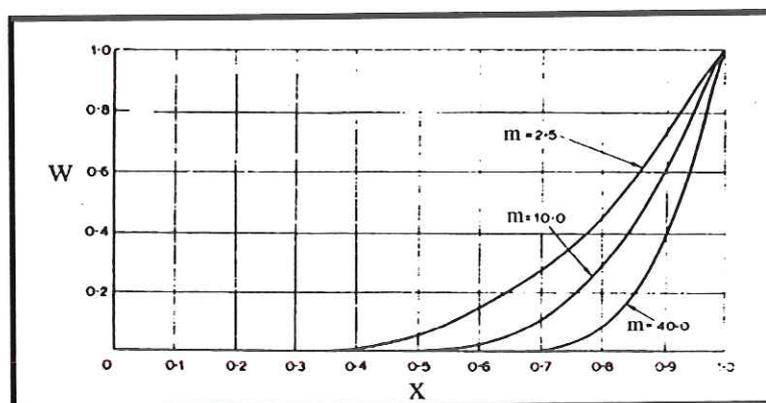


Figura 2.24 - Proporção de ciclos saturados.

## 2.10. Observações Complementares

### Nível de serviço para cruzamentos semaforizados

O parâmetro proposto pelo TRB [2000] para caracterizar a qualidade da operação (nível de serviço) nos cruzamentos semaforizados é o atraso médio experimentado pelos veículos. A classificação preconizada é mostrada na tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Nível de serviço x tempo médio parado**

<b>Nível de serviço (NS)</b>	<b>Qualidade da operação</b>	<b>Valores do atraso médio (seg)</b>
A	Ótima	$d \leq 10,0$
B	Boa	$10,0 < d \leq 20,0$
C	Regular	$20,0 < d \leq 35,0$
D	Ruim	$35,0 < d \leq 55,0$
E	Muito ruim	$55,0 < d \leq 80,0$
F	Péssima (inaceitável)	$d > 80,0$

### **Repartição do verde**

A divisão do verde efetivo proporcionalmente às taxas de ocupação, como visto, conduz ao menor atraso global dos veículos no cruzamento e na igualdade dos índices de congestionamento das faixas críticas das diversas fases. Isso não implica, contudo, que os valores médios do atraso resultem iguais nas faixas críticas.

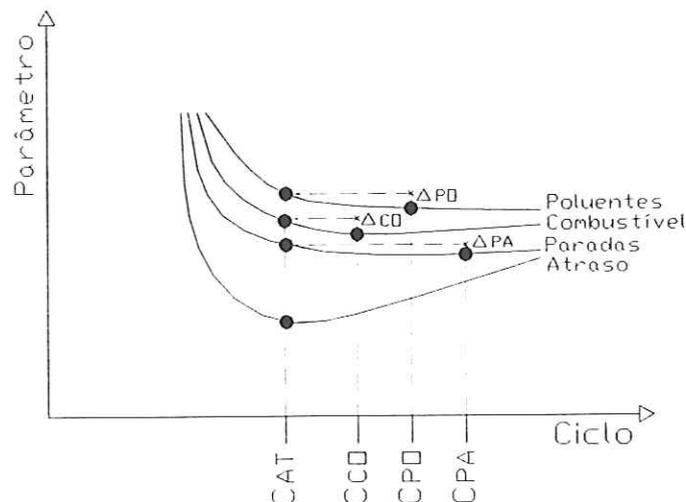
O HCM-2000 recomenda que o verde efetivo deve ser distribuído de modo a que os atrasos médios nas faixas críticas resultem próximos, a que os níveis de serviço das faixas críticas de cada fase sejam os mesmos. Para se conseguir isso são necessárias algumas iterações no processo de cálculo dos tempos de verde.

### **Generalização do conceito de ciclo ótimo**

Como visto, a metodologia de Webster [1958] propõe uma expressão para o ciclo que minimiza o atraso médio dos veículos no cruzamento, visando o conforto (comodidade) dos passageiros.

Na realidade, é necessário contemplar também outros aspectos na escolha da duração do ciclo, como o número de paradas (também ligado ao conforto dos passageiros), o consumo de combustível (ligado à conservação de energia), a emissão de poluentes (ligado à preservação do meio ambiente), etc.

Diversos estudos tratando do assunto foram desenvolvidos, como, por exemplo, os trabalhos de Courage e Parapar [1975] e Bauer [1975]. Na figura 2.25 são mostradas curvas típicas do comportamento dos parâmetros atraso, número de paradas, consumo de combustível e emissão de poluentes em função da duração do ciclo.



**Figura 2.25 – Variação típica dos principais parâmetros em função do ciclo.**

As seguintes conclusões relevantes podem ser depreendidas com base na figura 2.25:

- O tempo médio parado e o atraso diminuem com o aumento do ciclo, passam por um mínimo e depois aumentam. O valor do ciclo correspondente ao mínimo valor do tempo parado (ciclo ótimo com relação ao tempo parado –  $C_{TP}$ ) é um pouco menor do que o ciclo ótimo relativo ao atraso ( $C_{AT}$ ).
- O número de paradas diminui com o aumento do ciclo e depois permanece constante. O valor do ciclo a partir do qual o número de paradas permanece constante e igual ao mínimo ( $C_{PA}$ ) é maior do que o ciclo ótimo correspondente ao atraso.
- Como o consumo de combustível e a emissão de poluentes são função do tempo parado e do número de paradas (devido à aceleração e à desaceleração), as durações do ciclo correspondentes aos mínimos valores desses parâmetros estão

entre os valores ótimos relativos ao tempo parado e o número de paradas. Os valores ótimos correspondentes ao consumo de combustível e a emissão de poluentes são referidos, respectivamente, por  $C_{CO}$  e  $C_{PO}$ .

- O ciclo ideal, portanto, está entre o ciclo que minimiza o tempo parado e o ciclo a partir do qual o número de paradas é constante e igual ao mínimo. Isso corresponderia a algo como minimizar um parâmetro definido em função do atraso e do número de paradas, que, inclusive, já é utilizado em alguns simuladores de tráfego. A expressão 2.10.1 a seguir expressa matematicamente a idéia:

$$I = a + K \cdot p \quad [2.10.1]$$

Onde, I: Índice de desempenho a ser minimizado, a: atraso médio, K: fator de penalidade associado a cada parada expresso em unidades de tempo e a: número médio de paradas.

- A utilização do ciclo que minimiza o atraso não leva a grandes diferenças nos valores dos outros parâmetros em relação aos seus ciclos ótimos. Assim, a utilização do ciclo ótimo fornecido pela expressão de Webster é satisfatória na prática.

## 2.11. Coordenação de semáforos

Quando existem semáforos próximos, até cerca de 500 a 800 m na prática, é sempre benéfica à coordenação dos mesmos, para reduzir o atraso, o número de paradas, o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Outros benefícios também obtidos com a coordenação de semáforos próximos são: maior controle das velocidades desenvolvidas, menores filas de veículos e maior capacidade dos cruzamentos.

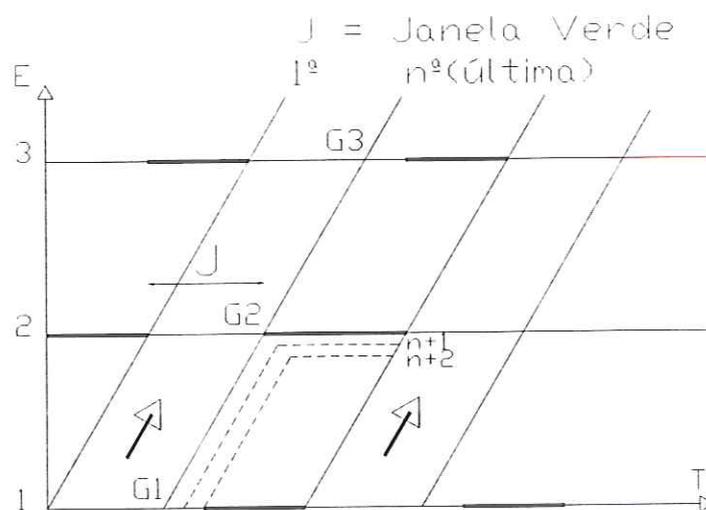
### 2.11.1 Coordenação de semáforos numa via de sentido único

O tipo mais comum de coordenação de semáforos numa via de sentido único é o **sistema progressivo**, também denominado de **onda verde**. Esse sistema, em princípio, consiste em defasar os inícios dos períodos de verde dos semáforos consecutivos de um intervalo igual ao tempo gasto pelos veículos no percurso entre os semáforos. Dessa forma, os verdes dos semáforos que se seguem ao primeiro se iniciam no momento que o primeiro veículo do pelotão chega ao cruzamento, permitindo, assim, que todos os veículos do pelotão passem sem parar.

O valor da defasagem entre os inícios de verde de semáforos consecutivos (*offset*) é dado, portanto, pela expressão 2.11.1.

$$T_{ij} = \frac{D_{ij}}{V_{ij}}, \text{ isto é: } T_{12} = \frac{D_{12}}{V_{12}}, T_{23} = \frac{D_{23}}{V_{23}}, T_{34} = \frac{D_{34}}{V_{34}}, \dots\dots\dots[2.11.1]$$

Onde,  $T_{ij}$ : tempo de percurso entre os semáforos  $i$  e  $j$  em s,  $D_{ij}$ : distância entre os semáforos  $i$  e  $j$  em m e  $V_{ij}$ : velocidade no trecho entre os semáforos  $i$  e  $j$  em m/s.



A figura 2.26 ilustra o funcionamento do sistema de onda verde.

Para que o sistema de onda verde funcione é necessário que todos os semáforos tenham o mesmo tempo de ciclo, para que a sincronização se repita ao longo do tempo. Isso exige que os controladores dos semáforos que compõem o sistema sejam conectados por cabo, ou os seus relógios internos acertados periodicamente através de sinais eletromagnéticos.

Na realidade, a repetição da sincronização no tempo também é obtida quando se utiliza metade ou um quarto do tempo de ciclo em alguns semáforos – isso, no entanto, reduz muito a eficiência do sistema.

O intervalo de tempo que proporciona o movimento sem paradas ao longo do conjunto de semáforos coordenados é denominado de **Janela Verde** ou **Banda Verde**. A princípio, a janela verde é igual ao menor tempo de verde dos semáforos que fazem parte do sistema, como indicado na figura 2.26.

A eficiência do sistema de onda verde é medido pela expressão 2.11.2:

$$E = 100 \cdot \frac{J}{C} \quad [2.11.2]$$

Onde, E: eficiência do sistema de onda verde em %, J: largura da janela verde em s e C: tempo de ciclo em s.

A largura da janela / banda verde (J) define a capacidade do sistema de onda verde, que é calculada pela expressão 2.11.3 e 2.11.4:

$$Cc = \frac{J}{h} \quad [2.11.3]$$

$$Ch = \frac{3600}{C} \cdot Cc = \frac{3600 \cdot L}{C \cdot h} \quad [2.11.4]$$

Onde,  $C_c$ : capacidade por ciclo em veíc/ciclo,  $L$ : largura da janela verde em s,  $h$ : intervalo (headway) entre os veículos em s (usualmente adotado igual a 2s),  $Ch$ : capacidade horária em veíc/h e  $C$ : ciclo em s.

Nas análises teóricas feitas não foi levado em conta o tempo perdido na partida e aceleração do pelotão de veículos no semáforo 1 e nem o tempo utilizado para passagem no amarelo. Do ponto de vista prático, considerando que sistema é projetado considerando a velocidade média de percurso e, também, o fato dos motoristas efetuarem automaticamente pequenos ajustes na velocidade para evitar ter que parar nos semáforos, o tempo perdido na partida e aceleração do pelotão pode ser desconsiderado. Por seu lado, o tempo amarelo deve ser adicionado ao verde, uma vez que ele é usado pelos veículos para atravessar.

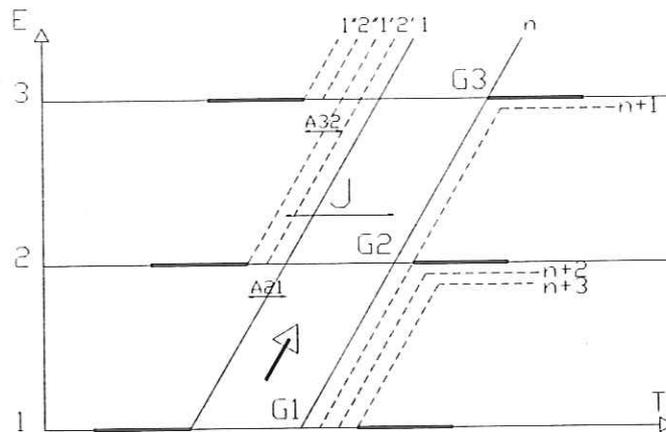
Quando existem veículos parados nos semáforos a jusante no momento que o pelotão se aproxima - em razão dos veículos das vias secundárias que entram na via principal, dos veículos da via principal que não puderam passar no verde e de veículos provenientes de estacionamentos e garagens, pode-se antecipar o início dos verdes, para dar tempo desses veículos se movimentarem antes da chegada do pelotão. Esse procedimento é denominado de esvaziamento de caixa.

Teoricamente, o valor da antecipação do início de verde pode ser calculado pela expressão 2.11.5:

$$A = l + q.h \quad [2.11.5]$$

Onde,  $A$ : antecipação do verde em s,  $l$ : tempo perdido na partida e aceleração da fila em s (usualmente adotado igual a 2s),  $q$ : número de veículos na fila por faixa,  $h$ : intervalo (headway) entre os veículos em s (usualmente adotado igual a 2s).

A antecipação dos inícios dos verdes, leva a uma redução da eficiência do sistema, pois há redução da largura da janela verde, como ilustrado na figura 2.27.



**Figura 2.27 – Antecipação dos inícios dos verdes.**

Vale observar, que a antecipação dos verdes proporciona os benefícios da onda verde também para os veículos que estavam parados nos semáforos intermediários, como pode ser verificado na figura 2.27. Por exemplo, o 1º e o 2º veículos parados no semáforo 2 também passam pelos outros semáforos situados a jusante sem parar, e assim por diante.

O sistema de coordenação em que os verdes vão aparecendo à medida que o pelotão de veículos avança, é denominado de **sistema progressivo**. Esse sistema apresenta grande eficiência quando o fluxo de veículos não é grande.

Um fator importante para o sucesso do sistema de onda verde é a existência de sinalização indicativa da velocidade a ser mantida para que os usuários possam se beneficiar do sistema.

Quando o fluxo de veículos cresce, as filas residuais nos semáforos aumentam, obrigando ao emprego de maiores valores dos intervalos de antecipação dos inícios de verde, até o caso em que os períodos de verde de todos os semáforos devem se iniciar no mesmo instante - **sistema simultâneo**. Evidentemente que a eficiência do sistema de onda verde, nesse caso, é menor do que no sistema progressivo.

Em condições de tráfego congestionado, pode ser necessário operar o sistema de onda verde como um **sistema reverso**, ou seja, primeiro abre o verde do último semáforo para esvaziar a última quadra, depois do anterior e assim por diante, para poder dar vazão ao fluxo da via principal congestionada. Este sistema poderia ser denominado de onda vermelha. Nesse caso, o conceito de eficiência do sistema é alterado, pois o objetivo não é mais fazer com que os veículos passem sem parar nos próximos semáforos, mas sim que o tráfego possa pelo menos fluir, ainda que com uma velocidade média bastante baixa, ou seja, em condições extremamente precárias. Também importante nesses casos é evitar a obstrução dos cruzamentos, impedindo a passagem dos veículos das vias secundárias.

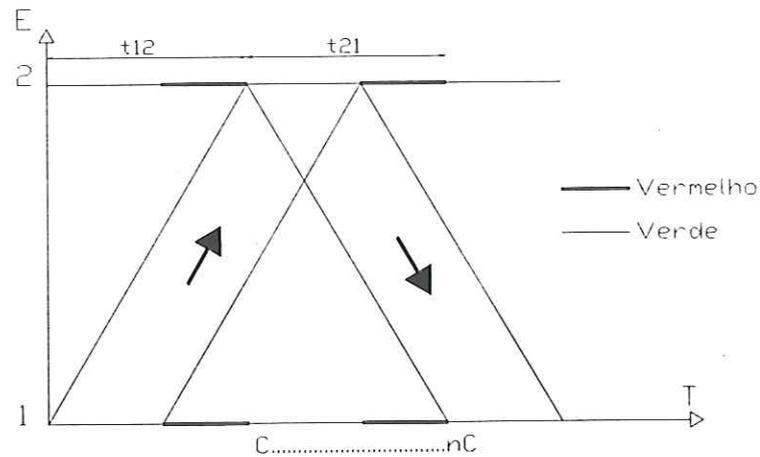
### 2.11.2 Coordenação de semáforos numa via de duplo sentido

No caso de vias de mão dupla, somente condições bastante especiais permitem obter a eficiência integral do sistema de onda verde nos dois sentidos de fluxo.

Essas condições especiais se traduzem pela observância na expressão 2.11.2.1 colocada a seguir, estabelecida com base no gráfico da figura 2.28.

$$C = n \cdot \frac{D}{V} \quad [2.11.2.1]$$

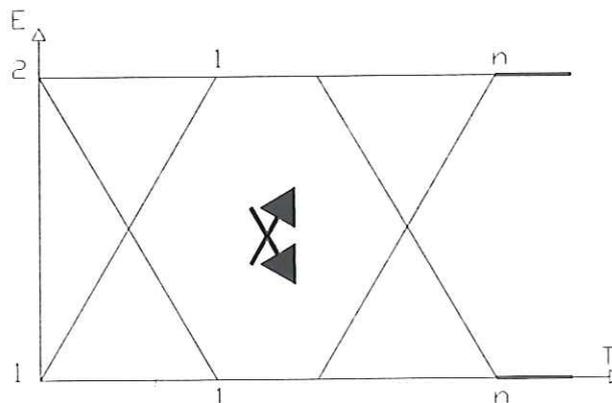
Onde, C: duração do ciclo em s, D: distância entre os semáforos em m, V: velocidade de circulação em m/s, n: número inteiro.



**Figura 2.28 – Situação ótima para coordenação em vias de duplo sentido. Roess *et al* [1998]**

Considerando, por exemplo,  $n=2$ ,  $D=200m$ ,  $V=36km/h=10m/s$ , resulta  $C=40s$ . Se o verde efetivo na via for igual à 25s, resultam: largura da janela verde por sentido:  $L=25s$ , eficiência do sistema de onda verde por sentido:  $E=62,5\%$  e capacidade horária por sentido:  $Ch=1170veíc/h$ .

Quando existem dois semáforos bastante próximos numa via de duplo sentido, um sistema de coordenação relativamente eficiente para os dois sentidos é a abertura simultânea dos períodos de verde, como ilustrado na figura 2. 29.



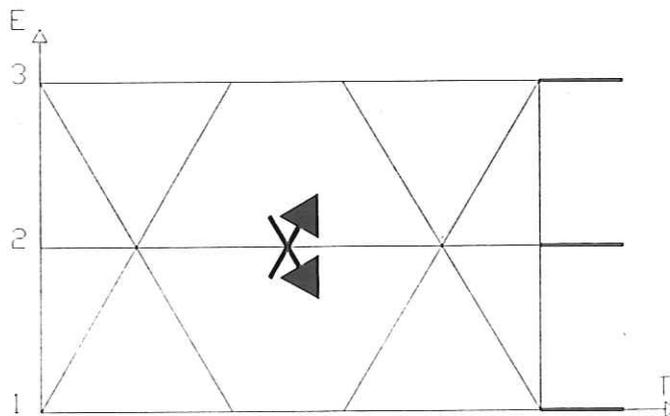
**Figura 2.29 – Coordenação com abertura simultânea dos verdes para dois semáforos. Roess *et al* [1998]**

Esse raciocínio também vale para o caso de mais de dois semáforos, conforme mostrado na figura 2.30, sendo a eficiência do sistema por sentido dado pela expressão 2.11.2.2.

$$E = \left[ \frac{Ge}{C} - \frac{(N-1)D}{V.C} \right] 100 \quad [2.11.2.2]$$

Onde, E: eficiência do sistema por sentido em %, Ge: verde efetivo para a via em s, N: número de semáforos coordenados, D: distância entre os semáforos em m, V: velocidade média de percurso em m/s, C; duração do ciclo em s.

Admitindo, por exemplo, Ge=25s, N=2, D=100m, V=54km/h=15m/s, C=40s, resulta: E= 45,83% por sentido.



**Figura 2.30 – Coordenação com abertura simultânea dos verdes para tres semáforos. Fonte: Roess *et al* [1998]**

A eficiência relativamente do sistema de abertura simultânea de semáforos próximos em vias de duplo sentido sugere, quando aplicável, o emprego das duas seguintes formas de coordenação: progressão alternada e progressão alternada dupla.

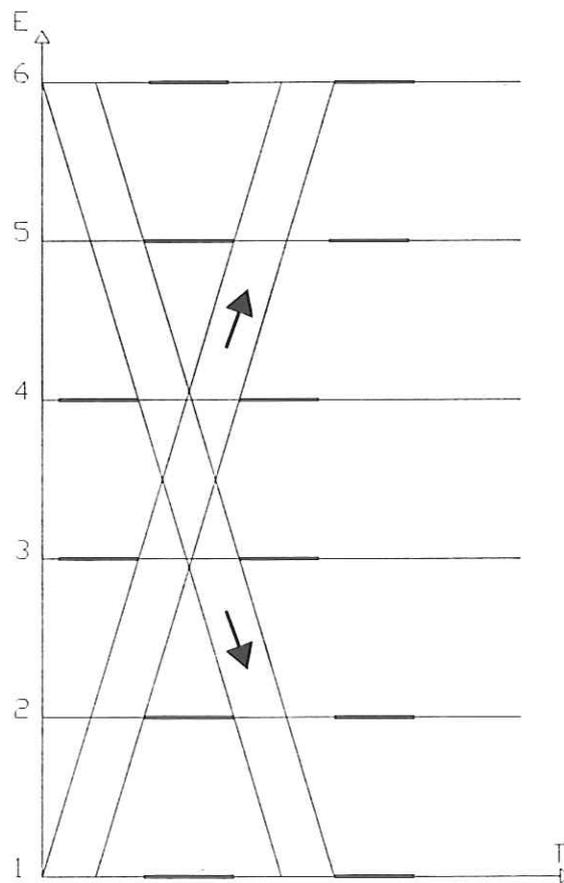
No caso da progressão alternada, conforme mostrado na figura 2.31, as seguintes condições devem ser verificadas: distância entre os semáforos iguais e  $C=2T$  (onde C é o ciclo e T o tempo de percurso entre dois semáforos consecutivos –  $T=D/V$ , onde D é a distância entre os semáforos e V a velocidade de percurso).

Neste caso, os valores dos parâmetros que caracterizam a coordenação são dados nas expressões 2.11.2.3 e 2.11.2.4.

$$L = Ge \quad [2.11.2.3]$$

$$E = \frac{Ge}{C} \cdot 100 \quad [2.11.2.4]$$

Onde, L: largura da janela verde, Ge: verde efetivo para a via em s, E: eficiência do sistema por sentido em %, C: duração do ciclo em s.



**Figura 2.31 – Coordenação com progressão alternada.**  
Fonte: Roess *et al* [1998].

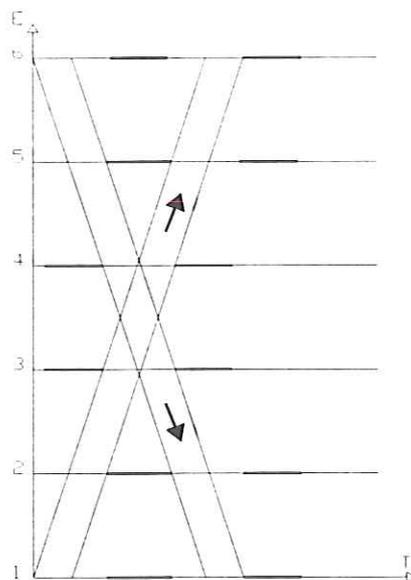
No sistema de dupla progressão alternada, conforme pode ser visto na figura 2.32, as seguintes condições devem ser verificadas: distância entre os semáforos iguais e  $C=4T$  (onde  $C$  é o ciclo e  $T$  o tempo de percurso entre dois semáforos consecutivos –  $T=D/V$ , onde  $d$  é a distância entre os semáforos e  $V$  a velocidade de percurso).

Neste caso, os valores dos parâmetros que caracterizam a coordenação são dados pelas expressões 2.11.2.5 e 2.11.2.6.

$$L = Ge - \frac{D}{V} \quad [2.11.2.5]$$

$$E = \left( \frac{Ge - \frac{D}{V}}{C} \right) 100 \quad [2.11.2.6]$$

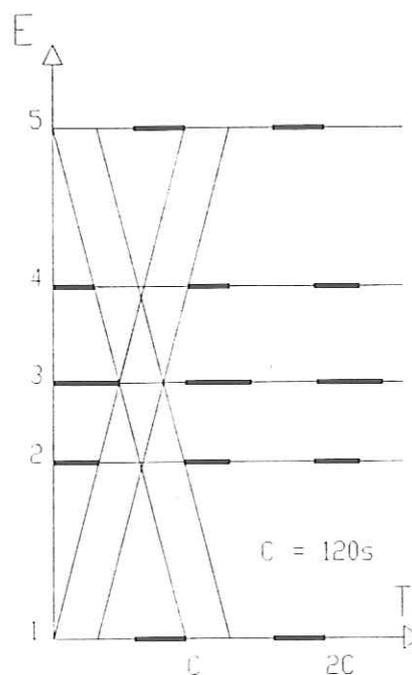
Onde,  $L$ : largura da janela verde,  $Ge$ : verde efetivo para a via em s,  $D$ : distância entre dois semáforos consecutivos,  $V$ : velocidade de percurso,  $E$ : eficiência do sistema por sentido em %,  $C$ : duração do ciclo em s.



**Figura 2.32 – Coordenação com progressão alternada dupla.**  
Fonte: Roess *et al* [1998].

Como as condições particulares anteriormente referidas quase nunca se verificam, a coordenação de semáforos em vias de mão dupla tentando beneficiar os dois sentidos de fluxo não apresenta, em geral, ganhos satisfatórios. Nesses casos, a princípio, o objetivo é obter janelas verdes com larguras proporcionais ao fluxo de veículos em cada sentido. A obtenção da melhor solução (aquela em que a soma das larguras da banda verde por sentido é máxima e as larguras são proporcionais aos fluxos por sentido) pode ser obtida de três modos: por tentativa e erro, seguindo técnicas mais ou menos complexas ou utilizando programas de computadores (existem no mercado diversos softwares desenvolvidos para se obter a programação semafórica ótima para o caso de vias com duplo sentido de tráfego). Nos casos mais simples, o processo de tentativa e erro se mostra bastante eficiente. Nos casos mais complexos é indicado utilizar programas de computadores.

Na figura 2.33 é ilustrada a solução ótima encontrada para a coordenação de semáforos numa via de mão dupla.



**Figura 2.33 – Solução ótima de coordenação de semáforos num trecho de via de duplo sentido. Fonte: Roess *et al* [1998].**

Na busca do sincronismo ideal nos dois sentidos também é possível se empregar metade dos tempos de ciclo em alguns semáforos, pois isso não prejudica a repetição do sincronismo ao longo do tempo.

Para obter ganhos maiores na coordenação de semáforos em vias de mão dupla, um procedimento bastante utilizado é variar o sentido da onda verde ao longo do dia, beneficiando o maior fluxo no período. Assim, por exemplo, de manhã o sincronismo seria no sentido Bairro - Centro e à tarde no sentido Centro – Bairro. Outra possibilidade é estabelecer a onda verde em trechos alternados, beneficiando um sentido em cada trecho. Ainda uma outra possibilidade é promover a abertura simultânea de semáforos próximos (coordenação com sistema alternado duplo), como ilustrado na figura 2.32.

### 2.11.3 Coordenação de semáforos numa rede com vias de sentido único

A figura 2.34 mostra uma rede simples de semáforos.

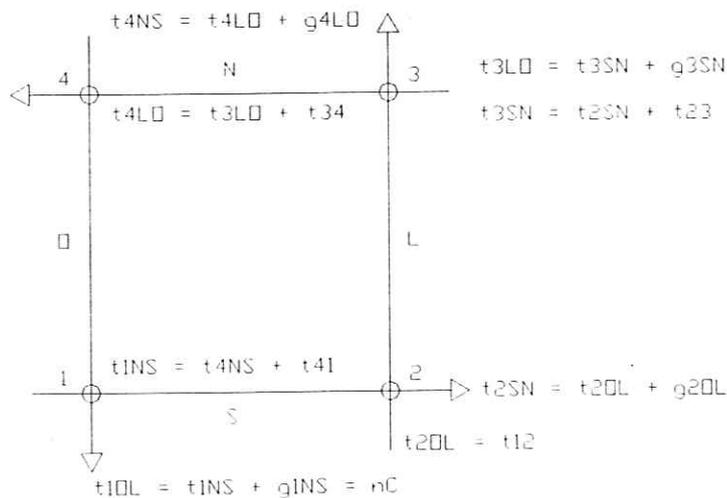


Figura 2.34 – Rede simples de semáforos. Roess *et al* [1998].

Para que a coordenação dos semáforos na rede seja ótima - todos os veículos que seguem em frente chegam ao semáforo seguinte no início do verde, é necessário que exista a seguinte relação entre os diversos parâmetros na expressão 2.11.3.1.

$$t_{12} + g_{2OL} + t_{23} + g_{3SN} + t_{34} + g_{4LO} + t_{41} + g_{1NS} = n.C \quad [2.11.3.1]$$

Onde,  $t_{12}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{34}$ ,  $t_{41}$ : tempos de percurso entre os diversos pares de semáforos em  $s$ ,  $g_{2WE}$ ,  $g_{3SN}$ ,  $g_{4EW}$ ,  $g_{1NS}$ : tempos de verde efetivo nos diversos semáforos no sentido indicado em  $s$ ,  $C$ : duração do ciclo em  $s$ ,  $n$ : número inteiro.

Portanto, para que haja coordenação nas quatro ligações (rede fechada), é necessário que a equação anterior seja verificada. Contudo, qualquer que sejam os valores dos parâmetros é sempre possível operar com coordenação ótima em três das quatro ligações (rede aberta).

Essas conclusões podem ser generalizadas para redes maiores, isto é: a coordenação de ligações que não fecham a rede é sempre possível, mas a coordenação de qualquer outra ligação que leva ao fechamento da rede está sujeita à restrição, expressa através de equação similar a estabelecida para a rede simples analisada. A figura 2.35 ilustra este fato. A coordenação dos semáforos nas vias mostradas com linha contínua é sempre possível; a inclusão de coordenação em qualquer das outras vias mostradas com linha tracejada está sujeita a verificação de equação similar à desenvolvida para a rede simples analisada.

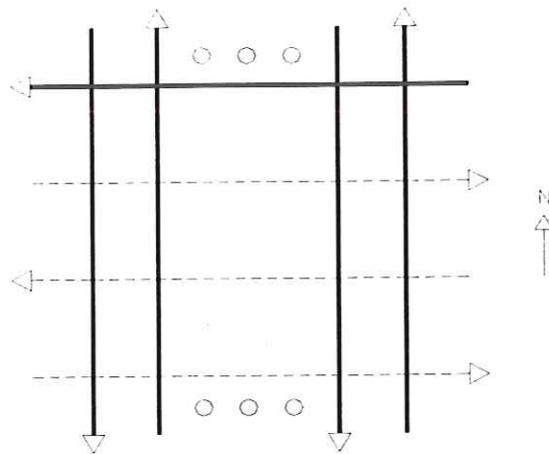


Figura 2.35 – Rede fechada e rede aberta. Fonte: Roess *et al* [1998].

Redes de semáforos próximos são comuns nas regiões centrais de grande movimento das cidades maiores.

### **Simulação e otimização da operação de semáforos coordenados**

Muitos programas de computadores têm sido desenvolvidos para a análise da operação de semáforos (simulação e otimização).

Alguns softwares disponíveis no mercado são: TRANSYT, SIGOP, NETSIM, INTEGRATION, SCOOT, etc.

Desses, o mais utilizado tem sido o TRANSYT, por ser um dos mais eficientes métodos de geração de planos de coordenação de semáforos de tempo fixo. A primeira versão foi lançada em 1967 em Glasgow na Escócia e, de tempos em tempos, novas versões melhoradas são lançadas no mercado.

### **Breve histórico da coordenação de semáforos**

Basicamente, pode-se identificar três gerações no que concerne aos sistemas de coordenação de semáforos.

Nos sistemas referidos como de 1<sup>a</sup>. geração, a elaboração da programação operacional é feita em separado (*off-line*). Os volumes de tráfego obtidos em contagens manuais, ou através de detectores, são utilizados para alimentar o programa de otimização, o qual define a duração das fases e as defasagens entre os inícios de verde. Com base nos resultados obtidos para os diversos períodos do dia, implementa-se o plano operacional que é mantido fixo durante os diversos períodos.

Nos sistemas de 2<sup>a</sup> geração, os detectores de veículos são conectados a um computador central, que registra automaticamente os volumes de tráfego. Após um determinado intervalo de tempo (normalmente 15 minutos), o programa de otimização é rodado e o plano obtido implementado através do sistema de comunicação entre o

computador central e os controladores. Apesar da agilização do processo de coleta e processamento dos dados, a programação contínua sendo realizada “off-line”.

Nos sistemas referidos como de 3<sup>a</sup>. geração, os detectores de veículos e os controladores dos semáforos são interligados a um computador central, que roda continuamente o programa de otimização e implementa imediatamente as programações via controladores (programação “on-line”).

O TRRL (Transport and Road Research Laboratory) da Inglaterra desenvolveu testes comparativos entre várias técnicas e programas, e os resultados obtidos mostraram que os sistemas que empregam planos de tempo fixo baseados em dados históricos tiveram um desempenho tão bom quanto às técnicas de controle *on line*, com a vantagem de apresentarem custos bem menores.

## 2.12. Estimativa do atraso médio em todas as situações

A seguir é descrita uma metodologia para a estimativa do atraso médio experimentado pelos veículos nos semáforos em função do tipo de chegada, tipo de controlador, etc., baseada no TRB [2000].

### Tipos de chegada

São considerados 6 tipos diferentes de chegadas dos veículos nos semáforos, conforme mostrado na tabela 2.3.

O tipo de chegada deve sempre que possível ser observado no campo. Quando não se dispõe desse dado, um parâmetro que pode ser utilizado para caracterizar o tipo de chegada dos veículos num semáforo é a taxa de agrupamento, conforme se pode observar na tabela 2.3, definida pela expressão 2.12.1.

$$R_p = P / \lambda$$

[2.12.1]

Onde,  $R_p$ : taxa de agrupamento,  $P$ : proporção de veículos que chegam no semáforo durante o verde efetivo (grandeza que pode ser estimada com base na análise do diagrama espaço-tempo do movimento dos veículos entre os semáforos, ou avaliada no campo) e  $\lambda$ : relação verde efetivo/ciclo.

**Tabela 2.3 - Características dos tipos de chegada dos veículos. Fonte: TRB [2000].**

Tipo de chegada	Valores de $R_p^*$	Características da chegada
1	$R_p \leq 0,50$ (0,333)	Pelotão denso com mais de 80% dos veículos chegando no início do vermelho. Qualidade da progressão: péssima
2	$0,50 < R_p \leq 0,85$ (0,667)	Pelotão moderadamente denso chegando no meio do vermelho, ou pelotão disperso com 40 a 80% dos veículos chegando durante o vermelho. Qualidade da progressão: desfavorável.
3	$0,85 < R_p \leq 1,15$ (1,000)	Chegadas aleatórias com menos de 40% dos veículos no pelotão - Qualidade da progressão: regular.
4	$1,15 < R_p \leq 1,50$ (1,333)	Pelotão moderadamente denso chegando no meio do verde, ou pelotão disperso com 40 a 80% dos veículos chegando durante o verde. Qualidade da progressão: regular para boa.
5	$1,50 < R_p \leq 2,00$ (1,667)	Pelotão denso com mais de 80% dos veículos chegando no início do verde - Qualidade da progressão: boa.
6	$R_p > 2,000$ (2,000)	Pelotão denso com quase todos os veículos chegando no início do verde - Qualidade da progressão: ótima.

\* Os valores de  $R_p$  entre parêntesis correspondem aos valores mais comumente observados.

### Expressão do atraso médio

A expressão genérica para determinação do atraso médio dos veículos em semáforos de tempo fixo não congestionados ( $x \leq 1$ ) é a seguinte, dada na expressão 2.12.2.

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 \quad [2.12.2]$$

$$d_1 = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} \quad [2.12.3]$$

$$d_2 = 900T \left[ (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4lx^2}{3600q}} \right] \quad [2.12.4]$$

Onde,  $d_1$  é dado pela expressão 2.12.3 e  $d_2$ : pela expressão 2.12.4 parcelas do atraso médio, PF: fator função do tipo de coordenação existente entre os semáforos, T: período de análise em horas; l: fator que depende do grau de saturação do fluxo que segue em frente relativo ao semáforo anterior e C,  $\lambda$ , x e q: já definidos anteriormente.

O valor de PF é dado pela expressão 2.12.5.

$$PF = \frac{(1-P) \cdot f_{PA}}{1-\lambda} \quad [2.12.5]$$

Onde, PF: fator que depende do tipo de coordenação e P, f e  $\lambda$ : já definidos anteriormente.

Valores típicos de PF e  $f_{PA}$  estão relacionados na tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Valores típicos de Pf e  $f_{PA}$ . Fonte: TRB [2000].**

$\lambda = Ge/C$	Tipo de chegada					
	1	2	3	4	5	6
0.20	1.167	1.007	1.000	1.000	0.833	0.750
0.30	1.286	1.063	1.000	0.986	0.714	0.571
0.40	1.445	1.136	1.000	0.895	0.555	0.333
0.50	1.667	1.240	1.000	0.767	0.333	0.000
0.60	2.001	1.395	1.000	0.576	0.000	0.000
0.70	2.556	1.653	1.000	0.256	0.000	0.000
$f_{PA}$	1.000	0.930	1.000	1.150	1.000	1.000
$R_p$	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000

Os valores de l são fornecidos na tabela 2.5.

**Tabela 2.5 – Valores de  $l$  em função dos valores de  $x$  do fluxo que segue em frente relativo ao semáforo anterior.**

X	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	$\geq 1,00$
l	0,922	0,858	0,769	0,650	0,500	0,314	0,090

### 2.13. Nível de serviço para trechos de vias semaforizados

#### Parâmetro caracterizador do nível de serviço

O parâmetro que caracteriza o nível de serviço num trecho de via semaforizado é a velocidade média de viagem, em comparação com a velocidade máxima desenvolvida na via nos trechos sem dispositivos de controle e em condições de fluxo baixo (velocidade livre). Na maioria dos casos, a velocidade máxima pode ser admitida igual ao limite legal.

#### Fatores que afetam a velocidade de viagem

Os principais fatores que afetam a velocidade média de viagem e, em consequência, o nível de serviço, são: volume de tráfego, número de semáforos por km, programação dos semáforos, existência ou não de coordenação entre os semáforos e tipo de coordenação.

#### Determinação da velocidade de viagem

A velocidade de viagem pode ser determinada através de modelos teóricos, simuladores de tráfego ou observações diretas no campo através de carro-teste.

Os modelos teóricos e os simuladores de tráfego apresentam certa complexidade na sua utilização. A vantagem é que permitem simular diferentes cenários, sendo, portanto, úteis no estudo de projetos de alterações na via.

A obtenção da velocidade de viagem no campo através de carro-teste consiste em percorrer o trecho em estudo com um carro e medir o tempo total de percurso com cronômetro. O quociente entre a extensão do trecho e o tempo de percurso fornece diretamente a velocidade de viagem. O tempo de percurso é a soma dos tempos em movimento, mais os tempos parados nos semáforos, cruzamentos não preferenciais ou outros locais e mais os tempos de desaceleração e aceleração nas paradas.

A velocidade média de viagem no período de estudo deve ser calculada através da média das velocidades obtidas entre 6 e 12 percursos com carro-teste.

### **Amplitude do estudo**

A análise das condições da operação é normalmente realizada em diferentes dias típicos (dia útil, sábado, domingos/feriados) e em distintos períodos do dia: pico da manhã, pico da tarde e períodos típicos de menor movimento. Dessa forma, tem-se uma idéia clara das condições de operação ao longo do dia nos diferentes dias típicos.

Vale recordar que os estudos devem ser realizados sempre nos 15 minutos de maior movimento dentro da hora de maior movimento no período analisado.

O estudo também deve ser realizado por trechos da via e na extensão total da mesma, considerando individualmente os dois sentidos de movimento. Com isso, tem-se uma idéia clara das condições da operação no espaço.

### **Nível de serviço x velocidade**

Na tabela 2.6 é fornecido o nível de serviço em função da velocidade média de viagem para os diferentes tipos de via classificadas de acordo com a velocidade máxima desenvolvida nos trechos sem paradas e em condições de fluxo baixo (velocidade de fluxo livre, que na maioria dos casos pode ser admitida igual ao limite legal).

**Tabela 2.6 – Nível de serviço x velocidade média de viagem em trechos longos de vias semaforizadas. Fonte: TRB [2000].**

Classe de via	I	II	III	IV
Intervalo de velocidades livres	90 – 70 km/h	70 – 55 km/h	55-50 km/h	55-40 km/h
Velocidade livre típica	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
LOS	Velocidade média de viagem (km/h)			
A	>72	>59	>50	>41
B	>56-72	>46-59	>39-50	>32-41
C	>40-56	>33-46	>28-39	>23-32
D	>32-40	>26-33	>22-28	>18-23
E	>26-32	>21-26	>17-22	>14-18
F	≤26	≤21	≤17	≤14

### Utilidade dos estudos

O estudo permite saber das condições de operação existentes, avaliar o resultado de modificações introduzidas na via, como, por exemplo: alterações na programação de semáforos, alterações na forma de sincronismo dos semáforos, implantação de um novo semáforo, implantação de faixa exclusiva para ônibus, etc.

A associação dos valores de velocidade e fluxos nos diferentes períodos do dia permite elaborar um diagrama volume de tráfego x velocidade x nível de serviço para cada trecho de via estudado.

# SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS

### 3.1. Considerações iniciais

Simular é imitar a operação de um processo ou sistema real durante um certo tempo. A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema. A partir dessa história artificial do sistema, pode-se extrair inferências a respeito das características operacionais do sistema real Banks e Carson [1984].

Simulação é uma técnica numérica cujo objetivo é a representação do funcionamento de um sistema real de forma simplificada e idealizada. Com esta técnica, o funcionamento de sistemas complexos, tais como sistemas de tráfego, podem ser representados por meio de modelos matemáticos integrados em um programa computacional May [1990].

Para a Engenharia de Transportes, uma de suas principais utilidades é a simulação dos sistemas que torna possível avaliar e prever o impacto de alterações operacionais no sistema real (sem que seja necessário parar a operação do mesmo), além de permitir o estudo do desempenho de sistemas durante a fase de projeto (antes de sua construção). Simulando-se o sistema, pode-se coletar dados sobre o seu estado; esses dados podem ser então usados para estimar suas medidas de desempenho Setti [1997].

Um modelo é uma representação simbólica, lógica, matemática ou computacional de um sistema real, que normalmente tem a forma de um conjunto de suposições relativas à operação e ao funcionamento desse sistema. O modelo também é uma simplificação do sistema real, devendo ser suficientemente detalhado.

Essas considerações se aplicam a todos os modelos, incluindo os modelos de simulação Setti [1994].

Um simulador pode ser utilizado na representação de diversos sistemas, onde técnicas puramente analíticas não são adequadas ou porque é complicado de se intervir no sistema real, por motivos de custo ou segurança. Entretanto, as ferramentas de simulação não devem ser aplicadas indiscriminadamente a qualquer sistema, sendo, em geral, indicada em estudos e experimentações com sistemas complexos de difícil modelagem por modelos analíticos convencionais.

Conforme Prevedouros [1996], a simulação por computador está ocupando um papel muito importante na análise e gerenciamento de sistemas de vias urbanas e *freeways*. Uma considerável variedade de modelos sofisticados de computador capazes de simular as diferentes operações do tráfego tem sido desenvolvida.

Para Diekmann [2000], a simulação pode ser aplicada inclusive para avaliar ações no sistema de trânsito em nível operacional, como a implementação de Sistemas Inteligentes de Transportes [ITS] e de Sistemas Avançados de Gerenciamento de Tráfego [ATMS].

O uso de computadores para avaliação de problemas na Engenharia de Tráfego por simulação iniciou-se na década de 1950 na Inglaterra, através do *Road Research Laboratory* com simulações de interseções May [1990].

A partir dessa aplicação pioneira, o uso de simuladores cresceu significativamente. Boxill e Yu [2000] contabilizaram em torno de 84 programas de modelagem de tráfego. Sabra *et al* [2000] reportam a existência de 29 programas com simulação de interseções. Prevedouros e Wang [1996] citam 17 modelos de simulação em computador para avaliar as diferentes operações do tráfego. De acordo com Diekmann [2000], no projeto *SMARTTEST* foram identificados 55 modelos de simulação para a Engenharia de Tráfego.

Modelos de simulação de computador vêm sendo cada dia mais usados como ferramenta de apoio para a tomada de decisão nos diferentes problemas do trânsito que hoje enfrentam os engenheiros de tráfego.

A simulação elimina a necessidade de testes de campo caros, que demandam tempo, apresentam riscos e são muitas vezes impossíveis de serem realizados; fornece a oportunidade de testar novas estratégias ou alternativas de gerenciamento de viagens antes da sua implementação; e representam ambientes de tráfego que mudam com o tempo, como volumes de tráfego e incidentes que causam congestionamento Taori e Rathi [1996].

O emprego de modelos de simulação permite melhorar significativamente o desempenho geral da rede de tráfego, pois é possível simular rapidamente diversos cenários, variando os parâmetros principais do sistema, como tempo de ciclo, duração do verde, defasagem entre os inícios de verde dos semáforos, para diferentes volumes de tráfego. Alguns programas podem, inclusive, encontrar a solução de operação ótima da rede, sob certas condições.

### **3.2. Classificação dos modelos de simulação**

Os modelos matemáticos, que englobam os modelos de simulação, de acordo com Setti [1994], podem ser classificados em:

- Estáticos ou dinâmicos - O que os diferencia é se a representação é feita em um dado instante (estático), ou no decorrer do tempo (dinâmico).
- Determinísticos ou estocásticos – Função da presença ou não de variáveis aleatórias. Para modelos determinísticos, um mesmo conjunto de dados de entrada gera sempre o mesmo conjunto de dados de saída. Isso não ocorre com os modelos estocásticos, que contêm variáveis aleatórias como dados de entrada e, com isso, geram variáveis aleatórias como dados de saída.

- Discretos ou contínuos - Em um modelo discreto, as variáveis de estado variam pontualmente no decorrer do tempo. Modelos contínuos possuem variáveis contínuas, ou seja, seus valores variam continuamente ao longo do tempo.

Os modelos de simulação de tráfego de veículos podem ser classificados sob diversas características. Do ponto de vista do modo de representação do tráfego na rede, os modelos podem ser classificados em macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos Taori e Rathi [1996].

### **Modelos macroscópicos**

Os modelos macroscópicos são baseados em uma descrição agregada do fluxo de tráfego, em vez dos movimentos individuais dos veículos. Por essa razão, eles requerem menos memória de computador, mas são incapazes de calcular algumas medidas de desempenho tais como o consumo de combustível. Contudo, são capazes de medir velocidade, fluxo e densidade.

Jagannathan e Khan [2001] citam como modelo macroscópico o SYNCHRO.

Boxill e Yu [2000] citam: CORFLO, NETFLO1, NETFLO2, PASSER-II, PASSER-IV, TRANSYT-7F, TRANSYT-10 e TEXAS.

Prevedouros e Wang [1996] mencionam como exemplos de modelos macroscópicos: TRANSYT-7F e NETFLO.

### **Modelos microscópicos**

Os modelos microscópicos simulam os movimentos individuais dos veículos. Apresentam, em geral, resultados mais realistas, requerendo, porém, um maior número de dados de entrada e maior tempo de simulação.

A habilidade para simular movimentos de veículos em cada faixa, selecionar diferentes cenários e controlar alternativas, faz mais atrativo o uso dos modelos microscópicos.

Boxill e Yu [2000] citam como modelos microscópicos: AIMSUN2, ARCADY2, AVENEU, CARSIM, CASIMIR, CONTRAM, CORSIM, DRACULA, FLEXYT II, HIPERTRANS, HUTSIM, ICARUS, INTEGRATION, INTRAS, MELROSE, MICROSIM, MICSTRAN, MITSIM, NEMIS, NETSIM, PARAMICS, PHAROS, PELOPS, SATURN, SIGSIM, SIMTRAFFIC, SITRA-B+, SITRAS, SOUND, TEXAS, TEXSIM, TRAFFICQ e VEDENS.

Prevedouros e Wang [1996] mencionam como exemplo de modelo microscópico o NETSIM.

### **Modelos mesoscópicos**

Os modelos mesoscópicos incorporam aspectos tanto dos modelos macroscópicos como dos microscópicos.

Maiolino e Portugal [2001] citam como modelos mesoscópicos: CONTRAM e TRIPS.

Boxill e Yu [2000] mencionam: DYNAMIT, DYNEMO e DYNASMART.

Prevedouros e Wang [1996] colocam como exemplos de modelos mesoscópicos: CONTRAM e SATURN.

### **3.3. Vantagens e desvantagens da simulação**

Apesar da simulação ser uma ferramenta apropriada para análise de vários sistemas, devem ser consideradas as suas vantagens e desvantagens antes de sua utilização.

De acordo com Setti [1994], as principais vantagens da simulação são:

- O modelo pronto pode ser usado inúmeras vezes para analisar soluções alternativas no funcionamento da estrutura do sistema;
- Enquanto modelos analíticos normalmente requerem muitas simplificações, os modelos de simulação podem considerar vários parâmetros ao mesmo tempo;
- Métodos de simulação são normalmente mais fáceis para aplicar que métodos analíticos;
- Dados obtidos através de simulação são muito mais baratos que dados coletados em campo;

O mesmo autor cita como desvantagens do emprego de modelos de simulação:

- Os modelos podem ser caros e consumir muito tempo para a sua elaboração e validação;
- Os modelos de simulação necessitam de um grande número de replicações para garantir a qualidade de seus dados de saída, o que pode significar custos elevados em alguns casos.

### **3.4. Entradas requeridas pelos simuladores**

As entradas requeridas pelos simuladores de redes de tráfego com semáforos podem ser agrupadas em elementos da oferta viária e em elementos da demanda.

Quanto à oferta viária, Maiolino e Portugal [2001] mencionam como elementos essenciais que os simuladores devem contemplar:

- Tamanho da rede viária: número máximo de ligações, de nós e de zonas a serem modelados;
- Geometria das interseções: características físicas das interseções como faixas adicionais para giro, o raio de giro das esquinas e rotatórias;

- Controle das interseções: com parada obrigatória ou dê a preferência, com semáforo de tempo fixo ou atuado;
- Características físicas das ligações: número máximo de faixas por sentido;
- Modelagem de estacionamento na via: localização, número de vagas e tempo de permanência;
- Modelagem de vias expressas (se for o caso): número máximo de faixas por sentido, geometria e controle das rampas, faixas auxiliares.

Quanto à demanda, ainda de acordo com Maiolino e Portugal [2001], os elementos a serem considerados pelos simuladores são:

- Tipo de veículo: número máximo de classes representadas (automóveis, ônibus, caminhões, etc);
- Uso da rede: número máximo de veículos simultaneamente na rede;
- Modelagem das manobras para estacionamento;
- Comportamento do motorista: quanto ao avanço do semáforo no amarelo e quanto à resposta às mensagens mostradas nos painéis de mensagens variáveis;
- Modelagem de incidentes e eventos de curta ou longa duração: interrupção parcial da pista devido a estacionamento irregular, movimento de carga e descarga, embarque e desembarque, quebra de veículo ou obras na pista.

### **3.5. Saídas disponibilizadas pelos simuladores**

As saídas dos simuladores de tráfego fornecem, em geral, os volumes alocados em cada ligação da rede e alguns indicadores de desempenho ou medidas relativas aos atributos, como fluidez, qualidade ambiental e economia.

Nas aplicações práticas é importante que as saídas contemplem os seguintes principais elementos:

- Volume alocado em cada ligação;
- Velocidade média em cada ligação, na rede e por classe de veículo;

- Densidade em cada ligação e na rede;
- Tempo médio de viagem em cada ligação, na rede e por classe de veículos;
- Atraso médio em cada ligação, na rede e por classe de veículos;
- Emissão de poluentes em cada ligação e na rede;
- Nível de ruído em cada ligação e na rede;
- Consumo de combustível em cada ligação e na rede;
- Veículo-km de viagem na rede e por classe de veículos;

### 3.6. Escolha do simulador

Os seguintes aspectos devem ser considerados na escolha de um simulador de tráfego:

- A plataforma computacional necessária para a execução do *software*, incluindo a configuração de *hardware* e o sistema operacional;
- O custo de aquisição, treinamento e suporte;
- A compatibilidade com macrosimuladores ou mesosimuladores de planejamento de transportes; e
- A possibilidade de ajustes no *software* visando sua adequação aos padrões locais, já que a maioria dos softwares são estrangeiros e calibrados segundo a realidade do local de origem.

### 3.7. Breve descrição de alguns simuladores de tráfego

A seguir é apresentada uma breve descrição dos principais modelos de simulação de tráfego atualmente utilizados, com base na seguinte bibliografia: Jagannathan e Khan [2001], Prevedouros e Wang [1996], e Maolino e Portugal [2001].

#### NETSIM (*NETwork SIMulation*)

É um modelo de simulação microscópico desenvolvido nos Estados Unidos. O NETSIM, também denominado UTCS-1, foi utilizado inicialmente em 1971 e integrado

ao TRAF (um sistema integrado para simulação de tráfego) na década de 1980, dando origem ao TRAF-NETSIM.

Diversos tipos de condições operacionais em redes urbanas podem ser simulados neste ambiente. Esse modelo proporciona um alto grau de detalhes e precisão e é provavelmente o modelo para simulação microscópica de tráfego mais usado no mundo.

O modelo TRAF-NETSIM usa uma abordagem de simulação em intervalos para movimentar veículos a cada segundo de acordo com a lógica de seqüência dos veículos e em resposta ao controle de tráfego e outras condições.

O TRAF-NETSIM baseia-se no procedimento de Monte Carlo para representar o comportamento ao mundo real. Por conseguinte, combinações de veículos e motoristas, conversões, ultrapassagens, mudanças de faixas e outros tipos de comportamento e decisões operacionais podem ser representadas como processos aleatórios.

A última versão do TRAF-NETSIM utiliza a técnica de número de origem idênticas para representar correntes de tráfego idênticas e reduz a variabilidade da saída.

### **TRANSYT (TRAffic Network StudY Tool)**

O TRANSYT é um modelo de simulação e otimização do tipo determinístico, desenvolvido pelo *Transportation Research Laboratory* da Inglaterra. Até o momento foram desenvolvidas nove versões do TRANSYT. Esse modelo tem sido aplicado mundialmente desde a década de 1980.

O TRANSYT-7F foi desenvolvido na Universidade da Flórida. Os dados e saídas do TRANSYT-7F foram modificados para criar uma versão norte-americana, que é hoje a mais utilizada no mundo.

O TRANSYT-7F modela o comportamento do tráfego em áreas urbanas controladas por semáforos. Durante a otimização procura um conjunto de tempos nos

semáforos que minimize o atraso dos veículos. Isto é atingido pela coordenação de sinais permitindo, assim, que pelotões de veículos passem por um conjunto de semáforos sem parar.

No TRANSYT-7F não existe representação individual dos veículos, e todos os cálculos são realizados fazendo uso das taxas médias de fluxo, movimentos de conversão e filas.

### **CONTRAM (CONTínuos TRaffic Assignment Model)**

O CONTRAM é um *software* de alocação e avaliação de fluxo de tráfego em redes urbanas.

Esse simulador trata grupos de veículos como uma única entidade, ou seja, veículos que pertencem a um grupo viajam no mesmo custo de rota e chegam ao mesmo tempo.

O CONTRAM determina a variação do tempo nos tramos e o custo da rota.

### **SATURN – Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks**

O SATURN é um modelo de alocação e simulação de tráfego desenvolvido pela Universidade de Leeds, Inglaterra. Incorpora simulação de interseções e modelagem de filas.

Assim, é adequado para modelagem de redes urbanas onde o desempenho das interseções viárias representa grande parcela da impedância entre os pares origem - destino. Essa impedância, expressa na forma de atrasos, apresenta grande impacto sobre a escolha de rotas.

### **CORSIM – Corridor Simulation, versão 1.04**

O CORSIM é um modelo norte-americano com dois módulos: o NETSIM para redes e o FRESIM para vias expressas, que podem ser modelados simultaneamente.

O módulo para redes trabalha com volumes de tráfego e proporções de giro nas interseções ou com matrizes origem - destino.

Modela interseções semaforicas de tempo fixo ou atuado com detalhamento da geometria.

### **INTEGRATION**

É um modelo canadense aplicável para redes de vias comuns e vias expressas. Pode trabalhar com volumes de tráfego e proporções de giro nas interseções ou com matrizes origem – destino até no máximo de 500 zonas de tráfego.

Modela interseções com prioridade, semaforicas, rampas de acesso e saída de vias expressas e faixas exclusivas.

Trabalha com diversos tipos de veículos e pode simular até 150.000 veículos simultaneamente.

Considera a ocorrência de incidentes que bloqueiam parcialmente a via até o limite máximo de 100.

### **DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulation*)**

É um modelo desenvolvido na Inglaterra para redes de semáforos.

O programa trabalha com matrizes origem – destino e modela interseções com prioridade, rotatórias e semáforos de tempo fixo ou atuado.

Considera 6 tipos de veículos, detalha as características físicas e operacionais de cada veículo, com operação de ônibus com ou sem faixa exclusiva, e com paradas múltiplas, com ou sem baia. Considera o bloqueio parcial da via.

Modela também controle eletrônico de velocidade e presença de pedágio. Suas saídas são: volumes alocados, velocidade, atraso, fila, consumo de combustível e emissão de poluentes. É compatível com o mesossimulador SATURN.

## **SYNCHRO**

É um programa de sincronização de semáforos macroscópico, com capacidade de simulação e otimização.

As características principais do programa incluem análise de capacidade, coordenação, modelagem simulada do semáforo e diagramas de tempo - espaço adequados aos usuários. O *software* analisa e otimiza redes de cruzamentos semaforizados. O programa fornece um relatório detalhado com informações sobre capacidade, volume, nível de serviço, extensão das filas, atrasos, paradas, consumo de combustível e níveis de emissão.

## Capítulo 4

### O SIMULADOR INTEGRATION

---

Neste capítulo são descritas de forma detalhada as principais características do simulador, as lógicas fundamentais utilizadas para o movimento dos veículos em uma via com fluxo interrompido, algumas considerações sobre modelagem de semáforos e parâmetros de desempenho fornecidos pelo INTEGRATION.

#### 4.1 Considerações iniciais

O simulador de tráfego INTEGRATION começou a ser desenvolvido na década de 1980, nas Universidades de *Waterloo* e *Queen's*, Canadá, por Michel Van Aerde.

O INTEGRATION é um modelo de simulação capaz de representar tanto vias com fluxo contínuo, como vias comuns com semáforos e cruzamentos com sinal de parada obrigatória ou dê a preferência.

O simulador adota um modelo microscópico onde os movimentos longitudinais e laterais de cada veículo individual são calculados a cada décimo de segundo, sendo cada veículo governado, basicamente, pelas regras de alocação dinâmica de tráfego, de *car following*, de mudança de faixas, de ondas de choque, de entrelaçamentos e de aceitação de *gaps*.

A natureza microscópica do modelo foi calibrada de modo que os elementos macroscópicos do comportamento do tráfego, como as relações entre fluxo e velocidade e

os diferentes tipos de atrasos, surgissem das leis da dinâmica microscópica do modelo. Rakha [2001].

De acordo com Demarchi [2000] uma característica que torna bastante atrativo o uso do simulador INTEGRATION é a possibilidade de visualizar durante a simulação o fluxo de tráfego, identificando dessa forma os fenômenos que nele ocorrem, tais como: manobras de ultrapassagem e formação de filas dinâmicas causadas por veículos lentos. Esta característica permite que o usuário detecte mais facilmente eventuais erros de modelagem do sistema.

A estrutura e estilo do programa de computador do INTEGRATION foram influenciados inicialmente pela linguagem GPSS. O programa foi escrito em FORTRAN, mas as primeiras versões também foram desenvolvidos em linguagens C e BASIC.

O hardware do computador recomendado para executar as várias versões do modelo são o Microsoft *Windows*®. Uma versão do simulador executável em MS-DOS não está mais disponível.

Atualmente quatro diferentes versões do INTEGRATION estão disponíveis comercialmente: a pequena, a média, a grande e a extra-grande. A sua última versão é a 2.30e, de Maio de 2002.

Inúmeras aplicações do simulador INTEGRATION tem sido reportadas na literatura técnica, tanto em pesquisas como na solução de problemas práticos.

Bacon *et al* [1994] avaliaram o potencial do modelo INTEGRATION para simular vias com faixas para veículos com alta ocupação de passageiros (*High Occupancy Vehicles*), tendo obtido excelentes resultados.

May [1994] reporta o emprego do INTEGRATION na avaliação de sistemas inteligentes de tráfego [IVHS] em *freeways*; Rillet [1991] na simulação de sistemas *TravTek*.

Wang e Prevedouros [1997] compararam os simuladores INTEGRATION, CORSIM e WATSIM, aplicando-os em três pequenas redes em Honolulu, Hawái. Os modelos produziram resultados comparáveis na maioria dos testes.

## 4.2. Estrutura básica do simulador

Um sistema de tráfego é composto por vários elementos relacionados à via e aos veículos. No INTEGRATION, a rede de vias é modelada através de nós e tramos. Os nós podem representar interseções entre duas vias ou quaisquer outros pontos onde ocorram mudanças nas características das vias, tais como aumento do número de faixas.

Os tramos promovem a ligação entre os nós e representam as vias por onde os veículos trafegam. A cada tramo é associada uma relação fluxo-velocidade, que determina o padrão de velocidades dos veículos quando presentes nesse tramo. O tráfego nos tramos da rede é gerado a partir de demandas, originadas em um ou mais nós da rede, e que têm como destino outros nós (um ou mais) diferentes dos nós de origem.

A demanda é caracterizada por uma distribuição temporal de viagens, que define os instantes de entrada dos veículos na rede e o tipo de veículo gerado.

A modelagem da rede baseia-se em informações provenientes de arquivos de entrada do tipo texto.

Para simular um trecho de via com semáforos são utilizados obrigatoriamente cinco arquivos com dados de entrada. Esses arquivos são descritos resumidamente a seguir.

- Arquivo de nós - Contêm as coordenadas cartesianas, as características e os atributos dos nós da rede;
- Arquivo de tramos - Contêm a estrutura dos tramos, suas coordenadas cartesianas e suas características, tais como comprimento, número de faixas e parâmetros que definem a relação entre fluxo, velocidade e densidade (velocidade de fluxo livre, velocidade na capacidade, capacidade e densidade de congestionamento);
- Arquivos de semáforos - Contêm todas as informações sobre a programação semafórica: tempo de ciclo, tempos verde e amarelo, entreverdes, tempo perdido por fase, etc;
- Arquivo de demandas - Contêm a matriz de origem/destino, 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;
- Arquivos de incidentes - Contêm informações que permitem simular a ocorrência de incidentes, como, por exemplo, o fechamento temporário de uma faixa de tráfego.

Além dos arquivos mencionados, é necessário um arquivo de controle, denominado arquivo mestre, que especifica os parâmetros globais da simulação e contém as informações sobre os nomes dos arquivos de entrada e saída dos dados, suas localizações e o tempo de simulação.

O programa também permite a utilização de diversos arquivos opcionais, visando a incorporação de todas as condições de tráfego observadas no mundo real.

### **4.3. Lógicas Fundamentais**

O movimento dos veículos em uma via arterial com fluxo interrompido é governado, no INTEGRATION, por cinco lógicas distintas: geração dos veículos, relação

interveicular (“car-following”), escolha da rota e atribuição de tráfego, desaceleração em semáforos e filas. A seguir são comentadas cada uma dessas lógicas.

### Geração dos veículos

A geração individual dos veículos ocorre de uma maneira que satisfaz ao processo de chegadas especificado nos arquivos de entrada de dados.

O INTEGRATION possibilita a geração de veículos com *headways* distribuídos de três formas distintas: determinística (*headways* constantes), seguindo uma distribuição exponencial negativa e seguindo uma distribuição exponencial negativa deslocada.

### Relação interveicular

Em cada tramo da rede, veículos em uma mesma faixa de tráfego movem-se segundo um padrão definido através de um modelo combinado de fluxo e *car-following*.

O modelo é microscópico, pois o comportamento de cada veículo é modelado individualmente. Porém, os parâmetros do modelo são calibrados macroscopicamente, de forma que o comportamento agregado do fluxo de tráfego, em condições de equilíbrio, possa ser representado através da relação entre fluxo, velocidade e densidade definida para o tramo.

Nesse modelo, a velocidade de cada veículo é função do espaçamento entre ele e o veículo que trafega à sua frente. A equação [4.1] que relaciona essas duas variáveis é dada a seguir:

$$s = C_1 + \frac{C_2}{V_f - V} + C_3V \quad [4,1]$$

Onde:

$s$  : espaçamento entre veículos consecutivos numa mesma faixa de tráfego em km;

- $v$  : velocidade em km/h;  
 $v_f$ : velocidade do fluxo livre em km/h;  
 $c_1$  : constante de calibração 1 em km;  
 $c_2$  : constante de calibração 2 em km<sup>2</sup>/h;  
 $c_3$  : constante de calibração 3 em h.

Na figura 4.1 estão representadas as curvas que traduzem as relações macroscópicas que governam o movimento dos veículos: velocidade x espaçamento, velocidade x densidade, velocidade x fluxo e densidade x fluxo.

A densidade  $k$  pode ser calculada pela equação [4.2] e o fluxo  $q$  calculado pela relação fundamental de tráfego, expressa na equação [4.3].

$$k = \frac{1}{C_1 + \frac{C_2}{V_f - V} + C_3 V} \quad [4.2]$$

$$q = v k \quad [4.3]$$

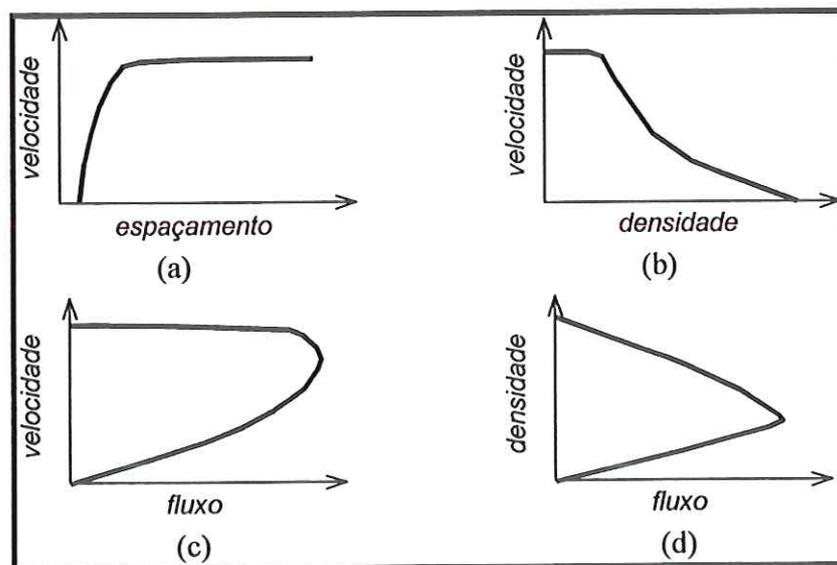


Figura 4.1 - Relações entre as variáveis de tráfego. Demarchi [2000].

As constantes  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ , representam relações entre os parâmetros característicos obtidos através de calibração macroscópica da curva fluxo  $\times$  velocidade; e o coeficiente  $c_{vc}$  é utilizado para ajustar a velocidade na capacidade, sendo:

$$C_{vc} = \frac{2V_c - V_f}{(V_f - V_c)^2} \quad [4,4]$$

$$C_2 = \frac{1}{K_j \left( C_{vc} + \frac{1}{V_f} \right)} \quad [4,5]$$

$$C_1 = C_{vc} C_2 \quad [4,6]$$

$$C_3 = \frac{1}{V_c} \left( \frac{V_c}{q_c} - C_1 - \frac{C_2}{V_f - V_c} \right) \quad [4,7]$$

Onde:

$v_f$ : velocidade do fluxo livre em km/h;

$v_c$ : velocidade na capacidade em km/h;

$q_c$ : fluxo máximo, ou capacidade da via em veíc/h; e

$k_j$ : densidade de congestionamento em veíc/km.

O modelo de fluxo proposto por Van Aerde [1995] consiste numa generalização do modelo proposto por Greenshields [1935], que corresponde ao caso em que as constantes  $C_1$  e  $C_3$  são iguais a zero. A introdução de mais parâmetros no modelo torna a modelagem mais flexível, permitindo que o modelo se adapte melhor à realidade.

Durante a simulação, a velocidade de cada veículo é atualizada, a cada décimo de segundo, a partir do espaçamento existente entre ele e o veículo que trafega imediatamente à sua frente.

Assim, rearranjando os termos da equação [4.1], obtém-se uma equação quadrática:

$$C_3V^2 + (C_1 - C_3V_f - S)V + (S - C_1)V_f - C_2 = 0 \quad [4.8]$$

A velocidade pode então ser determinada calculando-se as raízes da equação [4,8]. Entretanto, somente a raiz onde  $0 \leq v \leq v_f$  interessa, sendo calculada através da relação [4.9].

$$V = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad [4.9]$$

Onde os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os seguintes:

$$a = c_3 \quad [4.10]$$

$$b = c_1 - c_3v_f - s \quad [4.11]$$

$$C = (s - C_1)V_f - C_2 \quad [4.12]$$

A relação interveicular também leva em conta situações como a ilustrada pela Figura 4.2. O fato do espaçamento  $s_{12}$  ser maior que o espaçamento  $s_{23}$  não significa necessariamente que a velocidade do veículo 1 seja maior que a velocidade do veículo 2, pois o veículo 1 ocupa mais espaço que os outros veículos e, portanto, a relação entre velocidade e espaçamento deve ser modificada para compensar o fato do veículo 1 ser mais longo.

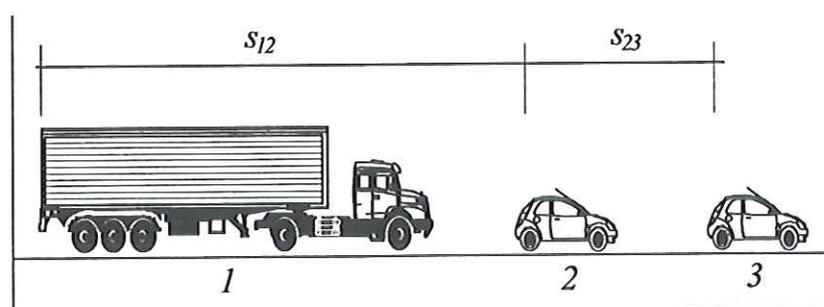


Figura 4.2 - Relação entre espaçamentos de caminhão e automóvel. Demarchi [2000].

Para calcular corretamente a velocidade dos veículos mais longos, os valores da densidade de congestionamento e da capacidade são divididos por um fator de equivalência entre espaçamentos  $e_s$ , conforme a equação [4.13].

$$e_s = \frac{s_{j12}}{s_{j23}} \quad [4.13]$$

Sendo,  $s_{j12}$  e  $s_{j23}$  os espaçamentos entre os veículos quando a densidade é igual à densidade de congestionamento.

Os fatores de equivalência entre espaçamentos devem ser especificados no arquivo de demandas, para cada categoria de veículo simulada.

O simulador estima a demora de veículos a cada décimo de segundo como a diferença entre a velocidade instantânea dos veículos e a velocidade livre, como indicado na equação [4.14].

$$d_i = \Delta t \left( 1 - \frac{U_i}{U_f} \right) \forall i \quad [4.14]$$

Onde,  $\Delta t$  é o incremento do tempo do processamento de dados (1 décimo de segundo),  $U_i$  é a velocidade instantânea e  $U_f$  é a velocidade livre.

A taxa de consumo de combustível para cada veículo é calculada a cada segundo, com base na velocidade instantânea. Devido à mudança na velocidade de um segundo para outro, é também possível determinar o montante de combustível adicional que foi consumido devido a qualquer um dos ciclos de aceleração e desaceleração.

No relacionado à emissão de elementos contaminantes, o INTEGRATION considera as emissões de hidrocarbonetos (HC), de monóxido de carbono (CO) e de óxido nítrico (NOx), também efetuando os cálculos de segundo em segundo.

### Escolha da rota e atribuição de tráfego

A escolha da rota seguida pelos veículos é determinada por uma lógica interna do programa. Em geral, existem diversos modos para estabelecer rotas aos veículos entre origem e destino. Algumas das técnicas são estáticas e determinísticas, enquanto outras são dinâmicas e estocásticas.

Independentemente da técnica utilizada para determinar as rotas, a escolha do próximo tramo a ser percorrido deve ser feita individualmente para cada veículo, através de uma lista com a seqüência de tramos que o veículo deve seguir. Assim, as conversões nos nós dependem da origem e destino dos veículos, não sendo arbitrárias. Antes de terminar de percorrer um tramo, o veículo consulta a lista para saber qual o próximo tramo que deve utilizar para alcançar o seu destino de forma mais eficiente. Quando seu percurso nesse tramo está completo, o processo é repetido até alcançar o tramo cujo nó é o último destino.

### Filas

Um subproduto natural da lógica seguindo o líder (*car-following*) é a representação de filas, que mostra os veículos parados ao longo de um tramo ou de vários tramos. Essa representação é baseada na diferença entre as taxas de chegadas e partidas no tramo. As filas podem propagar-se para os tramos a montante (*back-propagation*) se o número de veículos na fila exceder a capacidade no tramo, que é calculada para cada faixa de tráfego como o produto entre a densidade de congestionamento e o comprimento do tramo.

## 4.4. Modelagem de semáforos

Um elemento bastante importante dentro das áreas urbanas é a presença de interseções com semáforos. A seguir é apresentada uma descrição detalhada das lógicas consideradas na modelagem de semáforos no simulador INTEGRATION.

No modelo, um tramo com semáforo tem as mesmas características que um tramo de uma via com fluxo ininterrupto, com exceção que quando se inicia o tempo de

vermelho em uma das aproximações da interseção, o simulador coloca um veículo virtual parado nesta aproximação, o que força os veículos subsequentes a pararem automaticamente formando uma fila, sendo o espaçamento mínimo entre os veículos definido pela densidade de congestionamento.

Uma das tarefas de modelagem mais complexas ao estimar a capacidade de semáforos isolados e coordenados é o tratamento da permissão de conversão à esquerda ou conversões à direita durante o vermelho.

Dentro do simulador um modelo de aceitação de *gaps* microscópico é utilizado para refletir o impacto dos fluxos opostos nos motoristas que convertem à esquerda nas fases não protegidas, ou à direita no vermelho. Essa lógica especifica quais movimentos de oposição estão em conflito com o movimento de interesse. Desse modo, a lógica de aceitação de *gaps* pode funcionar como o modelo de distribuição das filas nas várias faixas de aproximação do semáforo.

O simulador é capaz de avaliar o impacto da coordenação semafórica. A otimização das defasagens (*offsets*) é considerada como uma opção dentro do INTEGRATION.

A otimização da defasagem (*offset*) é feita a cada extensão de ciclo pela minimização de um índice de desempenho (combinação de atrasos e paradas) usando uma abordagem de perfil cíclico similar ao TRANSYT-7F a ao SCOOT.

As velocidades dos veículos são continuamente atualizadas durante a simulação baseada em uma relação fluxo-velocidade.

De acordo com Rakha [2001] no INTEGRATION os planos de tempo dos semáforos são otimizados usando os métodos de Webster, como implementado no Guia de Capacidade Canadense. Esse método é similar, embora não idêntico, ao descrito no *Highway Capacity Manual* [TRB, 2000].

## **4.5. Parâmetros de desempenho fornecidos pelo INTEGRATION**

O simulador INTEGRATION fornece os parâmetros de avaliação do desempenho do tráfego colocados a seguir.

### **Distância percorrida**

O programa fornece a distância total percorrida pelos veículos durante o período de simulação e a distância média percorrida por veículo. Ambos os valores são fornecidos em cada tramo ou na rede completa.

### **Tempo de viagem**

O programa fornece o tempo total de permanência dos veículos em cada tramo e na rede completa durante o período de simulação, bem como o tempo médio de viagem por veículo – também em cada tramo e na rede completa.

### **Tempo parado**

Corresponde ao tempo que os veículos permanecem parados. O programa fornece o valor total desse tempo em cada tramo e na rede completa considerando todo o período de simulação, bem como o valor médio por veículo.

### **Atraso na aceleração e desaceleração**

Corresponde ao tempo adicional gasto nas acelerações e desacelerações dos veículos em relação à passagem no trecho com a velocidade livre. O programa fornece o valor total desse atraso referente a todos os veículos considerando todo o período de simulação e o valor médio por veículo, para cada tramo ou na rede completa.

### **Atraso total**

Corresponde ao tempo adicional de percurso em relação à passagem com a velocidade livre. O programa fornece o valor global do atraso total referente a todos os veículos durante o período de simulação e o valor médio por veículo, em cada tramo ou na rede completa.

O valor do atraso total em cada trecho é igual a soma do valor do tempo parado mais o valor do tempo de aceleração e desaceleração.

### **Número de paradas**

O programa fornece o número total de paradas de todos os veículos em cada tramo e na rede completa durante o tempo de simulação, bem como o valor médio por veículo.

### **Consumo de combustível**

O programa fornece o consumo total de combustível de todos os veículos em cada tramo e na rede completa durante o período de simulação, bem como o consumo médio por veículo.

### **Emissão de poluentes**

O programa fornece a quantidade total de elementos poluentes emitida na rede completa durante o período de simulação, bem como a quantidade média emitida por veículo.

O programa fornece em separado a quantidade emitida dos seguintes elementos: hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxido nitroso (NOx).

### **Número de acidentes**

O programa fornece o total provável de acidentes na rede durante o período de simulação, bem como o valor médio por veículo. O número de acidentes é fornecido de forma desagregada conforme a natureza: acidentes leves, médios e graves.

### **Outros parâmetros**

O simulador é capaz de calcular outros parâmetros, como a agregação de estatísticas por tramo, par O-D, detetor *Loop* e veículo teste (*probe*).

No caso dos veículos testes (*probe vehicles*), o INTEGRATION realiza o monitoramento completo dos mesmos ao longo da rede. É possível estabelecer uma porcentagem (entre 0% e 100%) dos veículos gerados como sendo "*Probes*". Para os veículos "*probes*", o programa fornece dados toda vez que o veículo chega ao fim do tramo percorrido. A partir desses registros, pode-se determinar a seqüência de tramos percorridos e o tempo de viagem para percorrer cada tramo.

## **4.6. Arquivos de saída**

O INTEGRATION fornece os seguintes arquivos de saída:

- ◆
- ◆ Animação na tela do monitor
- ◆ Erros de execução (Runerr.out)
- ◆ Resumo conciso das estatísticas da simulação (Summary.out)
- ◆ Resultados detalhados (File10.out, File11.out e File12.out)

### **Animação na tela do monitor (animação da simulação)**

A animação da simulação permite visualizar o fluxo de tráfego no decorrer da simulação e, com isso, permite ao usuário verificar se a rede está correta, identificar erros

de codificação em links, sinais, identificação de gargalos e outros comportamentos indesejados, e acompanhar a evolução dos congestionamentos.

#### **Erros de execução (*runerr out*)**

Este arquivo é criado no início da simulação, atualizado a cada 600 segundos, e indica restrições no tamanho da rede, lista de erros encontrados durante a leitura dos dados ou na execução do programa. Apresenta diversas informações, tais como o número máximo de tramos ou veículos possíveis de ser simulado na versão do INTEGRATION que está sendo utilizada, eventuais erros de codificação, estatísticas do tempo de simulação, número de veículos a ser gerado, número de veículos em trânsito e número de viagens finalizadas.

#### **Resumo das estatísticas da simulação (*summary out*)**

Este arquivo é criado no final da simulação e fornece medidas de desempenho agregadas para toda a rede simulada. No primeiro grupo, medidas para todos os veículos de cada classe; no segundo grupo, média das medidas para cada classe veicular.

#### **Arquivo de resultados**

O arquivo 10 apresenta os resultados detalhados das estatísticas nas ligações, otimização de sinais, estatísticas de viagens e incidentes.

O arquivo 11 apresenta as condições médias de tráfego em cada ligação, sendo gerado no final da simulação.

O arquivo 12 apresenta a série temporal das condições de tráfego nas ligações, gerada a cada  $n$  segundos, e fornece as seguintes saídas: tempo de viagem com a velocidade livre na ligação, tempo médio de viagem, número de veículos, consumo de combustível, número de paradas, emissão de poluentes e número de acidentes.

## Capítulo 5

### ANÁLISE DE RESULTADOS DO INTEGRATION

#### **5.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos com a aplicação do simulador INTEGRATION em alguns casos simples. O processo de análise consistiu da verificação do comportamento de resultados do INTEGRATION e da comparação com valores de outros modelos teóricos de avaliação do desempenho de semáforos.

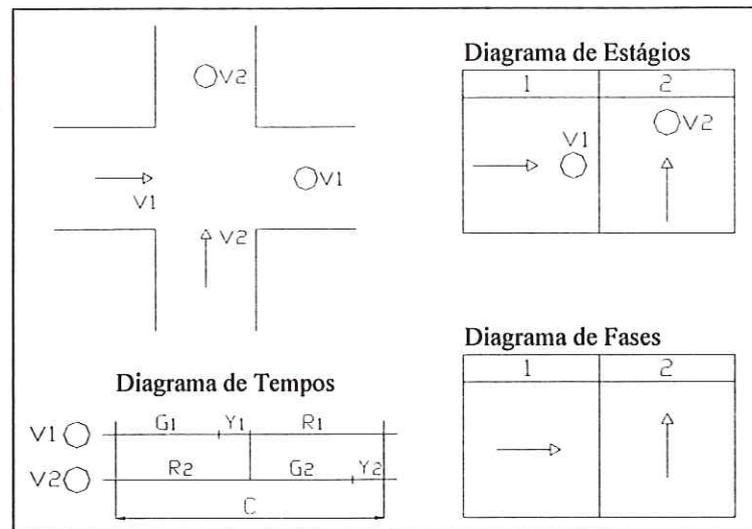
São dois os objetivos deste capítulo. Primeiro, adquirir treinamento, compreensão e segurança na utilização do INTEGRATION. Segundo, verificar (comprovar) a validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo programa em alguns casos simples.

Em todos os casos analisados, os resultados obtidos com o emprego do INTEGRATION correspondem a um tempo de simulação de 1 hora.

A seguir são descritos os casos estudados e apresentadas as análises realizadas.

#### **5.2. Caso 1: semáforo isolado no cruzamento de duas vias de sentido único**

Na figura 5.1 são mostrados o esquema do cruzamento e o plano semafórico (diagramas de estágios, fases e tempos) empregado.



**Figura 5.1 – Esquema da interseção e plano semafórico empregado.**

As seguintes premissas e parâmetros foram admitidos: fluxo constituído somente de carros, velocidade em fluxo livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 30km/h, fluxo de saturação por faixa = 1500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo em cada fase = 3s (igual a do entreverdes), tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m.

De acordo com os resultados de pesquisas de campo realizadas por Demarchi [2002] e, mais recentemente, pela empresa AUTOBAHN em pesquisa ainda não divulgada, a velocidade na capacidade situa-se em torno de 75% da velocidade em fluxo livre – valor que foi adotado neste trabalho nas aplicações utilizando o INTEGRATION, salvo em alguns casos devidamente explicitados.

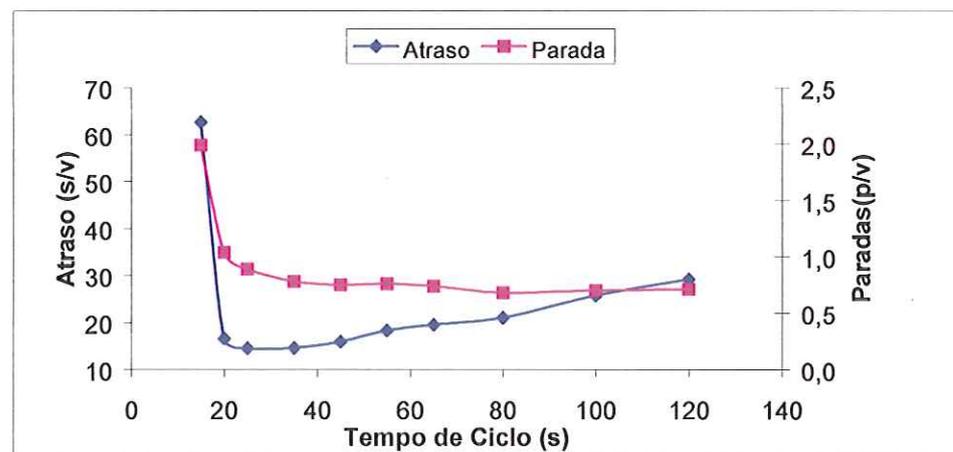
A tabela 5.1 mostra os valores do atraso e do número de paradas obtidos com a aplicação do INTEGRATION para diferentes valores do tempo de ciclo, nos seguintes três casos:  $V_1 = 500\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ ;  $V_1 = 800\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ ;  $V_1 = 855\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 500\text{veíc/h}$ . Os tempos de verde foram distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação das faixas críticas.

500veíc/h. Os tempos de verde foram distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação das faixas críticas.

**Tabela 5.1 - Atraso e número de paradas**

$V_1 = 500\text{veíc/h}$			$V_1 = 800\text{veíc/h}$			$V_1 = 855\text{veíc/h}$		
$V_2 = 400\text{veíc/h}$			$V_2 = 400\text{veíc/h}$			$V_2 = 400\text{veíc/h}$		
Ciclo (seg)	Atraso (s/veíc)	Paradas (p/veíc)	Ciclo (seg)	Atraso (s/veíc)	Paradas (p/veíc)	Ciclo (Seg)	Atraso (s/veíc)	Paradas (p/veíc)
15	62,65	1,99	20	83,98	2,34	30	75,56	1,98
20	16,61	1,04	25	37,33	1,5	40	35,86	1,22
25	14,5	0,89	30	34,38	1,35	50	35,05	1,04
35	14,56	0,78	40	29,06	1,07	60	31,78	0,91
45	15,89	0,75	50	29,53	0,96	70	29,42	0,84
55	18,24	0,76	60	28,55	0,89	80	32,01	0,81
65	19,52	0,74	70	29,24	0,82	90	33,52	0,75
80	20,94	0,68	80	27,8	0,76	100	34,06	0,73
100	25,69	0,7	90	29,92	0,75	120	31,36	0,66
120	29,15	0,71	100	29,16	0,71	150	35,81	0,6
-	-	-	120	33,88	0,68	180	41,68	0,57
-	-	-	150	35,44	0,62	-	-	-

As curvas do atraso e número de paradas x duração do ciclo para os três casos analisados são mostrados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4.



**Figura 5.2 – Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 500\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .**

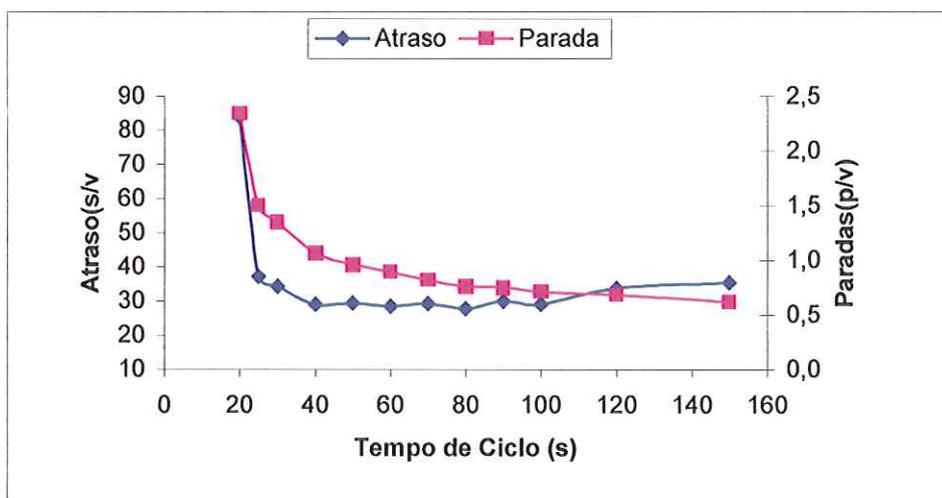


Figura 5.3 – Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 800\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .

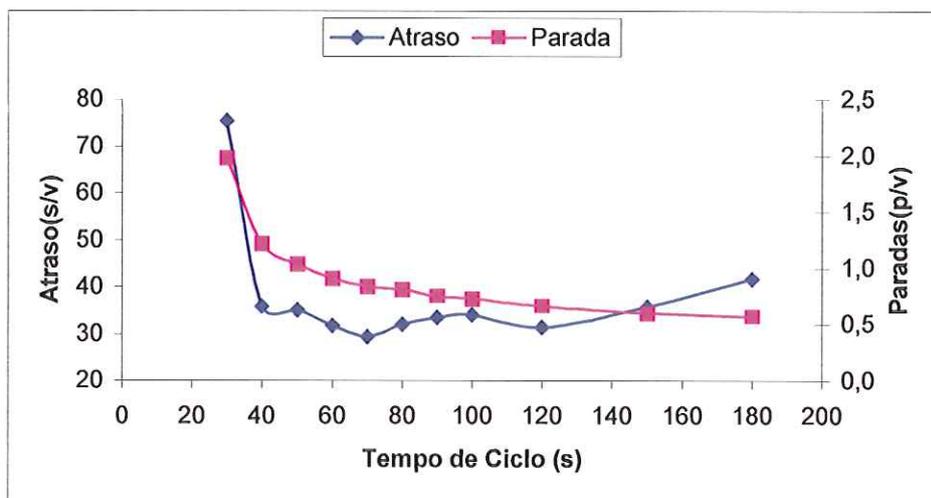


Figura 5.4 – Atraso e número de paradas x ciclo para  $V_1 = 855\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .

As curvas do atraso e do número de paradas obtidas com os valores fornecidos pelo INTEGRATION mostram comportamento similar às apresentadas por outros modelos teóricos e por pesquisas de campo.

Numa primeira etapa, o atraso diminui rapidamente com o aumento da duração do ciclo; numa segunda etapa, permanece mais ou menos constante; e, numa terceira etapa, aumenta lentamente. Assim, para operar com atraso próximo do mínimo, o ciclo deve estar nos intervalos indicados na tabela 5.3.

O número de paradas cai rápido numa primeira etapa; passa a diminuir devagar numa segunda etapa; e diminui de maneira bastante lenta (permanece praticamente constante) numa terceira etapa. Assim, para operar com o número de paradas próximo do mínimo, o ciclo deve ser maior que os valores indicados na tabela 5.3.

Também foi analisada a influência da duração do ciclo no consumo de combustível e na emissão de poluentes. Em relação a emissão de poluentes, foi considerada a soma dos três agentes contaminantes (HC, CO e NOx) fornecidos pelo INTEGRATION. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 5.2 e nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

**Tabela 5.2 - Consumo de combustível e emissão de poluentes.**

$V_1 = 500\text{veic/h}$			$V_1 = 800\text{veic/h}$			$V_1 = 855\text{veic/h}$		
$V_2 = 400\text{veic/h}$			$V_2 = 400\text{veic/h}$			$V_2 = 400\text{veic/h}$		
Ciclo (seg)	Comb (g/veic)	Pol (g/veic)	Ciclo (seg)	Comb (g/veic)	Pol (g/veic)	Ciclo (Seg)	Comb (g/veic)	Pol (g/veic)
15	0,0852	1,67	25	0,067	0,96	30	0,0892	1,25
20	0,0573	1,27	30	0,0641	0,9	40	0,0654	1,02
25	0,0543	1,16	40	0,061	0,86	50	0,0631	0,93
35	0,0526	1,06	50	0,0592	0,83	60	0,0602	0,87
45	0,0523	0,95	60	0,0595	0,81	70	0,0583	0,84
55	0,0534	0,9	70	0,0581	0,85	80	0,059	0,84
65	0,0533	0,87	80	0,0584	0,79	90	0,0589	0,82
80	0,0552	0,85	90	0,0578	0,79	100	0,0588	0,81
100	0,0565	0,83	100	0,0565	0,79	120	0,0568	0,77
120	-	-	120	0,0582	0,79	150	0,058	0,77
-	-	-	150	0,058	0,77	180	0,0601	0,76

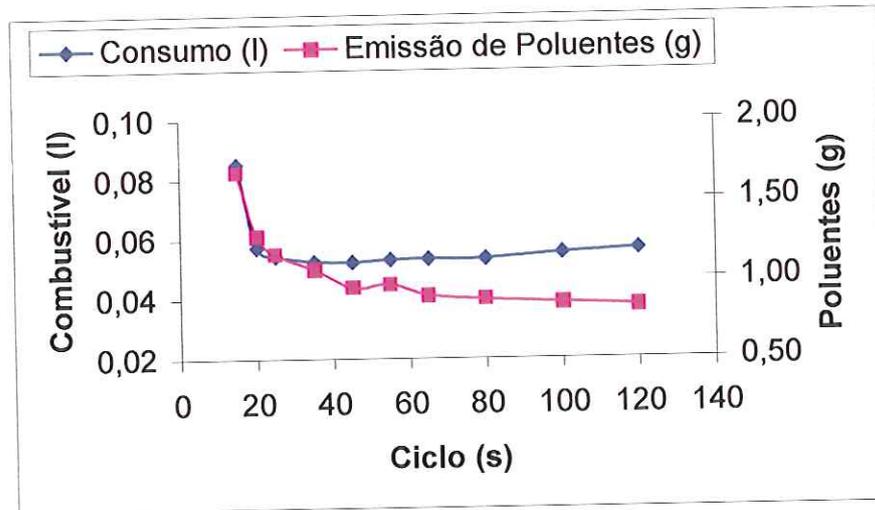


Figura 5.5 – Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 500\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .

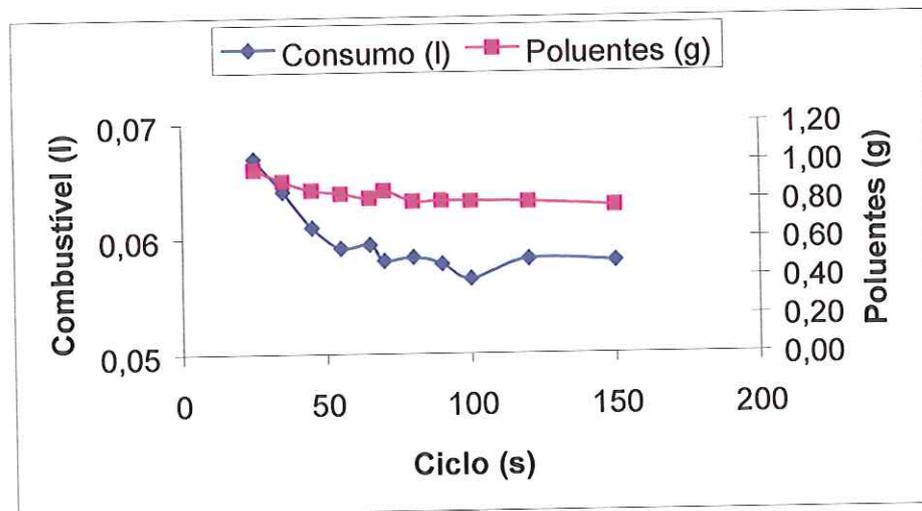
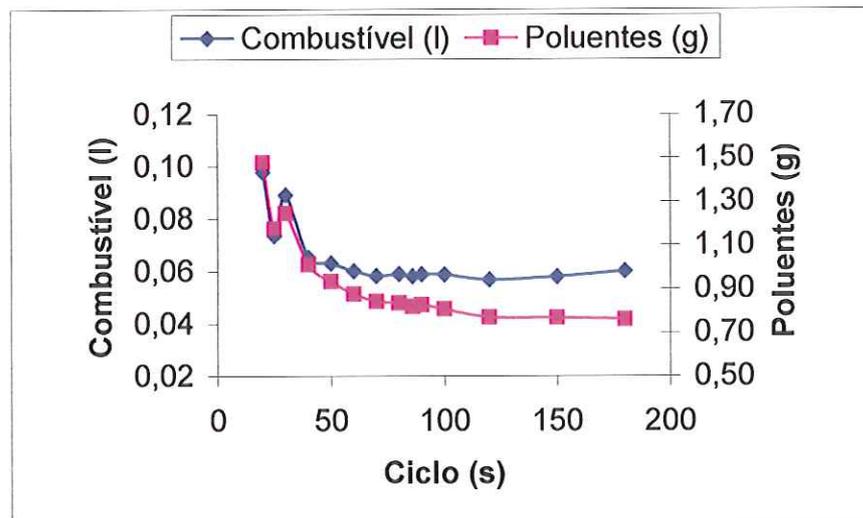


Figura 5.6 – Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 800\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .



**Figura 5.7 – Consumo de combustível e emissão de poluentes x ciclo para  $V_1 = 855\text{veíc/h}$  e  $V_2 = 400\text{veíc/h}$ .**

As curvas do consumo de combustível para os três casos mostram comportamento similar. Numa primeira etapa, o consumo diminui rapidamente com o aumento da duração do ciclo; numa segunda etapa, permanece mais ou menos constante; e, numa terceira etapa, aumenta lentamente. Assim, para operar com o consumo de combustível próximo do mínimo, o ciclo deve estar nos intervalos indicados na tabela 5.3.

Também as curvas de emissão de poluentes para os três casos se mostram análogas. A quantidade emitida cai rápido numa primeira etapa; passa a diminuir devagar numa segunda etapa; e diminui de maneira bastante lenta (permanece praticamente constante) numa terceira etapa. Assim, para operar com a emissão de poluentes próximo do mínimo, o ciclo deve ser maior que os valores indicados na tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Faixas de variação do ciclo com menores valores dos parâmetros.**

FLUXOS	ATRASSO	PARADAS	COMBUSTIVEL	POLUENTES	OTIMO INTEGRATION	OTIMO WEBSTER
$V_1 = 500\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	25 - 45	> 45	35 - 65	> 55	45 - 55	35
$V_1 = 800\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	40 - 100	> 80	70 - 100	> 80	80 - 100	70
$V_1 = 855\text{v/h}$ $V_2 = 400\text{v/h}$	60 - 120	> 90	70 - 120	> 100	90 - 120	86

Com base nos valores da tabela 5.3 é possível estabelecer, grosso modo, as faixas de variação do ciclo que, grosso modo, satisfazem o objetivo de operar com os valores do atraso, número de paradas, consumo de combustível e emissão de poluentes próximos dos valores mínimos. Essas faixas estão indicadas na tabela 5.3.

Na tabela 5.3 também estão indicados os valores do ciclo ótimo calculados com a expressão de Webster - que, de acordo com o autor, minimiza o atraso dos veículos no cruzamento -, considerando o tempo perdido por fase igual a 3 segundos (mesmo valor utilizado na simulação com o INTEGRATION).

Como se pode observar, os valores fornecidos pela expressão de Webster estão dentro dos intervalos de menores valores do atraso - mais do que isso, estão situados próximos dos pontos médios dos intervalos. Esses valores também estão dentro dos intervalos de menores valores do consumo de combustível, mas localizados junto aos valores mínimos. No entanto, estão abaixo das faixas de menores valores do número de paradas e da emissão de poluentes. A análise das curvas do número de paradas e da emissão de poluentes mostra, contudo, que os valores desses parâmetros correspondentes ao ciclo ótimo de Webster não são muito maior que os valores mínimos, o que permite concluir que o valor do ciclo ótimo dado pela expressão de Webster é satisfatório na prática.

Para avaliar os resultados do atraso e do número de paradas fornecidos pelo INTEGRATION, esses valores foram comparados com os obtidos pelas expressões de Webster e pelo método do HCM - 2000 (neste caso somente o atraso, pois o manual não apresenta expressão para o cálculo do número de paradas). Os resultados obtidos para os três casos particulares analisados são mostrados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores do atraso e do número de paradas

Método	Webster	Webster aproximado	HCM – 2000	INTEGRATION
<b><math>V_1=500\text{veic/h}</math>, <math>V_2=400\text{veic/h}</math>, <math>C=35\text{s}</math> (ótimo de Webster), <math>x=0,60</math> para os dois fluxos</b>				
Atraso no fluxo $V_1$	13,02	13,26	14,52	14,1
Atraso no fluxo $V_2$	16,2	16,69	18,22	14,9
Atraso no cruzamento	14,43	14,78	16,16	14,33
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,78	-	-	0,8
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,84	-	-	0,8
Número de paradas no cruzamento	0,8	-	-	0,8
<b><math>V_1=800\text{veic/h}</math>, <math>V_2=400\text{veic/h}</math>, <math>C=70\text{s}</math> (ótimo de Webster), <math>x=0,80</math> para os dois fluxos</b>				
Atraso no fluxo $V_1$	21,58	22,79	22,96	22,2
Atraso no fluxo $V_2$	43,09	45,27	43,16	42,7
Atraso no cruzamento	28,75	30,27	29,69	29,69
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,84	-	-	0,7
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,95	-	-	1,1
Número de paradas no cruzamento	0,87	-	-	0,83
<b><math>V_1=855\text{veic/h}</math>, <math>V_2=400\text{veic/h}</math>, <math>C= s</math> (ótimo de Webster), <math>x=0,90</math> para os dois fluxos</b>				
Atraso no fluxo $V_1$	26,09	27,38	26,50 <sup>a</sup> 23,57 <sup>b</sup>	20,9
Atraso no fluxo $V_2$	56,38	58,44	52,63 <sup>a</sup> 45,94 <sup>b</sup>	46,8
Atraso no cruzamento	35,74	37,28	34,88 <sup>a</sup> 30,70 <sup>b</sup>	29,15
Número de paradas no fluxo $V_1$	0,85	-	-	0,7
Número de paradas no fluxo $V_2$	0,96	-	-	1
Número de paradas no cruzamento	0,88	-	-	0,8

(a) Para um intervalo de análise de 15 minutos; (b) Para um intervalo de análise de 5 minutos.

Os valores do atraso fornecidos pelas expressões de Webster (ambas, a original e a simplificada, fornecem valores bastante próximos), do HCM – 2000 (calculada para um período de análise de 15 minutos) e pelo INTEGRATION são bastante próximos.

Para o caso em que  $x = 0,90$ , no entanto, os valores do INTEGRATION começam a ficar menores que os fornecidos pelos outros métodos. Isso era esperado no caso da expressão de Webster, pois a mesma não representa bem a realidade para fluxos congestionados ou próximo do congestionamento. No caso da expressão do HCM – 2000, as diferenças, embora menores, ainda são significativas. Os valores do HCM – 2000 para um tempo de análise de 5 minutos, também indicados na tabela 5.3, se mostram mais próximos dos valores fornecidos pelo INTEGRATION.

Os resultados apresentados na tabela 5.5 e na figura 5.8 permitem verificar a influência da repartição do verde no atraso e no número de paradas para o caso de  $V_1 = 800\text{veíc/h}$ ,  $V_2 = 400\text{veíc/h}$  e ciclo = 70s (ótimo de Webster).

**Tabela 5.5 - Resultados obtidos para diferentes relações do tempo de verde.**

$Ge_1 / Ge_2$	1	1,5	2	2,5	3
Atraso (s/v)	45,57	35,46	29,23	35,15	52,1
Paradas (p/v)	0,93	0,88	0,82	0,83	0,9

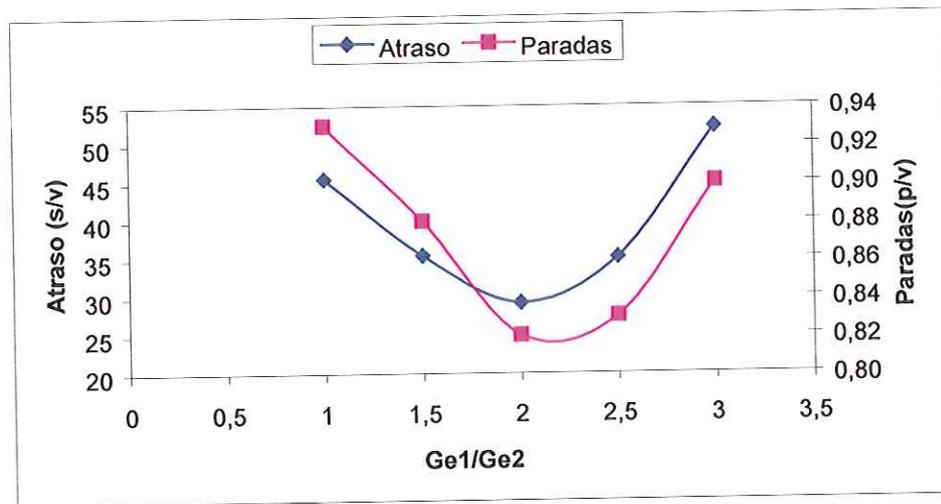


Figura 5.8 – Curvas atraso e número de paradas x relação entre os tempos de verde.

A relação  $Ge_1 / Ge_2 = 2$  corresponde a situação ótima em que os tempos de verde são distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação – o que conduz a igualdade dos índices de congestionamento e ao menor atraso no cruzamento. Como se pode observar, alterações na relação entre verdes levam a um aumento do atraso e do número de paradas, exatamente como apontam os resultados de outros modelos teóricos e de observações no campo.

### 5.3. Caso 2: semáforo isolado com conversão à esquerda

Na figura 5.9 são mostrados o esquema da interseção e o plano semafórico (diagramas de estágios, fases e tempos) empregado.



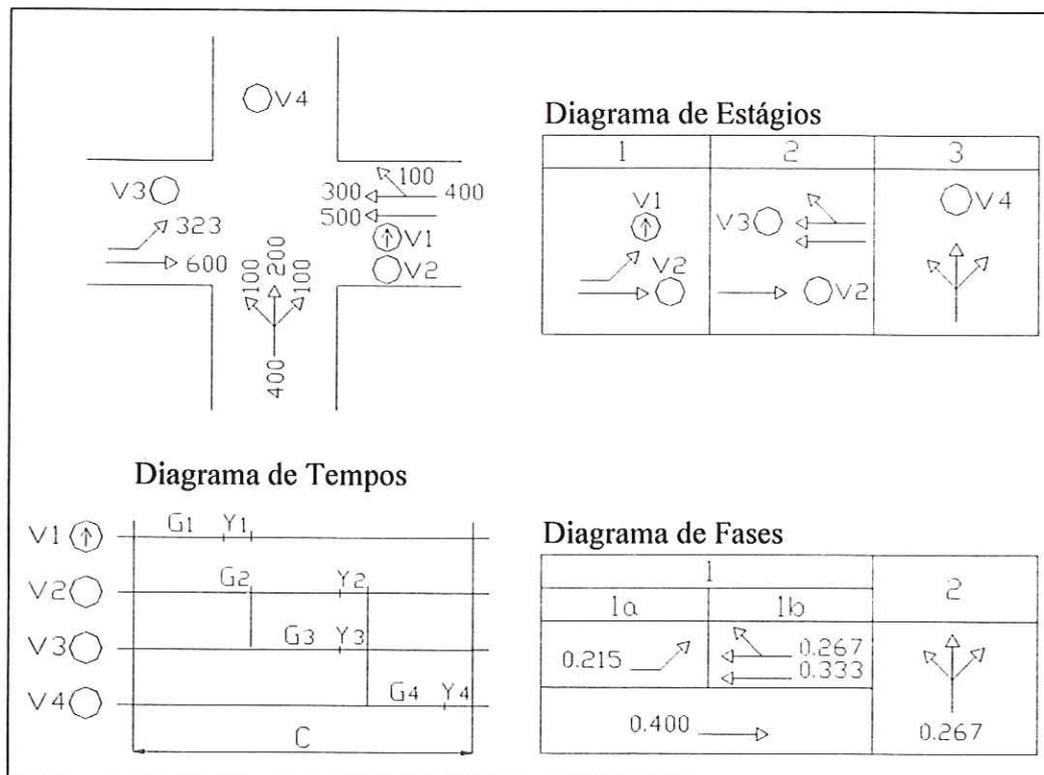


Figura 5.9 – Esquema da interseção e plano semafórico empregado.

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 30km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/h, duração do amarelo em cada fase = 3s (igual ao entreverdes), tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m.

Os valores das taxas de ocupação nas diversas faixas estão indicados na figura 5.9. O valor crítico de cada fase encontra-se assinalado com um traço em baixo e as fases críticas com um asterisco. Dessa forma, nesse caso, são três as fases críticas e, portanto, o tempo total perdido no ciclo igual a 9s.

A tabela 5.6 mostra os valores do atraso e do número de paradas para diferentes valores do tempo de ciclo. Os tempos de verde foram distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação das faixas críticas.

Tabela 5.6 - Resultados obtidos.

Duração do ciclo (seg)	Atraso (seg/veic)	Numero de paradas (par/veic)
20	78,98	1,95
30	38,3	1,34
40	23,71	1,06
50	26,44	1,03
60	25,28	0,96
70	28,1	0,96
80	25,95	0,88
90	28,33	0,88
100	30,87	0,89
120	33,97	0,85
140	40,37	0,89

As curvas do atraso e do número de paradas são mostradas na figura 5.10.

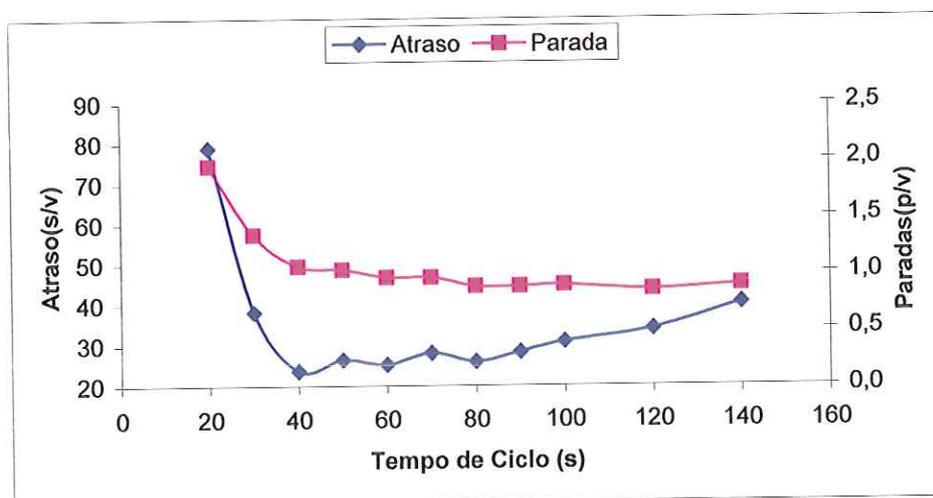


Figura 5.10 – Curvas do atraso e número de paradas x duração do ciclo.

Os resultados mostram que o atraso diminui rapidamente até o ciclo de 40s, permanece mais ou menos constante até o ciclo de 80s e, em seguida, começa a crescer

lentamente. O número de paradas cai fortemente até o ciclo de 40s, depois diminui de maneira lenta até o ciclo de 80s e, a partir daí, permanece mais ou menos constante.

Os menores valores do atraso estão na faixa entre 40 e 80s de ciclo. Os menores valores do número de paradas ocorrem a partir do ciclo de 80s. Assim, neste caso particular, o ciclo ótimo considerando os dois fatores está em torno de 80s.

O valor do ciclo ótimo calculado pela expressão de Webster é de 100s.

Também neste caso de semáforo de três fases, pode-se dizer que o valor do ciclo ótimo fornecido pela expressão de Webster se encontra bastante próximo do valor do ciclo ótimo baseado nos valores fornecidos pelo INTEGRATION. Ambos, situam-se na zona de menores valores do atraso e, também, na zona de menores valores do número de paradas.

Vale observar, no caso analisado, que se o fluxo de 600 veíc/h fosse maior que 822 veíc/h, as fases críticas do semáforo não seriam mais três, e sim duas, pois o valor da taxa de ocupação crítica correspondente ao fluxo de 600 veíc/h passaria a ser maior que 0,400. Isso influenciaria no cálculo do ciclo ótimo de Webster, uma vez que o tempo total perdido no ciclo seria de 6s (correspondente a duas fases críticas) e não mais de 9s (correspondente a 3 fases críticas).

A seguir é descrita a análise comparativa do desempenho de um semáforo com conversão à esquerda, considerando três cenários de operação distintos.

Nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13 são mostrados o esquema do cruzamento e os planos semaforicos (diagramas de estágios, fases e tempos) correspondentes aos três cenários analisados.

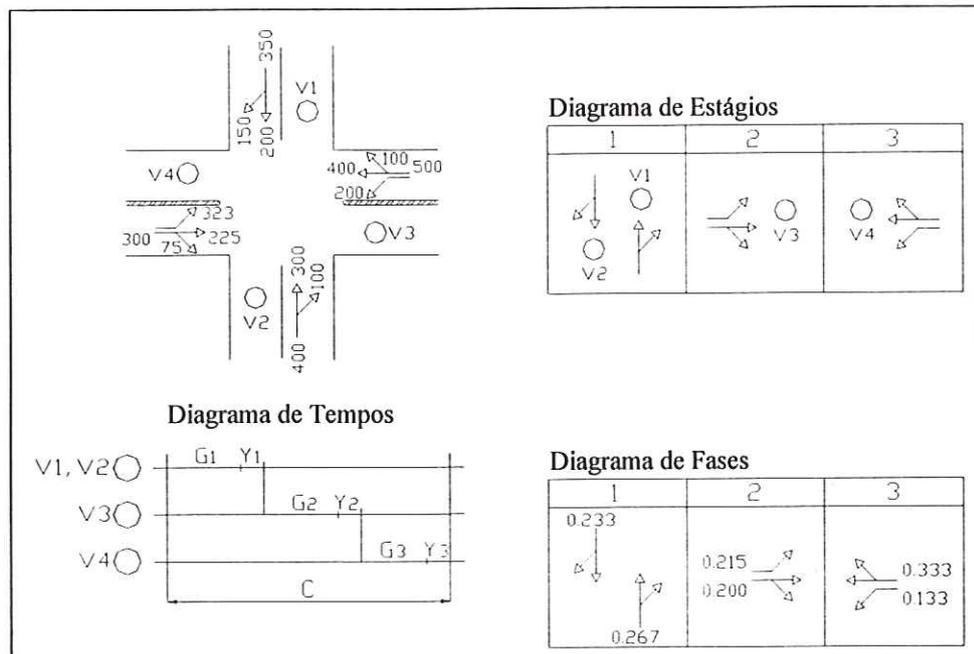


Figura 5.11 – Esquema da interseção e plano semafórico do cenário 1.

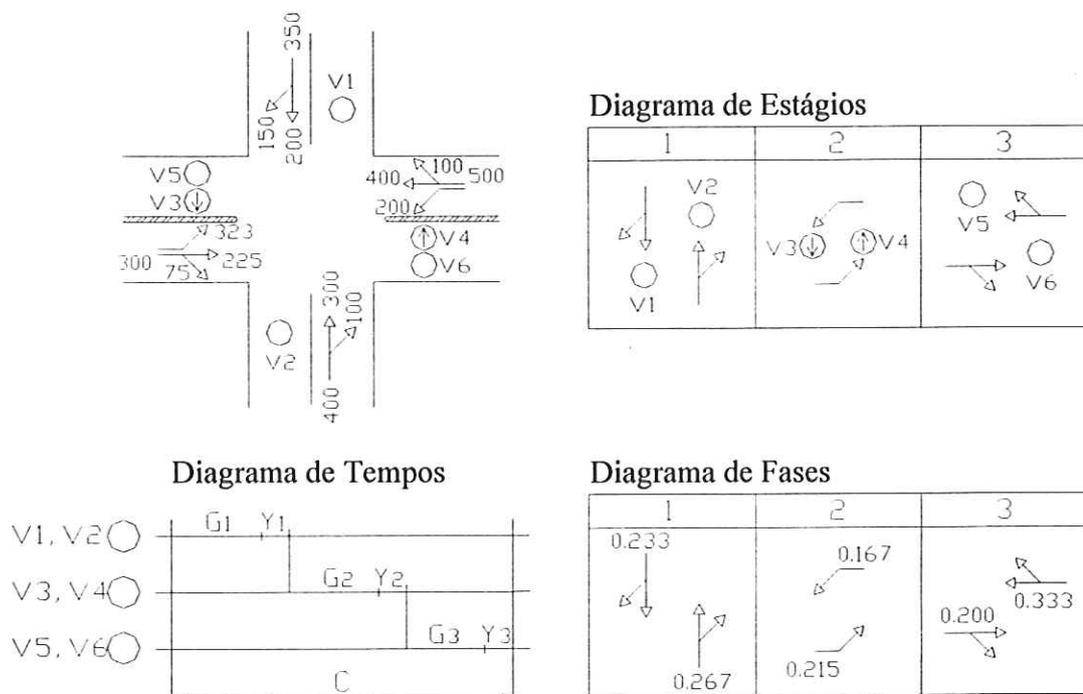
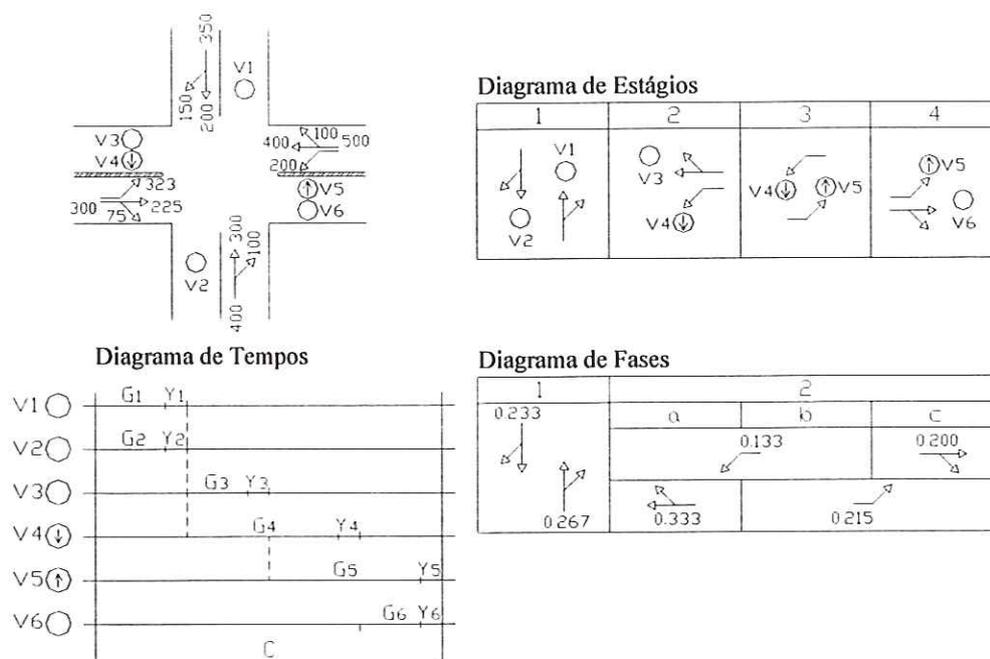


Figura 5.12 – Esquema da interseção e plano semafórico do cenário 2.

Figura 5.13 – Esquema da interseção e plano semaforico do cenário 3.



As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 30km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/h, duração do amarelo em cada fase = 3s (igual ao entreverdes), tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m.

Os valores das taxas de ocupação nas diversas faixas estão indicados figuras 5.11, 5.12 e 5.13. O valor crítico de cada fase encontra-se assinalado com um traço em baixo e as fases críticas com um asterisco. Dessa forma, nesse caso, são três as fases críticas e, portanto, o tempo total perdido no ciclo igual a 9s.

Os valores das taxas de ocupação em cada faixa também estão indicadas nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13, assim como as faixas críticas (aquelas com um traço em baixo) e as fases críticas (aquelas envolvidas com linhas mais grossas).

A tabela 5.7 mostra os valores dos ciclos ótimos calculados com a fórmula de Webster, tempos de verde ótimos, atraso e número de paradas para os três cenários.

Tabela 5.7 - Atraso e número de paradas nos três cenários.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Ciclo ótimo (seg)	100	100	100
Verde do estágios	29,80-24,01-37,18	29,80-24,01-37,18	29,80-24,01-12,74-24,44
Índice congest	0,896	0,896	0,896
Atraso (seg)	36,849	27,213	36,389
Paradas (par/veíc)	1,013	0,864	0,97

Os resultados obtidos mostram que o cenário 2 é o mais indicado. O atraso é 1,35 vezes maior no cenário 1 e 1,34 vezes maior no cenário 3. O número de paradas é 1,17 vezes maior no cenário 1 e 1,12 vezes maior no cenário 3.

### 5.4. Caso 3: dois semáforos próximos numa via de sentido único

Na figura 5.14 é mostrado o esquema da situação analisada.

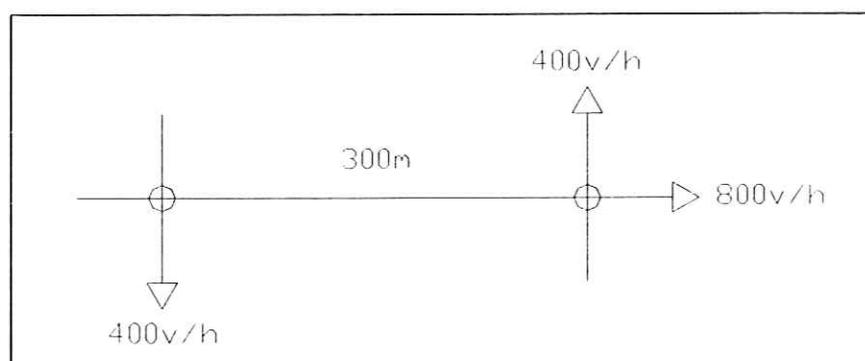


Figura 5.14 – Esquema da situação analisada.

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 39,99km/h, fluxo de

saturação por faixa = 1.500veíc/h, concentração de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo (entreverdes) em cada fase = 3s, tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m (exceto no trecho de ligação entre os semáforos onde a extensão é de 300m).

Nessas condições, o ciclo ótimo de Webster para os dois semáforos é de 70s e os tempos de verde ótimos (distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação críticas) de 42,64s para a via principal e 21,36s para as vias secundárias.

A defasagem ótima teórica entre os semáforos é de 27s.

Para verificar o impacto dos diferentes valores da defasagem (“offset”) no atraso e no número de paradas, foram realizadas simulações para vários valores distintos da defasagem, sendo os resultados mostrados na tabela 5.8 e na figura 5.15.

**Tabela 5.8 - Atraso e número de paradas x duração do ciclo.**

Defasagem (seg)	0 (70)	10	20	27	30	40	50	60
Atraso no cruzamento (seg/veíc)	38,61	35,6	31	31,2	31,8	35,1	39,9	42,1
Paradas no Cruzamento (par/veíc)	1,36	1,25	1,1	1,11	1,16	1,42	1,49	1,47
Atraso no trecho de ligação dos semáforos (seg/veíc)	17,2	10,8	4,1	2,4	2,7	12,3	22,2	23,9
Paradas no trecho de ligação dos semáforos (par/veíc)	0,8	0,4	0,2	0,2	0,3	0,8	1	0,9
Atraso na ligação com o método do HCM – 2000 (s/veíc)	17,04	10,4	4,3	1,22	3,52	11,5	19,4	24,2
Atraso na ligação através de análise gráfica (seg/veíc)	14,6	6,26	2,7	0	0,2	4,88	14,4	26,8
Paradas na ligação através de análise gráfica (par/veíc)	0,58	0,31	0,1	0	0,1	0,35	0,62	0,86

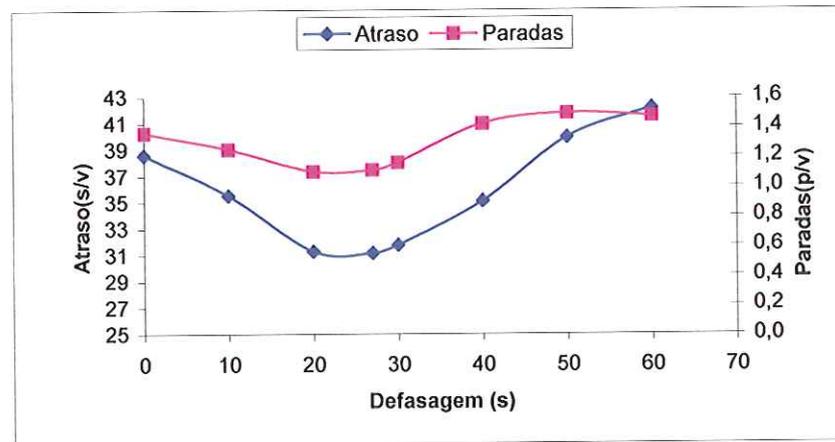


Figura 5.15 – Atraso e número de paradas x defasagem.

Na tabela 5.8 também se encontram os valores do atraso no trecho de ligação entre os dois semáforos obtidos com a método do HCM – 2000, bem como os valores do atraso e do número de paradas obtidos através da análise do gráfico de espaço x tempo do movimento dos veículos desde a saída do primeiro semáforo até a passagem pelo segundo, conforme ilustrado na figura 5.16.

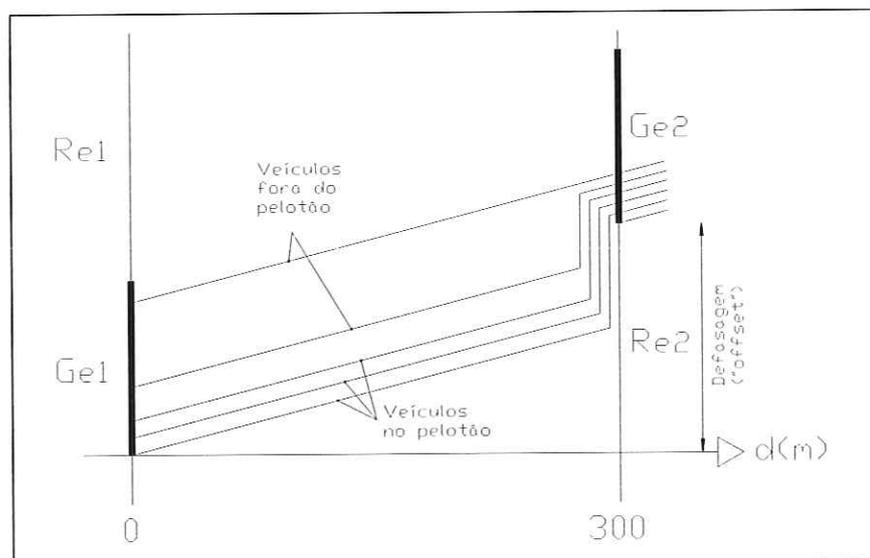


Figura 5.16 – Gráfico espaço x tempo do movimento dos veículos entre os semáforos.

Duas observações sobre os resultados obtidos. Primeiro, a boa aproximação entre os valores do atraso fornecidos pelo INTEGRATION e pelo método do HCM – 2000. Segundo, ainda que as diferenças entre os valores do atraso e do número de paradas obtidos pelo método de análise gráfica e os fornecidos pelo INTEGRATION sejam significativas – o que era esperado, pois na análise gráfica o fluxo de veículos foi considerado totalmente regular, a tendência de comportamento dos parâmetros é mantida.

Os resultados obtidos nesse caso particular mostram a vantagem da coordenação de semáforos próximos. Com a sincronização adequada há significativa redução do atraso e do número de paradas no trecho de ligação dos semáforos consecutivos.

#### 5.5. Caso 4: dois semáforos próximos numa via de sentido duplo

Na figura 5.17 é mostrado esquema da situação analisada

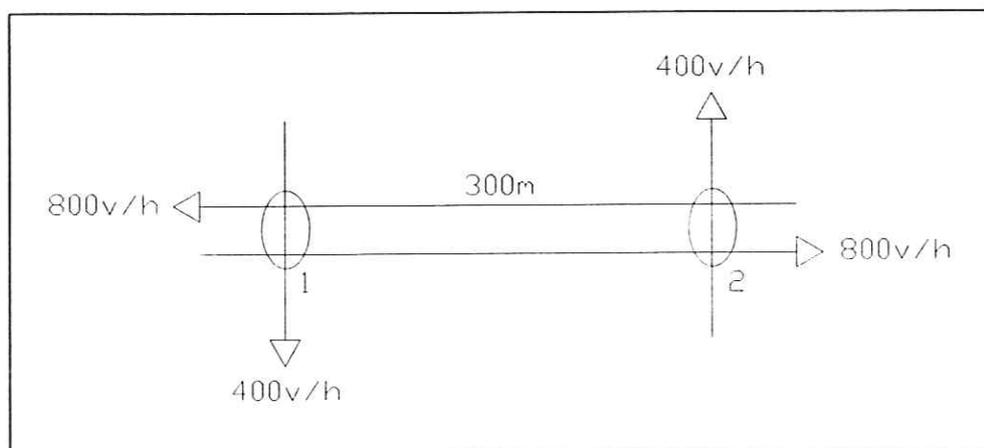


Figura 5.17 – Esquema da situação analisada.

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 40km/h, velocidade na capacidade = 39,99km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo (entreverdes) em cada fase = 3s, tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de

tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m (exceto no trecho de ligação entre os semáforos onde a extensão é de 300m).

Nessas condições, o ciclo ótimo de Webster para os dois semáforos resulta em 70s e os tempos de verde ótimos (distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação críticas) em 42,64s para a via principal e 21,36s para as vias secundárias.

A defasagem ótima teórica (do semáforo B em relação ao semáforo A) para o fluxo de A para B resulta em 27s, e no sentido de B para A em 43s. A defasagem teórica para que a janela verde resulte igual nos dois sentidos é de 35s.

Para verificar o impacto dos diferentes valores da defasagem (“offset”) no atraso e no número de paradas, foram realizadas simulações para vários valores distintos da defasagem, sendo os resultados mostrados na tabela 5.9 e na figura 5.18.

**Tabela 5.9 - Atraso e número de paradas x defasagem.**

Defasagem (seg)	Atraso Cruzamento (seg)	Paradas Cruzamento (par/veic)	Atraso na ligação 1-2 (seg)	Paradas na ligação 1-2 (par/veic)	Atraso na ligação 2-1 (seg)	Paradas na ligação 2-1 (par-veic)
0 ou 70	37,17	1,4	17,2	0,6	25,4	0,6
10	37,15	1,39	10,8	0,4	23,7	0,9
20	33,38	1,32	4,1	0,2	22,2	1
27	31,38	1,32	2,4	0,2	15, 20	0,9
30	30,94	1,34	2,7	0,3	12, 30	0,8
35	30,46	1,38	7,4	0,6	7, 30	0,6
40	29,87	1,32	12,3	0,8	2,6	0,3
43	30,89	1,32	15,2	0,9	2,1	0,2
50	33,52	1,33	22,2	1	3,7	0,1
60	37,65	1,42	23,9	0,9	10,8	0,4

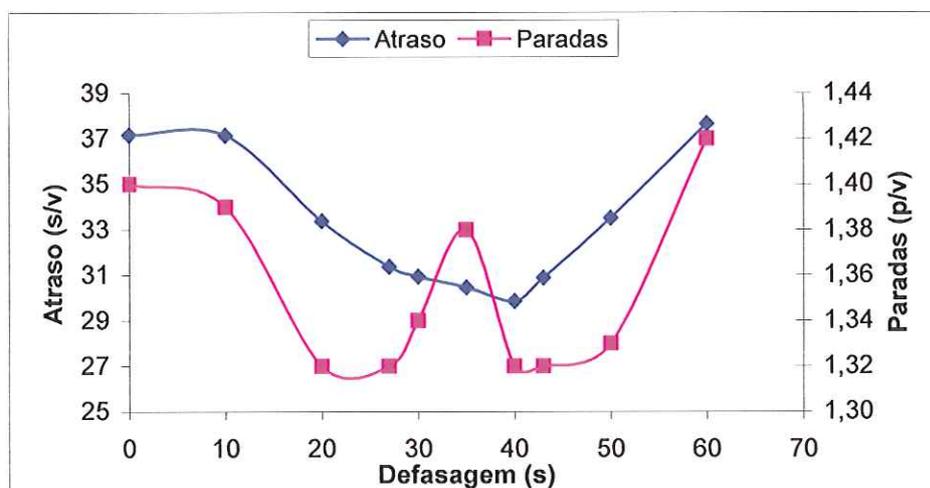


Figura 5.18 – Atraso e número de paradas x defasagem.

O atraso mínimo dos veículos na ligação 1 - 2 ocorre com uma defasagem de 27s (defasagem ótima no sentido 1 - 2). Na ligação 2 - 1, o atraso mínimo ocorre com uma defasagem de 43s (defasagem ótima no sentido 2 - 1). No tocante ao número de paradas, os menores valores na ligação 1 - 2 ocorrem entre 20 e 30s e, na ligação 2 - 1, entre 40 e 50s.

Quanto ao sistema como um todo, os menores valores do atraso ocorrem entre 27 e 43s; do número de paradas no intervalo 20 - 30s e 40 - 50s. Assim, a defasagem ótima considerando os dois fatores se localiza entre 27 e 30s ou 40 e 43s.

Esse mesmo caso também foi analisado considerando o cenário ótimo no tocante à coordenação dos semáforos - a situação em que a relação entre os valores do tempo de ciclo e da velocidade proporciona perfeita sincronização nos dois sentidos de fluxo. Nessa análise foram considerados dois cenários: mantendo o tempo de ciclo de 70s e adotando uma velocidade livre de 30,86 km/h e mantendo a velocidade livre de 40km/h e adotando um tempo de ciclo de 54s. As velocidades na capacidade foram admitidas igual a 30km/h e 39,99km/h, respectivamente.

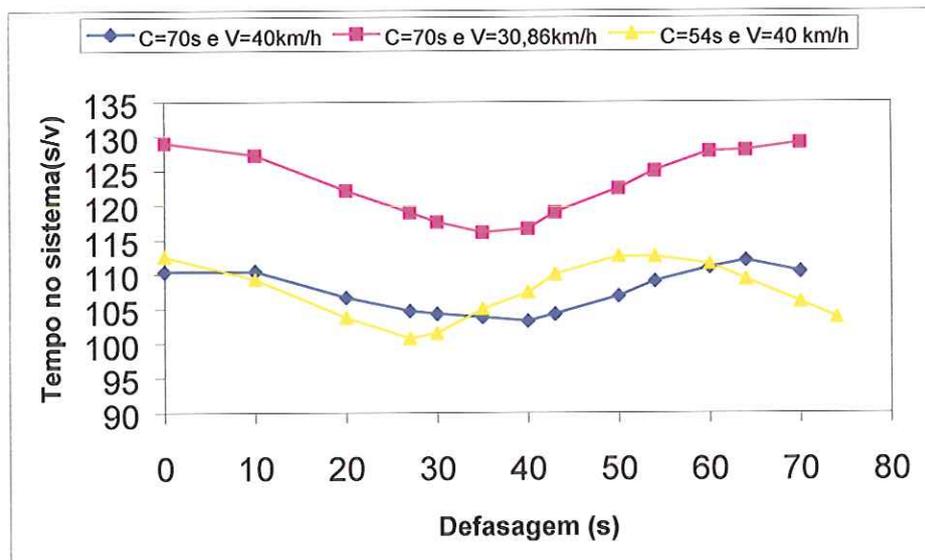
Uma vez que, num dos casos, a velocidade livre na via principal foi reduzida de 40km/h para 30,86km/h (nas vias secundárias continuou sendo de 40km/h), foi utilizado

como parâmetro de comparação do desempenho o tempo médio dos veículos na rede (sistema). Os valores obtidos encontram-se na tabela 5.10 e na figura 5.19.

**Tabela 5.10 - Tempo na rede x defasagem**

C = 70s e V = 40km/h		C = 70s e V = 30,86km/h		C = 54s e V = 40km/h	
Defasagem (seg)	Tempo na rede (s/veic)	Defasagem (seg)	Tempo na rede (s/veic)	Defasagem (seg)	Tempo na rede (s/veic)
0	110,38	0	129,07	0	112,58
10	110,45	10	127,3	10	109,28
20	106,66	20	122,16	20	103,74
27	104,71	30	117,6	27	100,74
30	104,29	35	116,07	30	101,52
35	103,81	40	116,64	40	107,41
40	103,23	50	122,43	50	112,63
43	104,25	60	127,81	54	112,58
50	106,84	70	129,07	64	109,28
60	111	-	-	74	103,74
70	110,38	-	-	-	-

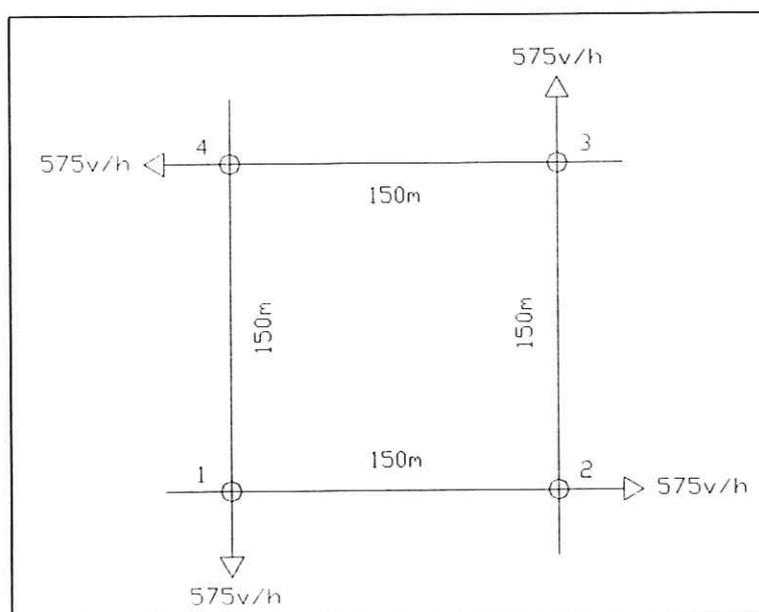
**Figura 5.19 – Tempo na rede x defasagem.**



Nos três cenários analisados, a melhor estratégia de operação corresponde a um ciclo de 54s, velocidade livre de 40km/h e defasagem entre verdes de 27s – onde o tempo médio de percurso dos veículos na rede é de 100,74s.

### 5.6. Caso 5: rede de semáforos próximos

Na figura 5.20 é mostrado esquema da situação analisada.



**Figura 5.20 – Esquema da situação analisada.**

As premissas e parâmetros admitidos são os seguintes: fluxo constituído somente de carros, velocidade livre = 36km/h, velocidade na capacidade = 35,99km/h, fluxo de saturação por faixa = 1.500veíc/h, densidade de congestionamento = 140veíc/km, duração do amarelo (entreverdes) em cada fase = 3s, tempo perdido em cada fase = 3s, 1 faixa de tráfego para todos os fluxos e extensão dos trechos antes e depois dos semáforos = 150m.

Nessas condições, o ciclo ótimo calculado com a fórmula de Webster resulta em 60s e os tempos de verde ótimos (distribuídos proporcionalmente às taxas de ocupação críticas) em 27s para as duas vias.

O tempo de percurso entre os semáforos em condições de fluxo livre é de 15s. Assim, na condição de operação ótima teórica (os veículos chegando no semáforo seguinte no início do verde), resultam os seguintes instantes de início dos tempos verdes (começando pelo semáforo 1 e seguindo no sentido antihorário):  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 15s$ ,  $t_3 = 60s$  (0) e  $t_4 = 45s$ .

Na pior situação (os veículos chegando no semáforo seguinte no início do vermelho), os instantes de início de verde são os seguintes:  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 45s$ ,  $t_3 = 60s$  (0) e  $t_4 = 15s$ .

Além dessas duas situações, também foi analisado o caso de abertura simultânea dos tempos verdes consecutivos (caso, por exemplo, em que todos os semáforos são controlados por um único controlador). Nesse caso, os instantes de início de verde são os seguintes:  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = 0$ ,  $t_3 = 30$  e  $t_4 = 0$ .

Os resultados obtidos nas três situações analisadas são mostrados na tabela 5.11.

**Tabela 5.11 - Atraso e número de paradas nos três cenários.**

Parâmetro	Melhor situação $t_1 = 0$ , $t_2 = 15$ , $t_3 = 60$ e $t_4 = 45$ .	Pior situação $t_1 = 0$ , $t_2 = 45$ , $t_3 = 60$ e $t_4 = 15s$ .	Sit. Intermediária $t_1 = 0$ , $t_2 = 0$ , $t_3 = 30$ e $t_4 = 0$ .
Atraso (seg/veíc)	24,96	53,69	41,06
Paradas (par/veíc)	1,11	1,93	1,50

Os resultados obtidos confirmam as vantagens da coordenação de semáforos próximos que constituem uma rede. Em relação a melhor situação, o atraso fica 2,15 vezes maior na pior situação e 1,65 vezes maior na situação intermediária. No tocante ao número de paradas, os valores correspondentes são os seguintes: 1,74 vezes maior na pior situação e 1,35 vezes maior na situação intermediária.

## Capítulo 6

# ESTUDO DE UM TRECHO DE VIA DA CIDADE DE MANÁGUA

---

### 6.1. O município de Manágua

O município de Manágua situa-se ao longo da costa Sul do lago de Manágua, tendo por coordenadas geográficas 11°55' a 12° 09' Norte de latitude, 86° 08' a 86° 27' Oeste de longitude.

A área total do município é de 544 Km<sup>2</sup> e a área urbanizada de aproximadamente 173,7 km<sup>2</sup>. O município de Manágua está distribuído em 7 distritos. A população total estimada no município no ano de 2000 era de 1.024.850 habitantes, sendo 980.700 habitantes na área urbana. A taxa anual de crescimento da população no ano de 2001 era de 2,47%.

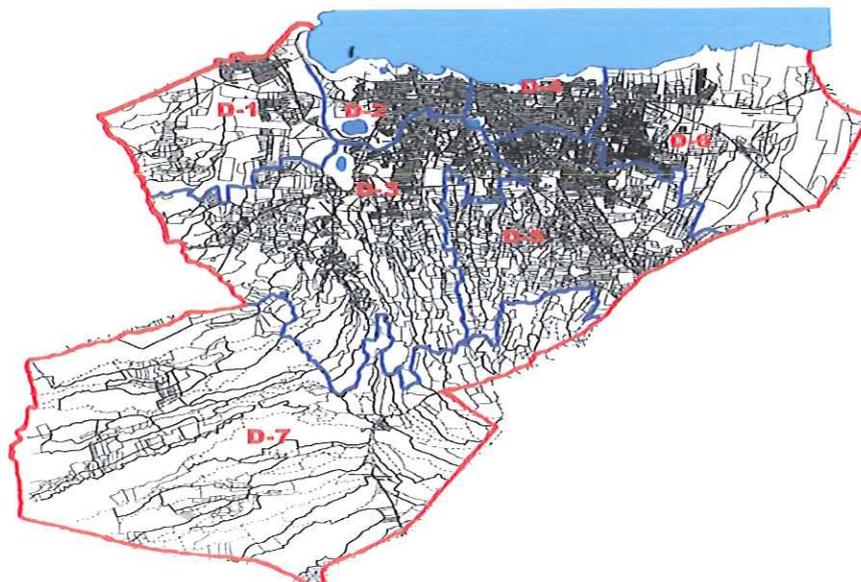


Figura 6.1 – Mapa reduzido do município e da cidade de Manágua.

## 6.2. O sistema viário e de trânsito de Manágua

De acordo com o Plano Regulador da Cidade de Manágua, o sistema viário urbano está composto, basicamente, por quatro categorias principais: sistema distribuidor primário, sistema coletor primário, sistema coletor secundário e sistema de vias locais.

Foi na década de 1960 que se instalaram em Manágua os primeiros semáforos. Atualmente são 90 semáforos, distribuídos nas principais interseções da rede viária da cidade, conforme ilustrado na figura 6.2. Desses, 84 são semáforos normais e 6 com indicação luminosa amarela intermitente. O sistema de controle é de tempo fixo, parte dos controladores eletromecânicos e parte eletrônicos. Todos os semáforos operam sem coordenação e a maioria deles se encontra em bom estado de funcionamento.

Considerando a problemática do trânsito na cidade e a necessidade de melhorar as condições de operação dos semáforos, a Prefeitura do município tem dentre seus planos o projeto da implantação de uma central de controle semaforístico, envolvendo 64 das 90 interseções semaforizadas existentes.

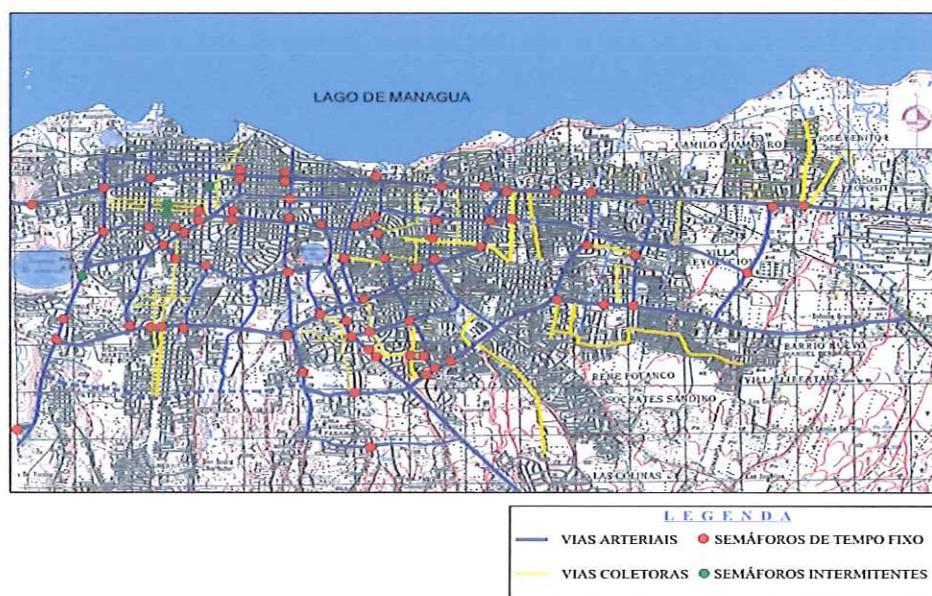


Figura 6.2 : Rede de semáforos da cidade de Manágua

### 6.3. O trecho de via estudado

Esse trecho é composto pela avenida principal Ruben Dário e as vias transversais Rua 27 S-E, Rua 41 S-E, Rua 37 Diagonal S-E, Rua 23 Diagonal S-E, Rua 33 Diagonal S-E, Rua 32 S-E e Avenida Cardenal Obando Bravo. É um dos locais da cidade que apresenta maior congestionamento nas horas de maior movimento, por ser a Avenida Ruben Dário uma via arterial com grande concentração de comércio e serviços.

As características geométricas das vias que compõem o trecho estudado são as seguintes:

- Avenida Ruben Dário (Distribuidora primária) - Via arterial principal com 18,0m de largura total, dividida por canteiro central de 1,0m, com duas faixas de tráfego por sentido e sem faixa de estacionamento.
- Rua 27 S-E (via local) - Via secundária de duplo sentido, com 10,0m de largura, com uma faixa de tráfego por sentido e sem faixa de estacionamento.
- Avenida Cardenal Obando Bravo (coletora primária) - Esta avenida é considerada uma via arterial, mais funciona como via secundária com 14,0m de largura total, dividida por canteiro central de 1,0m, com duas faixas de tráfego por sentido e sem faixa de estacionamento.
- Rua 33 Diagonal S-E (via local) - Via secundária de duplo sentido, com 10,0m de largura, com uma faixa de tráfego por sentido e sem faixa de estacionamento.
- Rua 23 Diagonal S-E (via local) - Via secundária de duplo sentido com 8,0m de largura, com uma faixa de rolamento por sentido e sem faixa de estacionamento.

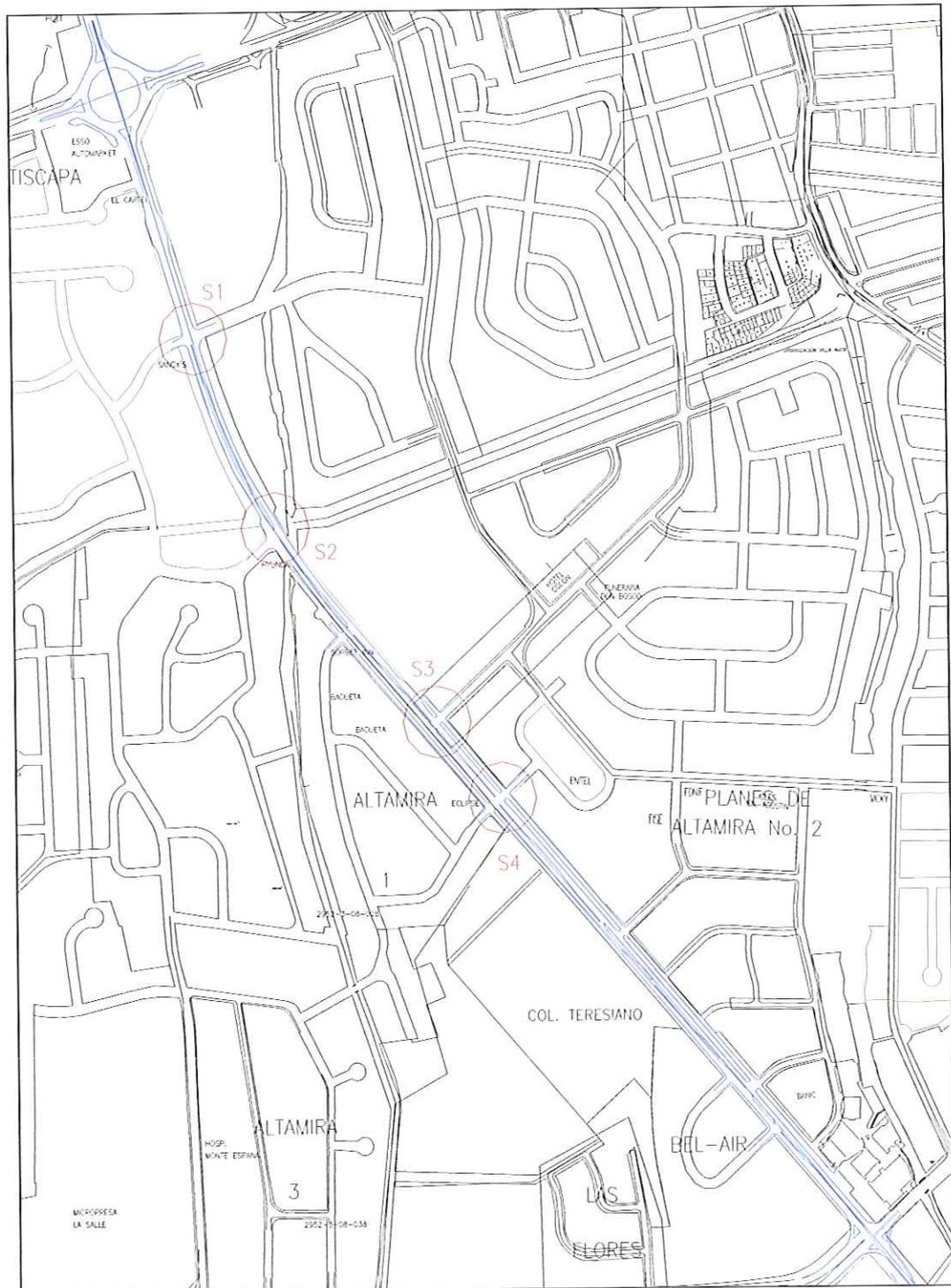


Figura 6.3 – Mapa com indicação do trecho de via estudado. .

O trecho estudado possui 4 interseções semaforizadas, denominadas da seguinte forma:

- Semáforo 1 – Sandys: Avenida Ruben Dário - Rua 27 S-E.
- Semáforo 2 - *Entrada a Los Robles*: Avenida Rubén Dário – Avenida Cardenal Obando Bravo.
- Semáforo 3 - Lacmiel: Avenida Ruben Dário – 33 Diagonal S-E.
- Semáforo 4 - *Entrada a la Embajada de México*: Avenida Ruben Dário- Rua 23 Diagonal S-E.

As características de operação dos semáforos são mostradas na figura 6.4 e na tabela 6.1.

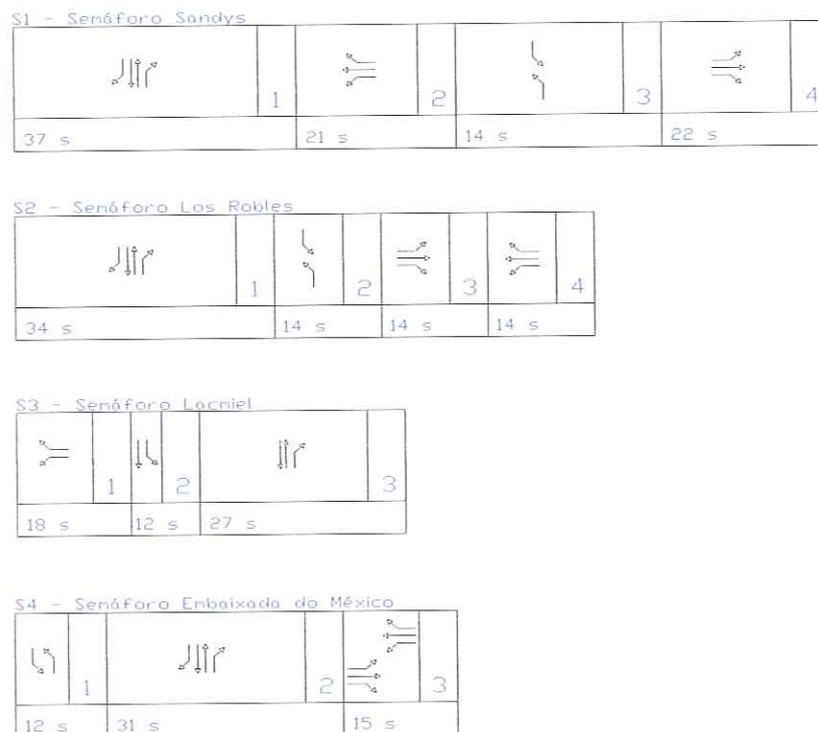


Figura 6.4 – Características da operação dos semáforos.

**Tabela 6.1 – Características da operação dos semáforos**

Semáforos	Ciclo	Fases	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	T/perdido
1	106s	4	37s	21s	14s	22s	12s
2	88s	4	34s	14s	14s	14s	12s
3	66s	3	18s	12s	27s		9s
4	67s	3	12s	31s	15s		9s

Na figura 6.5 são mostradas as diversas ligações (links) do trecho de via estudado e na figura 6.6 as ligações e os nós.

A rede completa é composta por 15 nós, divididos em 5 nós intermediários e 10 nós de origem e destino, 10 macro-zonas e 28 ligações.

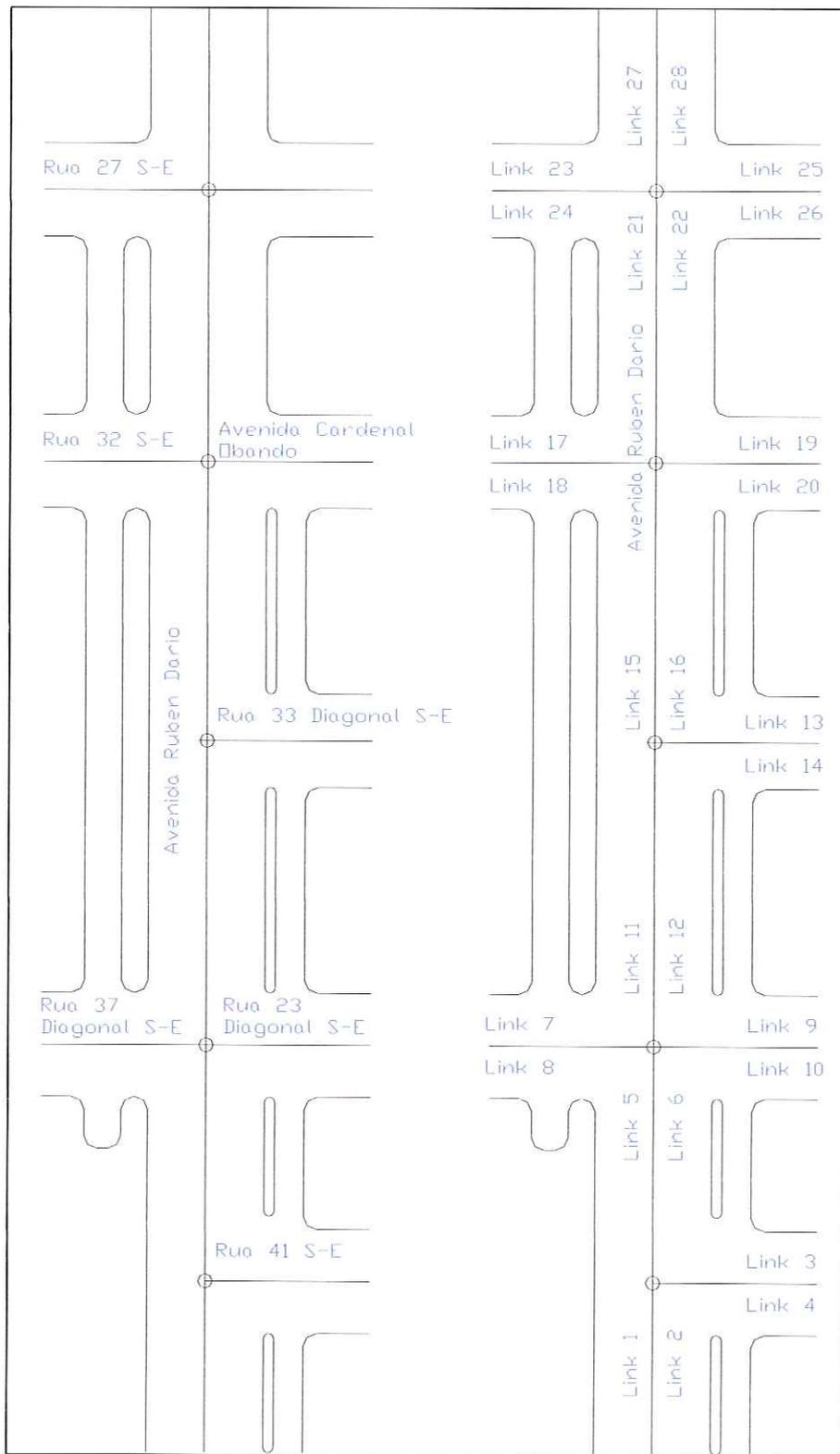


Figura 6.5 – Ligações consideradas no trecho estudado.

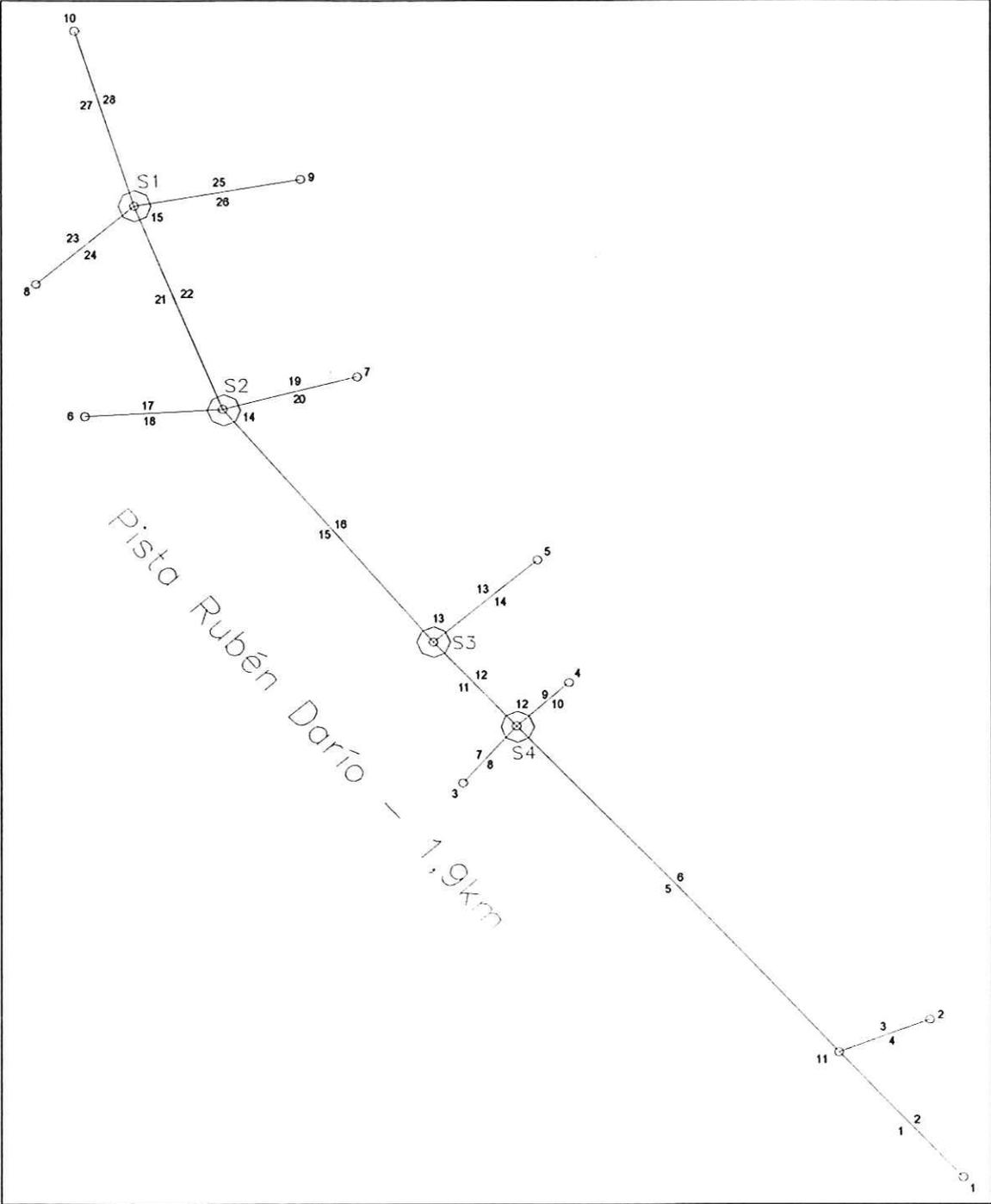


Figura 6.6 – Ligações e nós do trecho de via estudado.

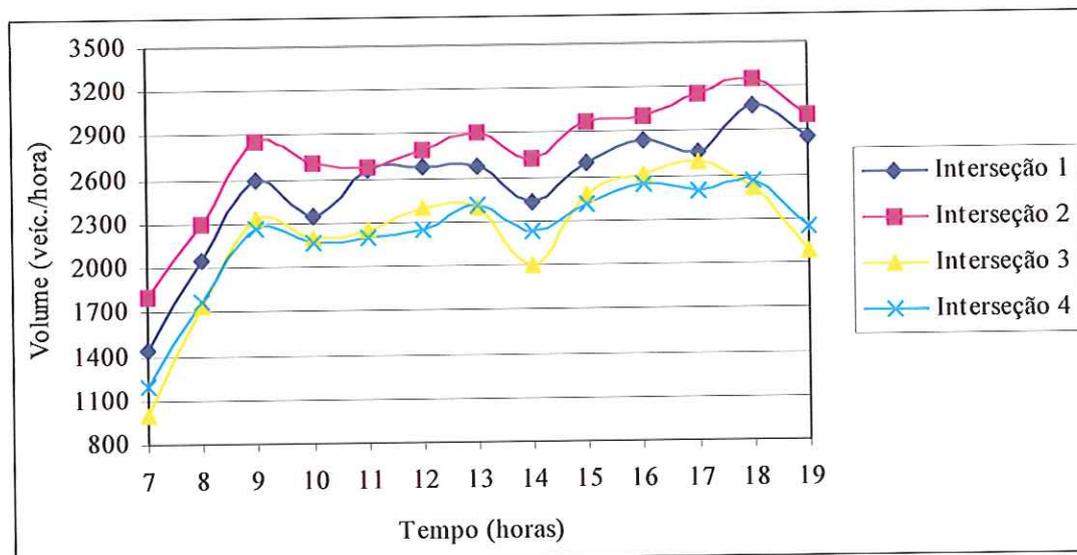
#### 6.4. Volumes de tráfego

Os volumes de tráfego foram obtidos em contagens realizadas no ano 2001, em 3 dias consecutivos, durante 12 horas: das 7 da manhã às 7 da noite. Os dados foram coletados em períodos de 15 minutos.

As datas de coleta dos dados foram as seguintes:

- Interseção *Sandys*: 06/02/01, 07/02/01 e 08/02/01
- Interseção *Entrada a los Robles*: 05/02/01, 06/02/01 e 07/02/01
- Interseção *Lacmiel*: 02/02/01, 05/02/01 e 06/02/01
- Interseção *Entrada a la Embajada de México*: 30/01/01, 31/01/01 e 01/02/01.

Foram consideradas nas contagens três classes veiculares: automóveis, caminhões e ônibus. A figura 6.7 mostra a variação do volume total de veículos na hora inteira nos semáforos do trecho ao longo de um dia útil (valores médios calculados para os três dias de contagem em 12 horas consecutivas de 7 da manhã a 7 da noite).



**Figura 6.7 - Variação do volume de nos semáforos ao longo do dia.**

Para as simulações dos cenários propostos os três períodos típicos de estudo foram escolhidos baseados nas contagens no período a cada 15 minutos durante as 12 horas (7 da manhã a 7 da tarde) nos seguintes períodos:

- Pico da manhã: das 11:45 às 12:45.
- Pico da tarde: das 17:15 às 18:15.
- Fora do pico: das 7:00 às 8:00.

Na figura 6.8 estão indicados os valores dos volumes de tráfego correspondentes aos três períodos típicos do dia considerados no estudo.

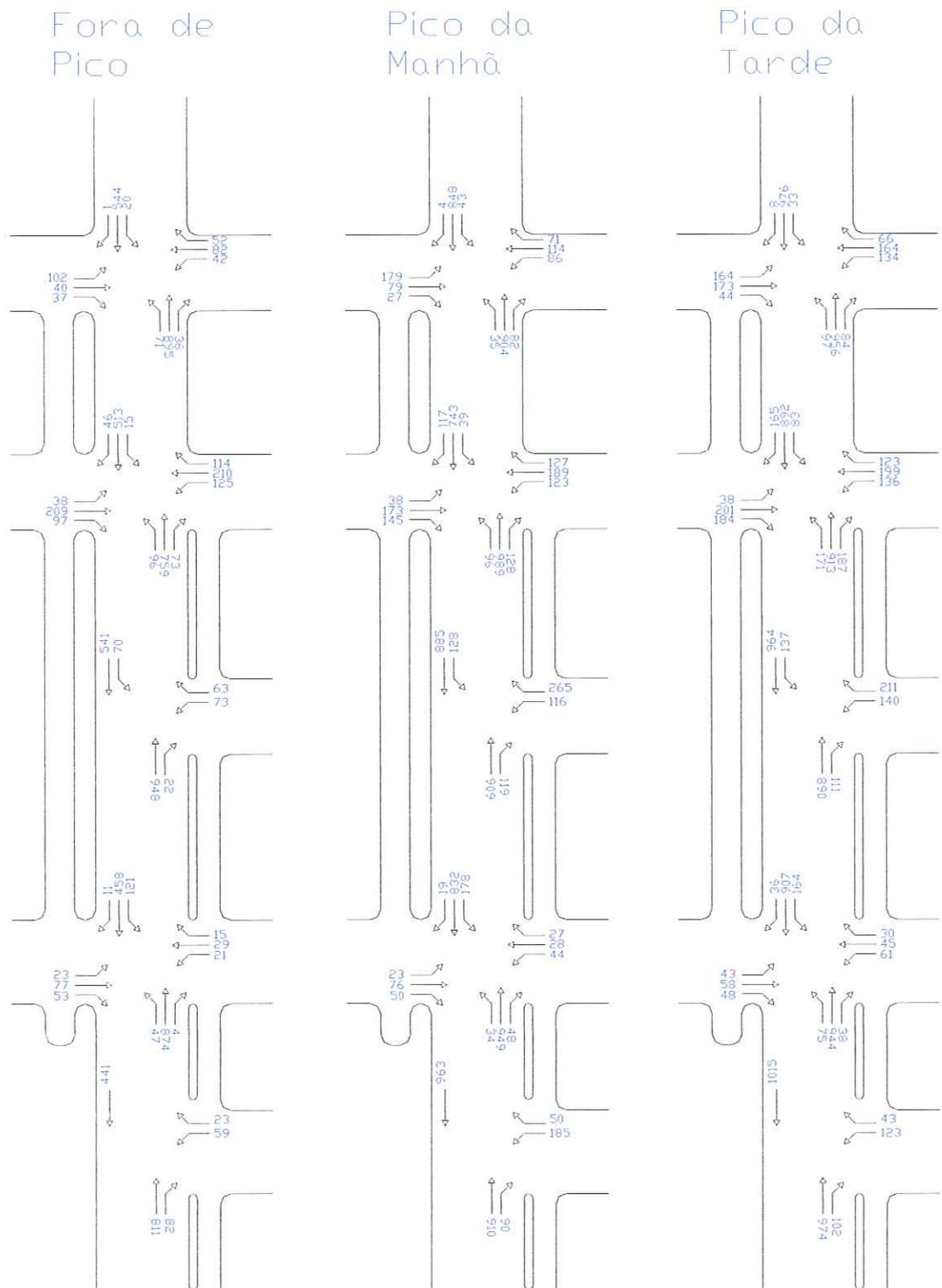


Figura 6.8 – Volumes de tráfego nos três períodos estudados.

A porcentagem de caminhões e ônibus obtida na contagem foi de cerca de 10% do total.

As tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 mostram os volumes de tráfego nas diversas ligações para cada um dos períodos típicos estudados, bem como a extensão das ligações, o nome da via onde se encontram e a classificação da via.

**Tabela 6.2 - Volume de tráfego no pico da manhã**

Link	Volume de tráfego (v/h)	Distancia (m)	Nome da via	Classificação da via
1	1138	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
2	1076	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
3	166	120	Rua 41 S-E	Via local
4	102	120	Rua 41 S-E	Via local
5	1016	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
6	1057	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
7	156	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
8	149	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
9	136	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
10	260	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
11	1104	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
12	1001	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
13	351	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via local
14	248	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via Local
15	1212	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
16	1271	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
17	535	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
18	423	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
19	458	180	<i>Avenida Cardinal Obando</i>	Coletora Primaria
20	471	180	<i>Avenida Cardinal Obando</i>	Coletora Primaria
21	1137	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
22	1139	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
23	269	160	Rua 27 S-E	Via local
24	381	160	Rua 27 S-E	Via local
25	347	210	Rua 27 S-E	Via local
26	292	210	Rua 27 S-E	Via local
27	1017	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
28	1186	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria

Tabela 6.3 - Volume de tráfego no pico da tarde.

Link	Volume de tráfego ( v/h )	Distancia ( m )	Nome da via	Classificação da via
1	1148	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
2	1000	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
3	235	120	Rua 41 S-E	Via local
4	90	120	Rua 41 S-E	Via local
5	926	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
6	1031	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
7	81	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
8	149	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
9	99	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
10	302	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
11	1001	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
12	1028	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
13	381	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via local
14	247	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via Local
15	1011	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
16	1213	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
17	402	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
18	356	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
19	439	180	<i>Avenida Cardenal Obando</i>	Coletora Primaria
20	340	180	<i>Avenida Cardenal Obando</i>	Coletora Primaria
21	961	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
22	1021	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
23	153	160	Rua 27 S-E	Via local
24	285	160	Rua 27 S-E	Via local
25	271	210	Rua 27 S-E	Via local
26	204	210	Rua 27 S-E	Via local
27	895	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
28	1154	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria

Tabela 6.4 - Volume de tráfego no período de baixa demanda.

Link	Volume de tráfego ( v/h )	Distancia ( m )	Nome da via	Classificação da via
1	500	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
2	893	230	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
3	82	120	Rua 41 S-E	Via local
4	82	120	Rua 41 S-E	Via local
5	532	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
6	925	600	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
7	87	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
8	153	100	Rua 37 Diagonal S-E	Via local
9	65	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
10	202	90	Rua 23 Diagonal S-E	Via local
11	614	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
12	970	160	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
13	136	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via local
14	92	170	Rua 33 Diagonal S-E	Via Local
15	735	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
16	928	410	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
17	352	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
18	344	170	Rua 32 S-E	Coletora Primaria
19	449	180	<i>Avenida Cardenal Obando</i>	Coletora Primaria
20	297	180	<i>Avenida Cardenal Obando</i>	Coletora Primaria
21	623	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
22	1002	290	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
23	154	160	Rua 27 S-E	Via local
24	179	160	Rua 27 S-E	Via local
25	176	210	Rua 27 S-E	Via local
26	96	210	Rua 27 S-E	Via local
27	565	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria
28	1049	250	<i>Avenida Ruben Dario</i>	D. Primaria

Nas figuras 6.9, 6.10 e 6.11 encontram-se representados os valores dos volumes em cada ligação nos diversos períodos típicos considerados no estudo.

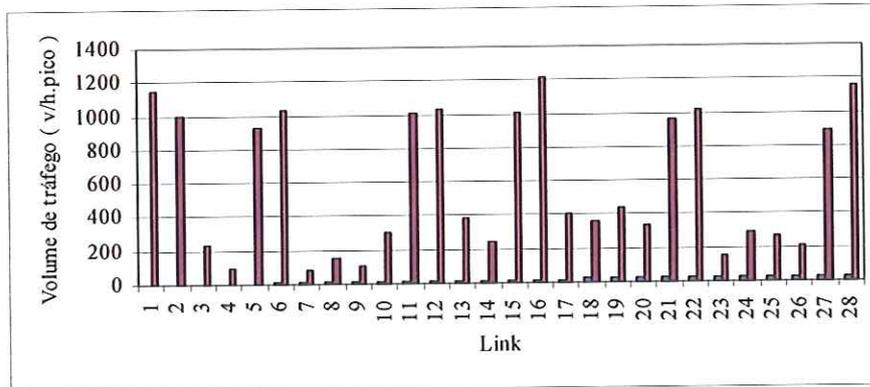


Figura 6.9 - Volume de tráfego nas ligações no pico da manhã.

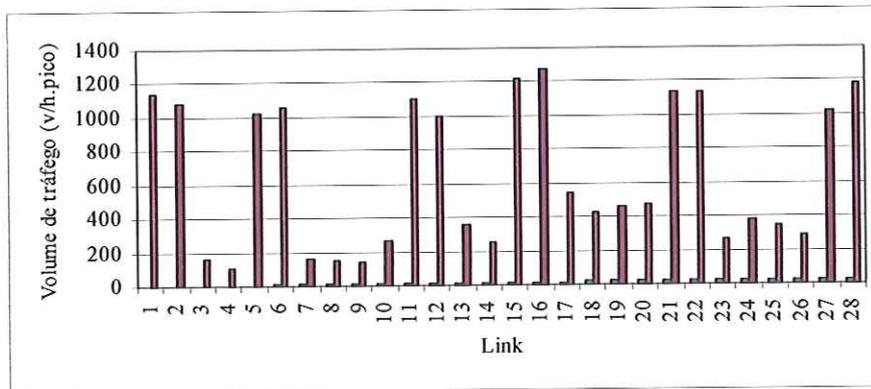


Figura 6.10 - Volume de tráfego nas ligações no pico da tarde.

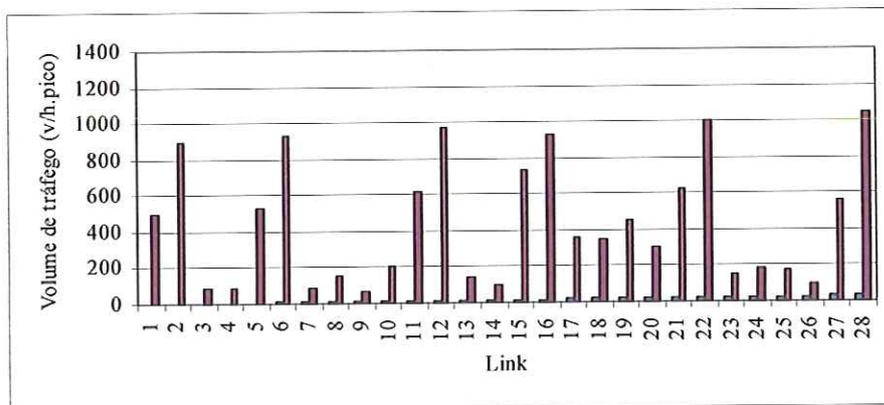


Figura 6.11 – Volume de tráfego nas ligações no período de baixa demanda.

### 6.5. Matriz origem-destino

Para a utilização do simulador INTEGRATION é necessário conhecer a matriz origem – destino das viagens realizadas pelos veículos. Para a geração dessa matriz a partir dos volumes de tráfego nas ligações, foi utilizado o modelo QUEENS OD - um programa de computador que gera a matriz origem – destino a partir dos fluxos observados nas ligações, na porcentagem de conversões nos cruzamentos e no tempo de viagem em cada ligação.

Na figura 6.12 é mostrado o processo de funcionamento do modelo *QUEENS OD*, bem como os dados de entrada necessários.

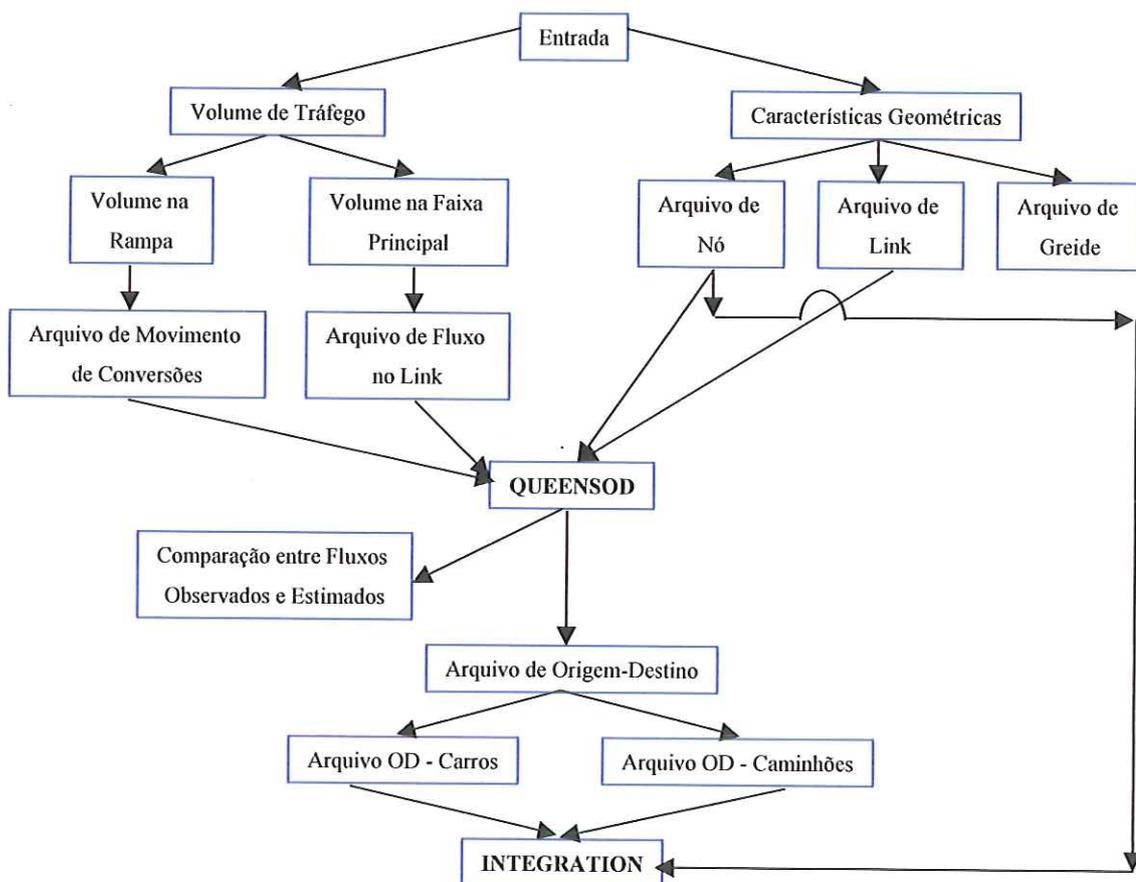


Figura 6.12 – Processo de funcionamento do modelo QUEENS OD.

O *QUEENS OD* possui a capacidade de encontrar soluções para redes com mais de 1.000 zonas e 5.000 ligações.

As matrizes origem – destino geradas no estudo do trecho de via da cidade de Manágua encontram-se no anexo B.

### 6.6. Hipóteses adotadas na simulação

As seguintes premissas e parâmetros foram admitidos na simulação:

- Fluxo constituído apenas de automóveis (a percentagem de caminhões e ônibus como visto é pequena – cerca de 10%).
- Velocidade em fluxo livre = 50km/h.
- Velocidade na capacidade = 37,50km/h (75% da velocidade em fluxo livre).
- Fluxo de saturação por faixa = 1500veíc/h.
- Densidade de congestionamento = 140 veíc/km.
- Duração do amarelo em cada fase = 3s (igual a do entreverdes).
- Tempo perdido em cada fase semafórica = 3s.

### 6.7 Trecho viário modelado no INTEGRATION

A figura 6.13 mostra o trecho modelado no INTEGRATION, o qual foram utilizados 5 arquivos de entrada , arquivo mestre, nós, link, semáforos, demanda, incidentes.

E importante mencionar que a validação da corrente de tráfego somente se realizou no análise visual através da animação do INTEGRATION do comportamento dos veículos e de suas manobras. Para uma validação mais detalhada seria necessário comparar por exemplo para Demarchi [2000] o INTEGRATION permite, a critério do usuário incorporar um certo grau de variabilidade na velocidade dos veículos e também introduzir aleatoriedade no processo de geração de veículos.

A velocidade média dos veículos é normalmente determinada pela relação fluxo-velocidade e pelas condições de tráfego.

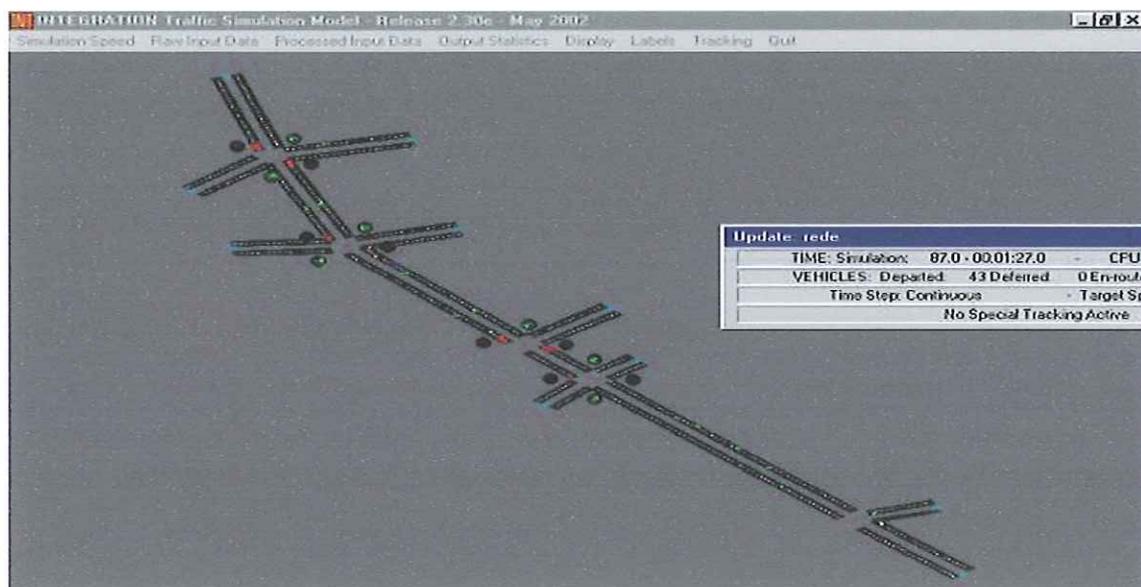


Figura 6.13 – Trecho modelado no INTEGRATION

## 6.8. Definição dos cenários a serem simulados

Inicialmente, foram calculados os índices de congestionamento dos semáforos na condição atual de operação (situação 1), e constatado, conforme tabela 6.5, que nos horários de pico três deles (1,2 e 4) estão congestionados e um deles (3) com um índice de congestionamento já bastante elevado. Dois deles (1 e 2) estão congestionados mesmo no período de baixa demanda.

Numa segunda etapa, foram analisados os comportamentos dos semáforos com a duração dos ciclos e das fases determinadas com base no método de Webster e sem conversão à esquerda, exceto no semáforo 3 onde tal procedimento não pode ser adotado (situação 2). Os resultados também se encontram na tabela 6.5. Mesmo sem conversão à esquerda, os semáforos 1 e 2 mostram-se congestionados no período de pico da tarde, e o semáforo 2 praticamente congestionado no período de pico da manhã.

Esses resultados mostram que não é possível melhorar o desempenho do tráfego de veículos no trecho apenas com medidas operacionais (adequação da duração dos tempos e eliminação da conversão à esquerda).

Para a melhoria do desempenho do tráfego é necessário aumentar duas faixas de tráfego em cada sentido, conforme mostram os valores dos índices de congestionamento indicados na tabela 6.5, referentes à situação com conversão à esquerda (situação 3) e sem conversão à esquerda (situação 4), com a duração do ciclo e das fases calculadas com o método de Webster.

**Tabela 6.5 Índices de congestionamento**

Semáforos	Horário	Sandys	Robles	Lacmiel	E.México
Situação 1 (situação existente)	Pico manhã	1,17	1,37	0,92	1,05
	Pico tarde	1,38	1,37	0,95	1,06
	Fora pico	1,00	1,11	0,67	0,90
Situação 2 (existente sem conversão)	Pico manhã	0,82	0,99	0,92	0,70
	Pico tarde	1,03	1,28	0,79	0,78
	Fora pico	0,68	0,79	0,67	0,61
Situação 3 (2 faixas a + e com conv.)	Pico manhã	0,70	0,81	0,60	0,55
	Pico tarde	0,87	0,88	0,60	0,58
	Fora pico	0,55	0,71	0,39	0,47
Situação 4 (2 faixas a + e sem conv.)	Pico manhã	0,71	0,81	0,60	0,60
	Pico tarde	0,89	0,90	0,60	0,64
	Fora pico	0,56	0,68	0,38	0,51

### 6.9. Cenários simulados

Os cenários simulados são descritos a seguir:

- **Cenário 0** - Cenário atual, com os volumes de tráfego, número de faixas e características de operação dos semáforos existentes.

- **Cenário 1** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), conversões à esquerda mantidas, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e não existência de coordenação entre os semáforos.
- **Cenário 2** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), eliminação das conversões à esquerda, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e não existência de coordenação entre os semáforos. Nesse cenário, foi admitido que os veículos que faziam conversão à esquerda passaram a realizar as seguintes manobras: conversão à direita, percurso do primeiro tramo da via secundária, meia volta (retorno) e percurso de volta pela via secundária.
- **Cenário 3** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), conversões à esquerda mantidas, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e existência de coordenação entre os semáforos no sentido Norte – Sul da Avenida Ruben Dário). Nesse cenário, as durações dos ciclos dos semáforos foram admitidas iguais ao maior valor considerando os semáforos isolados, ou metade desse valor, no caso do ciclo do semáforo isolado ser menor ou muito próximo da metade).
- **Cenário 4** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), eliminação das conversões à esquerda, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e existência de coordenação entre os semáforos no sentido Norte – Sul da Avenida Ruben Dário). Nesse cenário, as durações dos ciclos dos semáforos foram admitidas iguais ao maior valor considerando os semáforos isolados, ou metade desse valor, no caso do ciclo do semáforo isolado ser menor ou muito próximo da metade).
- **Cenário 5** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), conversões à esquerda mantidas, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e existência de coordenação entre os semáforos no sentido Sul – Norte da Avenida Ruben Dário). Nesse cenário, as durações dos ciclos dos semáforos

foram admitidas iguais ao maior valor considerando os semáforos isolados, ou metade desse valor, no caso do ciclo do semáforo isolado ser menor ou muito próximo da metade).

- **Cenário 6** - Aumento de duas faixas de tráfego na via principal (Avenida Ruben Dário), eliminação das conversões à esquerda, programações semaforicas determinadas pelo método de Webster e existência de coordenação entre os semáforos no sentido Sul - Norte da Avenida Ruben Dário). Nesse cenário, as durações dos ciclos dos semáforos foram admitidas iguais ao maior valor considerando os semáforos isolados, ou metade desse valor, no caso do ciclo do semáforo isolado ser menor ou muito próximo da metade).

#### 6.10. Programações semaforicas

As tabelas 6.6a, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 mostram as programações semaforicas utilizadas nas simulações dos sete cenários em cada um dos três períodos do dia estudados.

**Tabela 6.6 – Cenário 0 (mesmos valores em todos os períodos).**

Semáforos	Ciclo	Fases	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	T/perdido
1	106s	4	37s	21s	14s	22s	12s
2	88s	4	34s	14s	14s	14s	12s
3	66s	3	18s	12s	27s		9s
4	67s	3	12s	31s	15s		9s

**Tabela 6.7 – Cenário 1.**

Pico Manhã								
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	69,21s	4	12s	17,95s	15,03s	10,00s	14,23s
2	E.Robles	90,55s	4	12s	25,69s	15,90s	12,00s	24,96s
3	Lacmiel	46,86s	3	9s	14,43s	10,00s		13,43s
4	E.Mexico	57,00s	4	12s	15,00s	10,00s	10,00s	10,00s
Pico Tarde								
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	107,73s	4	12s	27,74s	27,62s	10,00s	30,37s
2	E.Robles	111,11s	4	12s	30,50s	19,12s	14,25s	35,24s
3	Lacmiel	46,15s	3	9s	13,75s	10,00s		13,40s
4	E.Mexico	57,02s	4	12s	15,02s	10,00s	10,00s	10,00s
Fora de Pico								
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	55,98s	4	12s	13,98s	10,00s	10,00s	10,00s
2	E.Robles	67,65s	4	12s	15,60s	15,35s	5,40s	19,30s
3	Lacmiel	41,81s	3	9s	10,00s	10,00s		12,81s
4	E.Mexico	54,84s	4	12s	12,84s	10,00s	10,00s	10,00s

**Tabela 6.8 – Cenário 2**

Pico de Manhã							
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
1	Sandys	52,86s	3	9s	15,32s	14,44s	14,10s
2	E.Robles	67,77s	3	9s	22,79s	16,82s	19,16s
3	Lacmiel	46,86s	3	9s	14,43s	10,00s	13,43s
4	E.Mexico	44,74s	3	9s	13,18s	10,00s	12,56s
Pico da Tarde							
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
1	Sandys	105,71s	3	9s	29,66s	34,70s	32,35s
2	E.Robles	108,44s	3	9s	33,86s	25,14s	40,44s
3	Lacmiel	46,15s	3	9s	13,75s	10,00s	13,40s
4	E.Mexico	46,89s	3	9s	15,15s	10,00s	12,74s
Fora de Pico							
Semáforo	Ciclo	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
1	Sandys	41,68s	3	9s	12,68s	10,00s	10,00s
2	E.Robles	49,60s	3	9s	13,34s	11,78s	15,48s
3	Lacmiel	41,81s	3	9s	10,00s	10,00s	12,81s
4	E.Mexico	40,39s	3	9s	11,33s	10,00s	10,06s

**Tabela 6.9 – Cenário 3.**

Pico manhã									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	90,55s	0	4	12s	28,48s	23,84s	3,64s	22,59s
2	E.Robles	90,55s	20,88s	4	12s	25,69s	15,90s	12,00s	24,95s
3	Lacmiel	45,00s	50,40s	3	9s	15,81s	5,48s	14,71s	
4	E.Mexico	45,00s	61,92s	4	12s	14,40s	4,33s	7,79s	6,48s
Pico tarde									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	111,11s	0	4	12s	29,40s	29,28s	8,24s	32,19s
2	E.Robles	111,11s	20,88s	4	12s	30,50s	19,12s	14,25s	35,24s
3	Lacmiel	55,55s	50,40s	3	9s	19,59s	7,87s	19,09s	
4	E.Mexico	55,55s	61,92s	4	12s	18,37s	7,67s	9,18s	8,34s
Fora de pico									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	67,65s	0	4	12s	23,50s	13,29s	5,34s	13,52s
2	E.Robles	67,65s	20,88s	4	12s	13,25s	21,42s	4,58s	16,40s
3	Lacmiel	67,65s	50,40s	3	9s	15,07s	7,79s	35,79s	
4	E.Mexico	67,65s	61,92s	4	12s	15,60s	15,35s	5,40s	19,30s

**Tabela 6.10 – Cenário 4.**

Pico Manhã									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	90,55s	61,92s	4	12s	28,48s	23,84s	3,64s	22,59s
2	E.Robles	90,55s	41,04s	4	12s	25,69s	15,90s	12,00s	24,95s
3	Lacmiel	45,00s	11,52s	3	9s	15,81s	5,48s	14,71s	
4	E.Mexico	45,00s	0	4	12s	14,40s	4,33s	7,79s	6,48s
Pico Tarde									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	111,11s	61,92s	4	12s	29,40s	29,28s	8,24s	32,19s
2	E.Robles	111,11s	41,04s	4	12s	30,50s	19,12s	14,25s	35,24s
3	Lacmiel	55,55s	11,52s	3	9s	19,59s	7,87s	19,09s	
4	E.Mexico	55,55s	0	4	12s	18,37s	7,67s	9,18s	8,34s
Fora Pico									
Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
1	Sandys	67,65s	61,92s	4	12s	23,50s	13,29s	5,34s	13,52s
2	E.Robles	67,65s	41,04s	4	12s	13,25s	21,42s	4,58s	16,40s
3	Lacmiel	67,65s	11,52s	3	9s	15,07s	7,79s	35,79s	
4	E.Mexico	67,65s	0,00	4	12s	15,60s	15,35s	5,40s	19,30s

**Tabela 6.11– Cenário 5.**

Pico da Manhã								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	67,77s	0	3	9s	20,52s	19,35s	18,90s
2	E.Robles	67,77s	20,88s	3	9s	22,79s	16,82s	19,16s
3	Lacmiel	67,77s	50,40s	3	9s	25,80s	8,96s	24,01s
4	E.Mexico	67,77s	61,92s	3	9s	25,11s	9,76s	23,9s
Pico da Tarde								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	108,44s	0	3	9s	30,49s	35,68s	33,27s
2	E.Robles	108,44s	20,88s	3	9s	33,86s	25,14s	40,44s
3	Lacmiel	54,22s	50,40s	3	9s	19,03s	7,65s	18,54s
4	E.Mexico	54,22s	61,92s	3	9s	17,49s	10,02s	14,71s
Fora de Pico								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	49,60s	0	3	9s	17,38s	12,86s	10,36s
2	E.Robles	49,60s	20,88s	3	9s	13,34s	11,78s	15,48s
3	Lacmiel	49,60s	50,40s	3	9s	10,44s	5,39s	24,77s
4	E.Mexico	49,60s	61,92s	3	9s	18,03s	6,56s	16,01s

**Tabela 6.12– Cenário 6.**

Pico Manhã								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	67,77s	61,92s	3	9s	20,52s	19,35s	18,90s
2	E.Robles	67,77s	41,04s	3	9s	22,79s	16,82s	19,16s
3	Lacmiel	67,77s	11,52s	3	9s	25,80s	8,96s	24,01s
4	E.Mexico	67,77s	0	3	9s	25,11s	9,76s	23,9s
Pico Tarde								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	108,44s	61,92s	3	9s	30,49s	35,68s	33,27s
2	E.Robles	108,44s	41,04s	3	9s	33,86s	25,14s	40,44s
3	Lacmiel	54,22s	11,52s	3	9s	19,03s	7,65s	18,54s
4	E.Mexico	54,22s	0	3	9s	17,49s	10,02s	14,71s
Fora de Pico								
	Semáforo	Ciclo	Defasagem teórica	Fases	Tempo perdido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	Sandys	49,60s	61,92s	3	9s	17,38s	12,86s	10,36s
2	E.Robles	49,60s	41,04s	3	9s	13,34s	11,78s	15,48s
3	Lacmiel	49,60s	11,52s	3	9s	10,44s	5,39s	24,77s
4	E.Mexico	49,60s	0	3	9s	18,03s	6,56s	16,01s

### 6.11. Resultados obtidos nas simulações

Nas tabelas 6.12, 6.13 e 6.14 são mostrados os resultados obtidos com o emprego do simulador INTEGRATION. Todas as simulações foram realizadas por um período de 1 hora (3600s).

**Tabela 6.13 - Resultados para o pico de manhã.**

CENÁRIOS	0			1		2	3	4	5	6
	MOES	Pico manhã	Pico tarde	For a de pico	Pico manhã					
Dist.percorrida (Km)	1,262	1,226	1,260	1,2388	1,2108	1,2781	1,2461	1,2106	1,187	
Paradas (par/veic)	3,178	3,453	2,425	2,900	2,484	2,752	3,218	2,609	2,497	
Tempo de viagem (s)	298,60	544,20	171,53	195,44	144,60	183,70	309,69	155,29	150,07	
Atraso total (s)	207,73	416,55	80,88	106,27	57,46	91,71	220,00	68,16	64,63	
Combustível (l)	0,250	0,334	0,188	0,205	0,176	0,201	0,255	0,182	0,176	
HC ( g )	0,349	0,418	0,300	0,334	0,303	0,330	0,370	0,297	0,288	
CO ( g )	7,449	7,183	7,593	8,461	8,096	8,478	8,131	7,674	7,438	
NOx ( g )	0,460	0,493	0,405	0,455	0,416	0,450	0,482	0,418	0,406	

**Tabela 6.14 - Resultados para o pico da tarde.**

CENÁRIOS	0			1	2	3	4	5	6
	MOES	Pico manhã	Pico tarde	For a de pico	Pico tarde				
Dist.percorrida (Km)	1,262	1,226	1,260	1,242	1,189	1,237	1,245	1,185	1,188
Paradas (par/veic)	3,178	3,453	2,425	3,435	2,540	3,450	3,369	2,624	2,558
Tempo de viagem (s)	298,60	544,20	171,53	385,52	163,37	371,28	399,43	172,05	173,13
Atraso total (s)	207,73	416,55	80,88	295,69	77,78	282,23	305,73	86,80	87,65
Combustível (l)	0,250	0,334	0,188	0,289	0,183	0,283	0,293	0,187	0,187
HC ( g )	0,349	0,418	0,300	0,395	0,293	0,391	0,399	0,294	0,294
CO ( g )	7,449	7,183	7,593	7,993	7,410	8,049	8,022	7,317	7,317
NOx ( g )	0,460	0,493	0,405	0,506	0,415	0,507	0,507	0,420	0,418

**Tabela 6.15 - Resultados para o período de menor demanda.**

CENÁRIOS	0			1	2	3	4	5	6
	MOES	Pico manhã	Pico tarde	for a de pico					
Dist.percorrida (Km)	1,262	1,226	1,260	1,262	1,2034	1,2141	1,2154	1,2028	1,203
Paradas (par/veic)	3,178	3,453	2,425	2,634	2,299	2,675	2,563	2,192	2,214
Tempo de viagem (s)	298,60	544,20	171,53	159,9	131,61	178,33	173,05	128,33	129,55
Atraso total (s)	207,73	416,55	80,88	69,1	45,01	90,96	85,59	41,78	42,98
Combustível (l)	0,250	0,334	0,188	0,188	0,168	0,194	0,190	0,165	0,165
HC ( g )	0,349	0,418	0,300	0,330	0,310	0,335	0,324	0,301	0,299
CO ( g )	7,449	7,183	7,593	8,881	8,673	8,837	8,483	8,382	8,288
NOx ( g )	0,460	0,493	0,405	0,439	0,403	0,441	0,428	0,390	0,393

## 6.12. Análise dos resultados

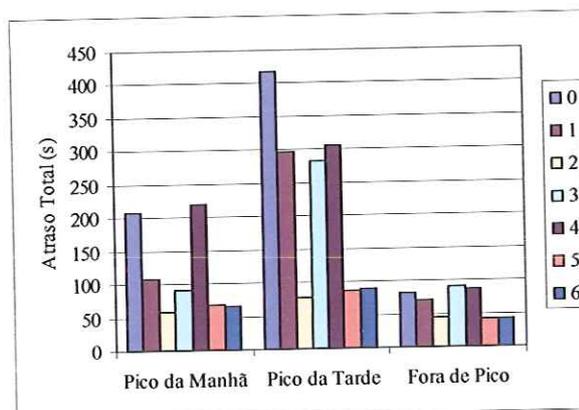
### Atraso total

A tabela 6.15 e a figura 6.13 mostram os valores de atraso para os cenários simulados.

**Tabela 6.16 – Valores do atraso.**

Cenário	Atraso total ( s )					
	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	416,551	0,00	207,734	0,00	80,875	0,00
1	295,689	29,01	106,268	48,84	69,107	14,56
2	77,776	81,33	57,461	72,34	45,007	44,35
3	282,235	32,24	91,710	55,85	90,957	-12,47
4	305,733	26,60	219,998	-5,90	85,587	-5,83
5	86,796	79,16	68,161	67,19	41,777	48,34
6	87,652	78,96	64,633	68,89	42,979	46,86

**Figura 6.14 – Valores do atraso.**



Em relação ao atraso, as conclusões são as seguintes:

- Nos períodos de pico, os três melhores cenários são (na ordem): 2, 5 e 6. O 2 se mostra superior e o 5 e o 6 praticamente equivalentes.
- No período de baixa demanda, os três melhores cenários são (na ordem): 5, 6 e 2, com pequena diferença entre eles.
- Nos períodos de pico, o pior cenário é o 4, no período de baixa demanda e o 3.

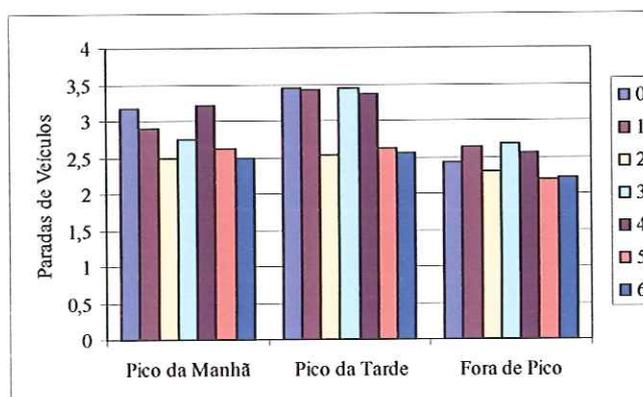
### Número de paradas

A tabela 6.16 e a figura 6.14 mostram os valores do número de paradas para os cenários simulados.

**Tabela 6.17 – Valores do número de paradas.**

Cenário	Numero de paradas ( s )					
	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	3,4534	0,00	3,178	0,00	2,425	0,00
1	3,4348	0,54	2,899	8,76	2,634	-861
2	2,5401	26,45	2,484	21,84	2,299	5,20
3	3,4504	0,09	2,752	13,40	2,675	-10,31
4	3,3694	2,43	3,218	-1,24	2,563	-5,69
5	2,6239	24,02	2,609	17,91	2,192	9,61
6	2,5578	25,93	2,497	21,42	2,214	8,70

**Figura 6.15 – Valores do número de paradas.**



Em relação ao número de paradas, as conclusões são as seguintes:

- Nos períodos de pico, os três melhores cenários são (na ordem): 2, 6 e 5. O 2 e o 6 praticamente equivalentes e o 5 inferior.
- No período de baixa demanda, os três melhores cenários são (na ordem): 5, 6 e 2. O 5 e o 6 praticamente equivalentes e o 2 inferior.
- No período de pico da manhã o pior cenário é o 4, e o 3 no pico da tarde. O pior cenário no período de baixa demanda é o 3.

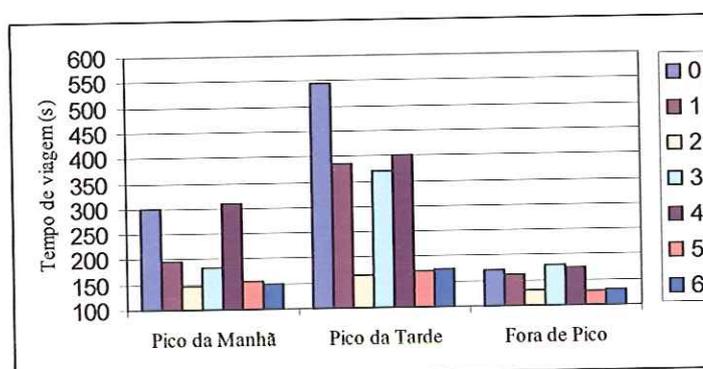
### Tempo de viagem

A tabela 6.17 e a figura 6.15 mostram os valores do tempo de viagem e da velocidade.

**Tabela 6.18 – Valores do tempo de viagem.**

Cenário	Tempo de viagem ( s )					
	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	544,20	0,00	298,60	0,00	171,53	0,00
1	385,52	29,16	195,44	34,55	159,90	6,96
2	163,37	69,98	144,60	51,57	131,61	23,27
3	371,28	31,78	183,70	38,48	178,331	-3,97
4	399,43	26,60	309,69	-3,71	173,051	-1,05
5	172,05	68,38	155,29	47,99	128,33	25,19
6	173,13	68,19	150,07	49,74	129,55	24,47

**Figura 6.16 – Valores do tempo de viagem.**



Em relação ao tempo de viagem, as conclusões são as seguintes:

- Nos períodos de pico, os três melhores cenários são (na ordem): 2, 5 e 6. O 2 se mostra superior e o 5 e o 6 praticamente equivalentes.
- No período de baixa demanda, os três melhores cenários são (na ordem): 5, 6 e 2, com pequena diferença entre eles.
- Nos períodos de pico o pior cenário é o 4, no período de baixa demanda é o 3.

### Consumo de combustível e emissão de poluentes

A tabela 6.18 e as figura 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19 mostram os valores do consumo de combustível e da emissão dos três principais produtos poluentes (Hidrocarboneto - HC, Monóxido de carbono – CO e Óxido nítrico - NOx) para os cenários simulados.

**Tabela 6.19 – Consumo de combustível e emissão de poluentes.**

Combustível (l)						
Cenário	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	0,334	0,00	0,250	0,00	0,188	0,00
1	0,289	13,45	0,205	17,84	0,188	0,00
2	0,183	45,19	0,176	29,46	0,168	10,64
3	0,283	15,24	0,255	-2,2	0,194	-3,19
4	0,292	12,55	0,201	19,44	0,190	-1,06
5	0,187	44,00	0,182	27,05	0,165	12,23
6	0,187	44,00	0,176	29,46	0,165	12,23

HC (g)						
Cenário	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	0,418	0,00	0,3485	0,00	0,3004	0,00
1	0,395	5,39	0,334	4,16	0,330	-0,85
2	0,293	29,82	0,303	13,06	0,310	-3,2
3	0,391	6,35	0,330	5,31	0,335	-11,52
4	0,399	4,43	0,370	-6,17	0,324	-7,86
5	0,294	5,39	0,297	14,78	0,301	-0,2
6	0,294	5,39	0,288	17,36	0,299	0,47

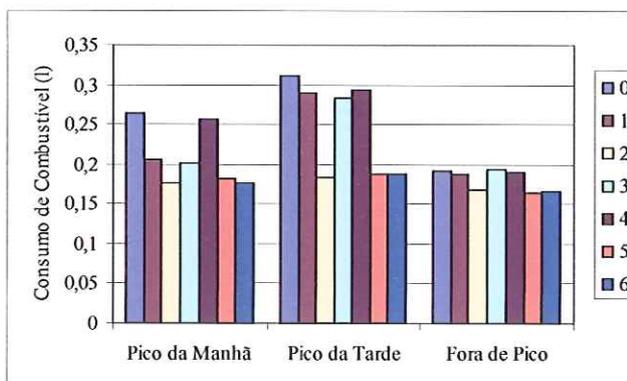
  

CO (g)						
Cenário	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	7,183	0,00	7,4494	0,00	7,5934	0,00
1	7,993	-11,28	8,461	-13,58	8,881	-16,96
2	7,410	-3,16	8,096	-8,68	8,673	-14,22
3	8,049	-12,05	8,478	-13,81	8,837	-16,38
4	8,022	-11,68	8,131	-9,15	8,483	-11,72
5	7,317	-1,86	7,674	-3,62	8,382	-10,39
6	7,317	-1,86	7,438	0,15	8,288	-9,15

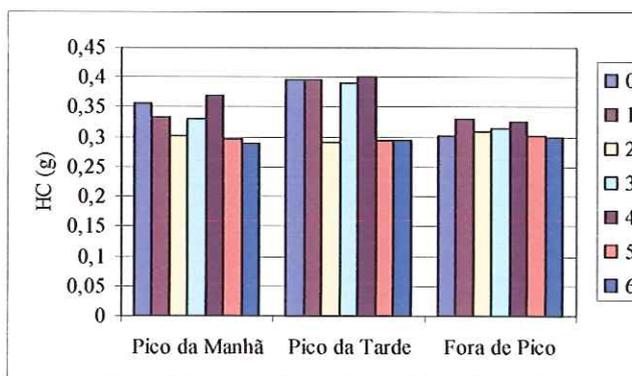
  

NOx (g)						
Cenário	Pico tarde	% redução	Pico Manhã	% redução	Fora Pico	% redução
0	0,488	0,00	0,454	0,00	0,409	0,00
1	0,506	-2,55	0,455	-13,58	0,439	-8,34
2	0,415	15,89	0,416	-8,68	0,403	0,54
3	0,507	-2,76	0,482	-13,81	0,441	-7,82
4	0,507	-2,76	0,450	-9,15	0,428	-4,65
5	0,420	14,88	0,418	-3,62	0,390	3,75
6	0,418	15,28	0,406	0,15	0,393	3,01

**Figura 6.17 – Consumo de combustível.**



**Figura 6.18 – Emissão de HC.**



**Figura 6.19 – Emissão de CO.**

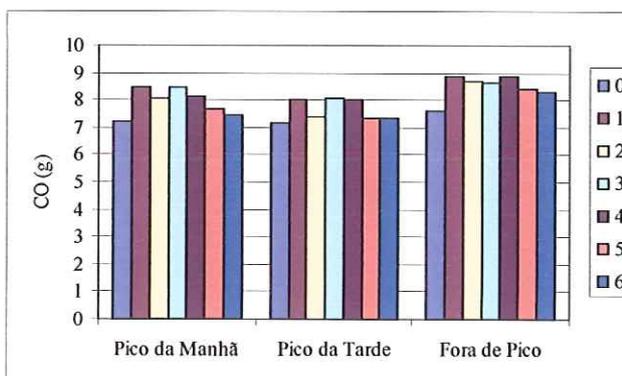
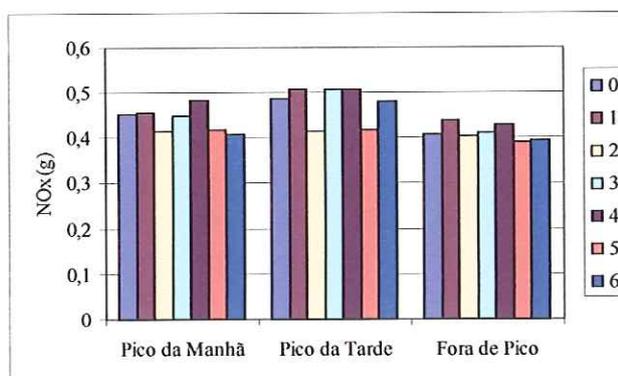


Figura 6.20 – Emissão de NO<sub>x</sub>

Em relação ao consumo de combustível, as conclusões são as seguintes:

- Nos períodos de pico, os três melhores cenários são (na ordem): 2, 6 e 5, com pequena diferença entre eles.
- No período de baixa demanda, os três melhores cenários são (na ordem): 5, 6 e 2, também com pequena diferença entre eles.
- Nos períodos de pico o pior cenário é o 4, no período de baixa demanda é o 3.

Em relação ao emissão de poluentes (HC, CO, NO<sub>x</sub>) os melhores cenários em todos os períodos são: 2, 5 e 6, com pequena diferença entre eles. E o pior cenário nos períodos de pico é o 4 e no período de baixa demanda é o 1.

### 6.13. Conclusões

Baseado na tabela 6.19 nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o cenário 2 é o mais indicado, seguido de perto pelos cenários 5 e 6 - que apresentam desempenhos praticamente equivalentes.

Tabela 6.20 Resumo das medidas de desempenho avaliadas

Medidas/ Cenários	Atraso Total	Tempo Viagem	Número Paradas	Consumo combustível	Emissão de poluentes			Total
					HC (g)	CO (g)	NOx (g)	
0						X		1
1								0
2	X	X	X	X	X		X	6
3								0
4								0
5				X				1
6					X		X	2

Isso mostra que, no caso analisado, a eliminação das conversões à esquerda, onde possível, apresentou grandes benefícios para a operação. Também mostra que a coordenação dos semáforos não traz o benefício esperado, devido à redução da eficiência individual de cada semáforo decorrente da necessidade de modificar a duração ótima do ciclo – no caso da coordenação os ciclos têm que ser iguais ou múltiplos.

#### 6.14. Nível de serviço no trecho estudado

A tabela 6.20 mostra as velocidades médias aproximadas dos veículos no trecho analisado para os três períodos estudados, considerando a situação existente e o cenário 2 (melhor cenário). Essas velocidades foram estimadas pelo quociente entre a distância média percorrida no trecho (admitida igual a 1,25km em todos os casos) e os tempos de viagem correspondentes a cada caso.

Tabela 6.21 Nível de serviço do trecho nos três períodos de estudo

Período	Situação existente		Cenário 2	
	Velocidade (km/h)	Nível de serviço	Velocidade (km/h)	Nível de serviço
Pico da tarde	8,27	F	27,54	C
Pico da manhã	15,07	E	31,12	C
Baixa demanda	26,23	C	34,19	B

Como a velocidade livre admitida em todas as vias do trecho estudado foi suposta ser de 50km/h, as vias podem ser consideradas como de classe IV. Com base nisso, pode-se determinar o nível de serviço aproximado no trecho com base nos valores da tabela 2.6 do capítulo 2.

Como se pode observar, há uma significativa melhoria da qualidade da operação em todos os períodos com a implementação do cenário 2.

A metodologia aqui utilizada para determinar o nível de serviço deve ser visto com reserva, pois na realidade ela é aplicável para a via principal; e no caso, foram considerados globalmente todos os tramos de via do trecho analisado.

## Capítulo 7

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

### **Sobre o uso do simulador INTEGRATION na simulação da operação de semáforos**

O simulador INTEGRATION mostrou ser uma ferramenta computacional de uso relativamente simples na simulação da operação de semáforos isolados ou coordenados.

A análise dos casos simples realizada no capítulo 5 mostra que os resultados obtidos com o simulador INTEGRATION são similares aos apresentados por modelos analíticos de avaliação do desempenho de semáforos, cuja validade já foi comprovada em diversos estudos realizados.

Essas constatações permitem recomendar o emprego do simulador INTEGRATION na prática, como uma importante ferramenta para os engenheiros de tráfego na busca de programações semafóricas que proporcionem maior fluidez no trânsito de veículos.

### **Sobre o estudo de caso**

Os resultados do estudo do trecho de via semaforizado da cidade de Manágua permitem inferir algumas conclusões relevantes.

A análise da situação atual do trecho mostrou dois pontos importantes: primeiro, o trânsito no local se encontra totalmente congestionado nos horários de pico; segundo,

alterações na programação de fases e tempos dos semáforos não resolvem o problema, sendo necessária a implementação de duas faixas adicionais de tráfego na via principal (uma em cada sentido).

Admitindo a implementação das duas faixas adicionais, foram gerados seis cenários de operação, numa combinação envolvendo os seguintes aspectos: semáforos isolados ou coordenados, existência de conversão à esquerda ou não e coordenação na via principal num e no outro sentido. Todos esses cenários mais o cenário correspondente à situação atual foram avaliados utilizando o simulador INTEGRATION.

No caso analisado, a eliminação das conversões à esquerda, onde possível, apresenta grandes benefícios para a operação. Por outro lado, a coordenação dos semáforos traz um pequeno prejuízo ao desempenho do sistema (ao contrário do que normalmente ocorre), devido à redução da eficiência individual de cada semáforo decorrente da necessidade de modificar a duração ótima do ciclo – no caso da coordenação os ciclos têm que ser iguais ou múltiplos.

### **Sobre conversão à esquerda em cruzamentos semaforizados**

A eliminação da conversão à esquerda em cruzamentos semaforizados traz, em geral, grande benefício à fluidez do trânsito de veículos (atraso e número de paradas). No entanto, apresenta o inconveniente de exigir maiores percursos para os veículos que desejam fazer a conversão à esquerda – seja com trajetos em forma de alça, ou com conversão à direita e retorno à frente.

No tocante ao consumo de combustível e à emissão de poluentes, as vantagens ou desvantagens de operar com fase de conversão à esquerda vão depender muito do volume de veículos que desejam realizar essa manobra.

### **Sobre novas pesquisas acerca do tema**

Como todo trabalho de pesquisa, sobretudo em nível de mestrado, muitas coisas ficaram sem possibilidade de serem abordadas no estudo. Com o propósito de eventualmente serem tratadas em outros trabalhos de investigação, algumas delas são relacionadas a seguir:

- Não foi abordado o caso dos semáforos atuados pelo tráfego.
- Os resultados do INTEGRATION para os casos simples analisados não foram comparados com os fornecidos por outros simuladores, como o TRANSYT por exemplo.
- Os resultados do INTEGRATION não foram comparados com resultados de pesquisas de campo.
- A duração do ciclo e das fases não foram investigadas para o caso de semáforos com fase exclusiva para a travessia de pedestres.
- O programa INTEGRATION foi utilizado apenas para a simulação de cenários e não para a otimização da operação – característica importante do modelo que não foi explorada neste trabalho.

*ANEXO A :*

Arquivos do INTEGRATION

---

Este anexo apresenta exemplos de arquivos de entrada de dados e arquivos de resultados gerados pelo INTEGRATION. Os arquivos possuem formato tipo texto e contém dados tabulados em colunas separadas por espaços.

Os itens a seguir mostram exemplos de arquivos utilizados para a simulação durante 3600 s.

Após a listagem de cada arquivo é apresentada uma tabela com a descrição de todos os dados listados. Essa descrição restringe-se aos dados necessários para as simulações feitas por esta pesquisa. Sendo assim, os interessados na descrição de outros dados devem consultar o manual do INTEGRATION [ Van Aerde, 2002 ].

### A.1. ARQUIVO MESTRE

O arquivo mestre contém o tempo de simulação, os nomes dos arquivos essenciais para a simulação e os nomes dos arquivos de resultados. Esses arquivos devem ser adequadamente localizados através de seus diretórios.

```
Arquivo Mestre
Trecho viário
3600 300 300 1 0
\
output\
file1.dat
file2.dat
file3.dat
file4.dat
file5.dat
none
none
none
none
file10.out
file11.out
file12.out
none
file14.out
```

Tabela A.1: Descrição dos dados do arquivo Mestre

LINHA	COLUNA	DESCRIÇÃO
1	1	Identificação do cenário estudado (até 40 caracteres)
2	1	Tempo total da simulação (s)
	2	Frequência da geração do arquivo <i>file 10</i> (s)
	3	Frequência de geração dos arquivos <i>file 12-14</i> (s)
	4	Opção de rota
	5	Opção de pausa no tempo de simulação
3	1	Nome do diretório em que se encontram os arquivos de entrada de dados
4	1	Nome do diretório em que se devem ser gerados os arquivos de resultados
5-9	1	Nome dos arquivos essenciais para a simulação
10-13	1	A palavra <i>none</i> deve aparecer nessas linhas
14	1	Nome do arquivo padrão de resultado
15-27	1	Nome dos arquivos opcionais de entrada e de saída

## A.2. ARQUIVO DE NÓS

O arquivo de nós contém as coordenadas dos nós da rede simulada, definindo quais nós constituem origem ou destino das demandas geradas.

Arquivo de Nós						
15	1	1				
1	1.36	0.24	1	-1	0	0
2	1.32	0.45	1	-2	0	0
3	0.73	0.77	1	-3	0	0
4	0.87	0.91	1	-4	0	0
5	0.83	1.07	1	-5	0	0
6	0.26	1.26	1	-6	0	0
7	0.60	1.32	1	-7	0	0
8	0.20	1.44	1	-8	0	0
9	0.53	1.60	1	-9	0	0
10	0.25	1.80	1	-10	0	0
11	1.20	0.41	4	0	0	0
12	0.80	0.85	4	0	0	0

**Tabela A.2:** Descrição dos dados contidos no arquivo de nós

LINHA COLUNA		DESCRIÇÃO
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Numero de nós do arquivo
	2	Fator de escala para as coordenadas x
	3	Fator de escala para as coordenadas y
3	1	Número identificador do nó
	2	Coordenada x do nó
	3	Coordenada y do nó
	4	Tipo de nó (origem, destino, intermediário ou origem e destino)
	5	Identificador de macro-zonas

### A.3. ARQUIVO DE TRAMOS

O arquivo de tramos contém as informações sobre os tramos da rede simulada. Essas informações se referem ao comprimento, aos nós de origem e destino e aos parâmetros que definem a relação fluxo-velocidade de cada tramo.

Arquivo de Links										
28	1	1	1	1	1					
1	11	1	0.23	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
2	1	11	0.23	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
3	2	11	0.12	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
4	11	2	0.12	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
5	12	11	0.6	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
6	11	12	0.6	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	4	-1	2	0	11111	
7	12	3	0.1	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
8	3	12	0.1	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	4	3	0	0	11111	
9	4	12	0.09	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	4	3	0	0	11111	
10	12	4	0.09	60	2000	1	0	40	100	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	11111	
11	13	12	0.16	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	4	-1	2	0	11111	
12	12	13	0.16	60	2000	2	0	40	100	0
	0	0	0	0	3	3	4	0	11111	
13	5	12	0.17	60	2000	1	0	40	100	0

Tabela A.3: Descrição dos dados contidos no arquivo de tramos

LINHA	COLUNA	DESCRIÇÃO
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1 2-6	Numero de tramos do arquivo Fatores de escala para o comprimento do tramo, a velocidade de fluxo livre, a capacidade, a velocidade na capacidade e a densidade de congestionamento
3	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Número identificador do tramo Numero do nó inicial ou de origem do tramo Numero do nó final do tramo Comprimento do tramo (Km) Velocidade de fluxo livre no tramo (Km/h) Fluxo de saturação (veic/h/faixa) Número de faixas Coeficiente de variação da velocidade Velocidade na capacidade (Km/h) Densidade de congestionamento (veic/Km/faixa)

#### A.4 ARQUIVO DE SEMAFOROS

O arquivo de semáforos contém informações sobre programação semafórica, tempos de ciclo, verde efetivo, numero de fases, mas na simulação de vias de fluxo ininterrupto, não deve conter nenhum tipo de dado. Entretanto, é necessário que esse arquivo exista para a execução das simulações.

Arquivo de semáforos										
4	1	3600								
1										
1	106	80	160	0	4	37	3	21	3	14
	3	22	3	0						
2	88	66	132	0	4	34	3	14	3	14
	3	14	3	0						
3	66	50	99	0	3	18	3	12	3	27
	3			0						
4	67	50	100	0	3	12	3	31	3	15
	3			0						

Tabela A.4 : Descrição dos dados do arquivo de semáforos

LINHA	COLUNA	DESCRIÇÃO
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Numero de semáforos na rede
	2	Numero de planos para cada semáforo
	3	Duração de cada plano
3	1	Numero de plano semaforico
4	1	Numero identificador do semáforo
	2	Tempo de ciclo a ser utilizado no inicio da simulação (s)
	3	Tempo mínimo de ciclo permitido, no caso do ciclo ser otimizado durante a simulação

#### A.5. ARQUIVO DE DEMANDA

Este arquivo contém o fluxo horário a ser gerado durante o período de simulação e a composição do tráfego, além da distribuição dos *headways* e do fator de equivalência entre eles.

Arquivo de demandas										
90	0	0	1							
1	1	2	84	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
2	1	3	92	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
3	1	4	96	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
4	1	5	179	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
5	1	6	126	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
6	1	7	66	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
7	1	8	107	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							
8	1	9	97	1	0	3600	1	0	0	0
	0	0	1							

**Tabela A.5:** Descrição dos dados contidos no arquivo de demanda

<b>LINHA</b>	<b>COLUNA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número de demandas geradas
	2	Numero do primeiro par O-D a ser utilizado pelo modelo
	3	Numero do ultimo par O-D a ser utilizado pelo modelo
	4	Fator de escala para a demanda
3	1	Numero identificador da demanda
	2	Numero de nó de origem da demanda
	3	Numero de nó de destino da demanda
	4	Demanda (veíc/h)
	5	Porcentagem de <i>headways</i> com distribuição exponencial
	6	Tempo de inicio da demanda (s)
	7	Tempo de término da demanda (s)
	8-12	Porcentagem da demanda composta por cada tipo de veículo
	13	Porcentagem da demanda que será utilizada para gerar o arquivo <i>file 16</i>
	14	Fator de equivalência entre espaçamentos

#### A.6. ARQUIVO DE INCIDENTES

O arquivo de incidentes é necessário para a simulação apesar de não conter nenhum dado. A primeira linha pode conter uma identificação para o arquivo e a segunda linha deve conter o número 0.

Incidentes
0

#### A.7. ARQUIVO *LANE\_STRIPING.DAT* (ARQUIVO DE PERMISSÃO E PROIBIÇÃO)

Este arquivo possibilita impor ao fluxo de tráfego restrições com relação a manobra e ao tipo de veículo.

Arquivo de faixas					
15					
1	27	2	110	011	00000 0
2	22	2	110	011	00000 0
3	25	1	111		00000
4	24	1	111		00000
5	21	2	110	011	00000 0
6	19	2	110	011	00000 0
7	18	1	111		00000 0
8	16	2	110	011	00000 0
9	15	2	110	010	00000 0
10	12	2	010	011	00000 0
11	13	1	101		00000
12	11	2	110	011	00000 0

**Tabela A.6: Descrição dos dados contidos no arquivo de Lane\_Striping.dat**

LINHA	COLUNA	DESCRIÇÃO
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número de tramos definidos no arquivo (inteiro) ( $0 < x \leq$ numero total de tramos na rede)
3	1	Numero identificador (inteiro) ( $0 < x \leq$ numero de tramos definidos no arquivo)
	2	Numero identificador do tramo com permissão ou proibição ( $0 < x \leq$ maior numero do tramo na rede) (inteiro)
	3	Numero de faixas n do tramo (inteiro) ( $0 < n \leq$ numero Máximo de faixas permitidas)

#### A.8 ARQUIVO DE RESULTADOS (File 10.out)

O arquivo *file10.out* é o arquivo onde apresenta os resultados detalhados das estatísticas dos *links*, otimização de sinais, estatísticas de viagens, incidentes. Entretanto, para obter os resultados requeridos por esta pesquisa fez-se uso dos arquivos adicionais de resultados que são os seguintes: Arquivo 11: Condições médias de tráfego em cada *link*  
Arquivo 12: Condições de tráfego nos *links*

Total link travel times	=	1772.00 veh-min
-Total network travel	=	849.26 veh-km
-Total network length	=	6.28 km
-Average network speed	=	28.76 km/h
-Average trip time/veh	=	0.80 min
-Average trip length/veh	=	0.38 km
-Number Invisible veh.	=	0
-Total network stops	=	1837.43
-Average network stops	=	61.00 percent

**Tabela A.7 : Descrição dos resultados gerados no arquivo *file10.out***

LINHA	COLUNA	DESCRIÇÃO
1	1	Tempo de simulação ( s )
	2	Número de identificação do veículo
	3	Classe veicular
	4	Número do tramo
	5	Tempo decorrido (s )

### A.9 ARQUIVO DE ESTATÍSTICAS DA SIMULAÇÃO (*RUNERR.OUT*)

Este arquivo é criado no início da simulação, atualizado a cada 600 segundos, e indica restrições no tamanho da rede, lista de erros encontrados durante a leitura dos dados ou na execução do programa. Apresenta diversas informações, tais como o número máximo de tramos ou veículos possíveis de ser simulado na versão do INTEGRATION que está sendo utilizada, eventuais erros de codificação, estatísticas do tempo de simulação, número de veículos a ser gerado, número de veículos em trânsito e número de viagens finalizadas.

=====

INTEGRATION Release 2.30e: TRAFFIC NETWORK SIMULATION MODEL

Copyright 1984-2002 M. Van Aerde & Assoc., Ltd.

Small Version - May 2002

=====

#### A. Array dimensions :

- max number of od pairs = 2500  
 - max number of vehicles = 25000  
 - max number of vehicle types = 5  
 - max number of links = 250  
 - max node number = 250  
 - max links into/out of node = 7  
 - max number of vehicles on network = 50000

**Tabela A.8: Descrição Das Estatísticas Apresentadas No Arquivo Runerr.Out**

Este arquivo apresenta diversas informações, tais como o número máximo de tramos ou veículos possíveis de ser simulado na versão do INTEGRATION que está sendo utilizada, eventuais erros de codificação, estatísticas do tempo de simulação, número de veículos a ser gerado, número de veículos em trânsito e número de viagens finalizadas.

<b>TITULO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<i>Simulation clock time</i>	Tempo de simulação previsto ( s )
<i>Total simulation horizon</i>	Tempo total simulado ( s )
<i>Real world time elapsed</i>	Tempo real de simulação ( s )
<i>Scheduled departures</i>	Número total de veículos previsto para ser gerado durante a simulação
<i>Deferred departures</i>	Veículos em trânsito no final da simulação
<i>Current vehicles en-route</i>	Veículos em trânsito no final da simulação
<i>Total trips completed</i>	Total de viagens finalizadas

#### **A.9 ARQUIVO DE RESULTADOS (file11.out)**

O arquivo 11 é gerado no final da simulação. E o arquivo 12 apresenta, a série temporal das condições de tráfego nos *links* e gerado a cada *n* segundos, e fornece as seguintes saídas, tempo de viagem no link livre, tempo médio de viagem (s), número de veículos no link, consumo de combustível no link(l), número de paradas, emissões e acidentes

*ANEXO B:*

Arquivos do QUEENS OD

---

De acordo com Van Aerde [1998] para estimar as demandas de tráfego de origem destino, o modelo QUEENS<sub>OD</sub> precisa de nove tipo de arquivos de dados de entrada, estes são compatíveis com arquivos de entrada e saída do simulador INTEGRATION.

Os dados para todos os arquivos de dados de entrada estão para ser ingressados em códigos ASCII como será especificado em seções seguintes deste capítulo.

Para a geração da matriz O/D são requeridos e obrigatórios arquivos com dados de entrada relacionados abaixo. Sendo os arquivos obrigatórios os seguintes: arquivo mestre, arquivo de nós, arquivo de link, arquivo de fluxos observados no link. Além desses arquivos tem a presença de arquivos opcionais tais como *Signal File*, *Seed O-D Demands*, *Incident File*, *Turning Movements*, *Paths Utilized By Traffic*, *Actual O-D Demands*.

O modelo fornece quatro tipos de saídas para interpretação pelo usuário do modelo:

Os resultados da simulação estão representados por os seguintes resultados:

- ◆ Estimção de demandas O/D, fluxo no link, movimentos de conversão, e três arquivos em formato compatível com o INTEGRATION (QOD11.OUT, QOD14.OUT).
- ◆ Estatísticas das saídas (QNET10.OUT, QNET15.OUT através do arquivo do QNET16.OUT ).

**Outros arquivos de saída:**

- ◆ Estatísticas de saída (FILE 10)
- ◆ Estatísticas de demanda de Origem- Destino (FILE 15)
- ◆ Comparação do fluxos no link

◆ Arquivo de saída dos movimentos de conversão (Turn\_Chk.out)

Após a listagem de cada arquivo é apresentada uma tabela com a descrição de todos os dados listados. Essa descrição restringe-se aos dados necessários para as simulações feitas para esta pesquisa. Sendo assim, os interessados na descrição de outros dados devem consultar o manual do QUEENS<sub>OD</sub> [Van Aerde, 1998].

Este anexo apresenta exemplos de arquivos de entrada de dados e arquivos de resultados gerados pelo QUEENS<sub>OD</sub>. Os itens a seguir mostram exemplos de arquivos utilizados para a simulação durante 3600s.

Como foi dito anteriormente, o QUEENS OD compartilha os mesmos arquivos de INTEGRATION que foram apresentados no ANEXO A.

Nesta dissertação para se obter a matriz origem destino no Queens O-D foi executado com os arquivos seguintes: B.1 Arquivo mestre, B.2 Arquivo de nós, B.3 Arquivo de Links, B.4 Arquivo de Semáforos, B.5 Arquivo de Incidentes, B.6 Arquivo de fluxos observados no link, B.7 Arquivo de movimentos de conversão.

Abaixo são listados três arquivos restantes que não foram mostrados no ANEXO A.

## B.1 ARQUIVO MESTRE

O arquivo mestre contém o tempo de simulação, estimação da metodologia para a simulação e os nomes dos arquivos de resultados. Esses arquivos devem ser adequadamente localizados através de seus diretórios.

```
Arquivo mestre
11 40 0.01
 5 20 0.10
 1 1 0.00
qnet16\
qnet16\output\
qod1.dat
qod2.dat
qod3.dat
none
qod5.dat
qod6.dat
qod7.dat
none
none
qod10.out
qod11.out
qod12.out
qod13.out
qod14.out
qod15.out
qod16.out
```

**B.2 ARQUIVO DO FLUXOS OBSERVADOS NO LINK**

Arquivo de fluxos observados no link				
1	3600	28	28	
3600	1			
1	1237	4000	13.80	20.7
2	1208	4000	13.80	20.7
3	330	2000	7.20	10.8
4	52	2000	7.20	10.8
5	1212	4000	36.00	54
6	1218	4000	36.00	54
7	71	2000	6.00	9
8	154	2000	6.00	9
9	78	2000	5.40	8.1
10	241	2000	5.40	8.1
11	1283	4000	9.60	14.4
12	1285	4000	9.60	14.4

**B.3 ARQUIVO DO MOVIMENTOS DE CONVERSÃO**

Arquivo de movimentos de conversão			
1	3600	28	28
3600	1		
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1
3	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1
5	-1	-1	-1
6	41	1161	16
7	-1	-1	-1
8	29	74	71
9	44	13	21
10	-1	-1	-1
11	-1	-1	-1

#### B.4 Matriz origem destino Cenário base ( 0 ) Pico da tarde

Origem	Destino	Pares O/D	Origem	Destino	Pares O/D
1	2	28,86	6	1	37,87
1	3	91,21	6	2	33,03
1	4	72,54	6	3	19,36
1	5	112,92	6	4	32,71
1	6	116,52	6	5	2,01
1	7	119,82	6	7	41,77
1	8	118,87	6	8	0,00
1	9	117,29	6	9	0,00
1	10	160,98	6	10	71,93
2	1	0,00	7	1	34,32
2	3	0,00	7	2	29,47
2	4	0,00	7	3	15,3
2	5	0,00	7	4	28,65
2	6	3,31	7	5	0,00
2	7	6,61	7	6	45,72
2	8	26,25	7	8	4,51
2	9	24,66	7	9	1,02
2	10	68,36	7	10	97,15
3	1	0,00	8	1	35,23
3	2	0,00	8	2	31,36
3	4	0,00	8	3	20,54
3	5	0,00	8	4	30,93
3	6	0,00	8	5	8,49
3	7	0,00	8	6	0,00
3	8	9,56	8	7	0,00
3	9	7,63	8	9	42,96
3	10	61,03	8	10	0,00
4	1	0,00	9	1	38,82
4	2	0,00	9	2	34,94
4	3	0,00	9	3	24,53
4	5	0,00	9	4	34,91
4	6	0,00	9	5	13,61
4	7	0,00	9	6	0,00
4	8	6,84	9	7	0,00
4	9	4,9	9	8	26,68
4	10	58,3	9	10	0,00
5	1	11,97	10	1	116,24
5	2	5,51	10	2	112,36
5	3	0,00	10	3	110,55
5	4	0,00	10	4	120,93
5	6	10,2	10	5	124,21
5	7	16,15	10	6	139,24
5	8	44,28	10	7	120,62
5	9	41,79	10	8	4,72
5	10	110,45	10	9	12,13

**B.5 Matriz origem destino Cenário base ( 0 ) Pico da manha**

Origem	Destino	Pares O/D	Origem	Destino	Pares O/D
1	2	22,77	6	1	35,13
1	3	72,55	6	2	31,05
1	4	63,60	6	3	17,98
1	5	112,72	6	4	32,93
1	6	113,99	6	5	0,71
1	7	117,98	6	7	26,75
1	8	109,5	6	8	0,00
1	9	111,93	6	9	0,00
1	10	153,83	6	10	50,62
2	1	0,06	7	1	38,63
2	3	0,00	7	2	34,55
2	4	0,00	7	3	21,97
2	5	0,00	7	4	36,93
2	6	14,65	7	5	6,3
2	7	18,64	7	6	44,34
2	8	28,22	7	8	0,00
2	9	30,65	7	9	0,00
2	10	72,55	7	10	84,69
3	1	0,00	8	1	27,28
3	2	0,00	8	2	24,02
3	4	0,00	8	3	13,07
3	5	0,00	8	4	24,7
3	6	0,00	8	5	0,00
3	7	0,00	8	6	0,00
3	8	5,91	8	7	0,00
3	9	8,88	8	9	8,84
3	10	60,09	8	10	0,00
4	1	0,00	9	1	36,41
4	2	0,00	9	2	33,15
4	3	0,00	9	3	23,21
4	5	0,00	9	4	34,84
4	6	0,00	9	5	12,37
4	7	0,00	9	6	0,00
4	8	1,19	9	7	0,00
4	9	4,15	9	8	1,66
4	10	55,36	9	10	0,00
5	1	11,97	10	1	101,39
5	2	6,53	10	2	98,13
5	3	0,00	10	3	95,41
5	4	4,25	10	4	107,04
5	6	21,48	10	5	105,2
5	7	28,66	10	6	105,12
5	8	40,86	10	7	88,48
5	9	44,67	10	8	13,25
5	10	110,51	10	9	21,27

### B.6 Matriz origem destino Cenário base ( 0 ) Fora de pico

Origem	Destino	Pares O/D	Origem	Destino	Pares O/D
1	2	36,12	6	1	14,79
1	3	71,50	6	2	9,52
1	4	52,88	6	3	1,07
1	5	93,80	6	4	13,15
1	6	103,26	6	5	0,00
1	7	100,68	6	7	82,77
1	8	109,18	6	8	0,00
1	9	106,99	6	9	0,00
1	10	147,50	6	10	76,11
2	1	0,00	7	1	27,44
2	3	0,00	7	2	22,17
2	4	0,00	7	3	15,53
2	5	0,00	7	4	27,61
2	6	2,94	7	5	8,68
2	7	0,36	7	6	73,40
2	8	27,10	7	8	12,01
2	9	24,92	7	9	7,20
2	10	65,42	7	10	96,32
3	1	0,00	8	1	18,35
3	2	0,00	8	2	14,14
3	4	0,00	8	3	8,08
3	5	0,00	8	4	17,47
3	6	0,00	8	5	1,06
3	7	0,00	8	6	0,00
3	8	18,17	8	7	0,00
3	9	15,50	8	9	0,00
3	10	65,01	8	10	0,00
4	1	0,00	9	1	18,47
4	2	0,00	9	2	14,25
4	3	0,00	9	3	8,21
4	5	0,00	9	4	17,6
4	6	0,00	9	5	1,22
4	7	0,00	9	6	0,00
4	8	8,25	9	7	0,00
4	9	5,58	9	8	2,00
4	10	55,09	9	10	0,00
5	1	1,43	10	1	67,77
5	2	0,00	10	2	63,55
5	3	0,00	10	3	62,98
5	4	0,00	10	4	72,38
5	6	0,00	10	5	71,64
5	7	0,00	10	6	59,32
5	8	0,96	10	7	52,29
5	9	0,00	10	8	0,00
5	10	61,18	10	9	2,63

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

Agencia de cooperación del Japón y la municipalidad de Managua JICA [1998]. Plan Integral del Transporte y Vialidad en la municipalidad de Managua en la República de Nicaragua. Informe Final – *Almec Corporation Yachiyo Engineering Co. Ltda*

Boxill S. A, e Yu L. [2000] An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development. Report 167602-1. <http://swuttc.tamu.edu/Reports/167602-1.pdf> [7 Jan 2003].

Bacon, V. W; Lovell, D. J.; May, A. D.; Aerde, V. M. [1994] Use of INTEGRATION Model to Study High-Occupancy-Vehicle Facilities. *Transportation Research Record*, No 1446, p.8-13.

Banks, J.; e Carson II, J.S. [1984]. *Discrete- Event System Simulation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA, p.4.

Bauer, C.S. [1975] “Some energy considerations in traffic signal timing”. *Traffic Engineering*, No. 43. pp. 19-25.

Courage, K.G e Parapar, [1975] S.M. Delay and Fuel Consumption at Traffic Signals. *Traffic Engineering*, 23-27.

Demarchi, S. H. [2000] Influência dos Veículos Pesados na Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Dupla. São Carlos. 158 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Demarchi, S. H. [2002] Uma nova formulação para o modelo fluxo-velocidade densidade de Van Aerde, *Anais do XVI ANPET Natal- RN*, v.1 p. 313-324

Diekmann, J. [2000] A Modeling Approach for Evaluating Network Impacts of Operational-Level Transportation Projects. Master of Science in Civil and Environmental Engineering Blacksburg, Virginia. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05232000-14570051/unrestricted/JDThesis.PDF> [outubro, 2002].

Ferraz, A. C. P.; Fortes, F. Q.; Simões, F. A. [1999] Engenharia de Tráfego Urbano-Fundamentos Práticos. São Carlos, EESC.

Françoso, M.T. – “Estudo sobre semáforos”. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, dissertação de mestrado, 1990, 91 p.

Greenshields, B.D. [1935] A Study Traffic Capacity. *Proceedings of HRB* of v. 14, p. 448-447. Highway Research Board, Washington, D.C.

Jagannathan, R. e Khan, A. M. [2001] Methodology for the Assessment of Traffic Adaptive Control Systems. *Journal of Transportation Engineering*, Vol.71, No. 6, 2001, pp. 28-33.

May, A.D. [1990] *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

May, A. D. [1994]. *Traffic Management from Theory to practice. Past, Present, Future*. Transportation Research Record 1457, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p.1-14.

Maiolino, C.E.G e Portugal, L. D. S. [2001] Simuladores de Tráfego para Análise do Desempenho de Ônibus e de sua Área de Influencia, *Anais do XV ANPET*, Campinas, SP, v. 1, p. 257-264

Prevedouros P. e Wang Y. [1999] Simulation of Large Freeway and Arterial Network with CORSIM, INTEGRATION, and WATSim. Transportation Research Record No. 1678. <http://www.kldassociates.com/largefreeway.pdf>. (Novembro, 2002).

Prevedouros, P.e Wang Y. [1996] Synopsis of traffic simulation Models Department of Civil Engineering University of Hawaii at Manoa. Honolulu, HI 96822. [http://www.eng.hawaii.edu/~panos/sw\\_sum.pdf](http://www.eng.hawaii.edu/~panos/sw_sum.pdf). (janeiro 2003).

Rakha [2001] Integration Release 2.30 for Windows: User's Guide. V I e II. M. Van Aerde

Roess W. R.; Prassas R. P, Mcshane, [1998] Traffic Engineering. Second Edition Prentice Hall. New Jersey. Cap. 22, p. 592-631.

Rilett, L.R.; M. Van Aerde, G. MacKinnon, M. Krage [1991]. Simulating the TravTek Route Guidance Logic using the INTEGRATION traffic model. Proceedings of the 1991 Vehicle Navigation and Information Systems (VNIS) Conference, Dearborn, MI, SAE Conference Proceedings No. 253, Part 2, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, pp. 775-787

Setti, J.R.A. [2002] Tecnologia de transportes Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos São Carlos Janeiro 2001.

Setti, J.R.A. [1994] *Introdução à Simulação Discreta de Sistemas*. São Carlos EESC.

Setti, J.R.A. [1997] Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Simples. Tese (Livre-Docência), EESC, USP. São Carlos, SP.

Silveira, A [1992] Um modelo para simulação das alternativas viárias de conversão a esquerda, Escola de Engenharia de São Carlos, Tesis de doutorado, 1992, 142 p.

Sabra, Z.; Wallace, CH. E; Lin, F. [2000]. Traffic Analysis Software Tools. *Transportation Research Board/ National Research Council Circular Number E-CO14*. September 2000, TRB . <http://gulliver.trb.org/publications/circulars/eco14.pdf>.

TRB [2000]. *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Washington D.C.

Taori, S. E Rathi, A. K. [1996] Comparison of NETSIM, NETFLO I and NETFLO II Traffic Simulation Models for Fixed-Time Signal Control, *Transportation Research Record 1566*, p. 20-30.

Van Aerde, M. [1995]. A single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Congested and Uncongested Highways. Artigo apresentado na 74<sup>th</sup> TRB Annual Conference, Washington, D.C.

Van Aerde , M. [2002] *Integration Release 2.30 for Windows: User's Guide*. V. I e II. Queen's University Kingston, Ontário, Canadá.

Van Aerde , M. [2000] *Integration Release 2.30 for Windows: User's Guide*. V. I e II. Queen's University. Kingston, Ontário, Canadá.

Van Aerde, Hellinga B.R, Baker M. and Rakha H. INTEGRATION: An Overview traffic Simulation Features

Van Aerde and Associates Blacksburg, VA July, 1998 Queens OD Rel. 2.10 – User's Guide: Estimating Origin Destination Traffic Demands from Link Flow Counts.

Wang Y. e Prevedouros P. [1997] Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in Replicating Volumes and Speeds on Three Small Networks. *Transportation Research Record No. 1644*

Webster, F.V. – “Traffic signal settings. Road Research Technical Paper, 1958, 45 p.