

OPERAÇÃO DE SINAIS DE TRÁFEGO

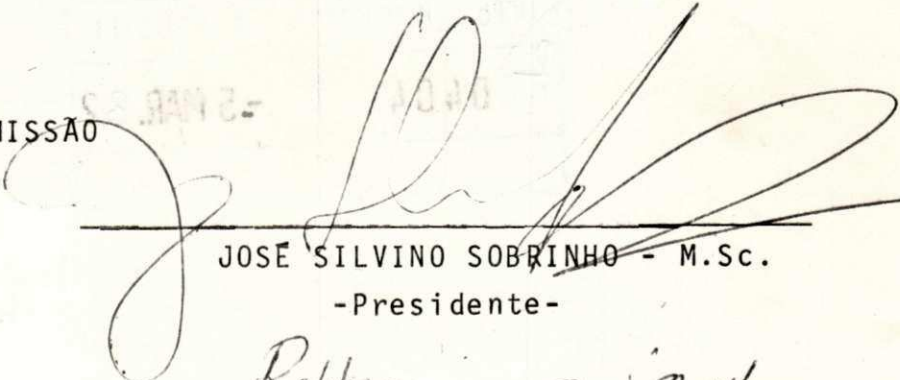
ÉLIO SANTANA FONTES

Engenheiro Civil

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

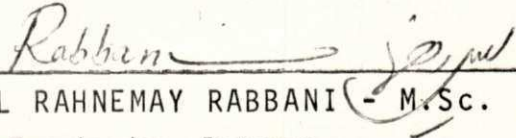
Aprovada por:

COMISSÃO



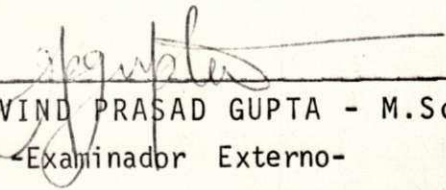
JOSE SILVINO SOBRINHO - M.Sc.

-Presidente-



SOHEIL RAHNEMAY RABBANI - M.Sc.

-Examinador Interno-



GOVIND PRASAD GUPTA - M.Sc.

-Examinador Externo-

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA-BRASIL
MARÇO - 1978



F683o Fontes, Élio Santana.
Operação de sinais de tráfego / Élio Santana Fontes. -
Campina Grande, 1978.
155 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1978.
"Orientação : Prof. M.Sc. José Silvino Sobrinho".
Referências.

1. Sinais de Tráfego. 2. Rede de Tráfego. 3. Semáforo de
Trânsito. 4. Dissertação - Ciências. I. Silvino Sobrinho,
José. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande
(PB). III. Título

CDU 656.05(043)

A meus pais, Emanoel e Tereza,
a meus irmãos José Francisco,
Luis Antonio, Gilberto, Almiro,
Emanoel, Jorge Augusto, José
Martins, Nivaldo e Célia Maria.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor José Silvino Sobrinho, Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil do CCT , pela assistência e orientação na elaboração deste Trabalho.

Ao Professor Monte Alverne, Chefe do DEC/UFPb, pelo apoio moral e material.

À equipe do Núcleo de Treinamento e Pesquisa em Transportes, pelo apoio material e financeiro.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para tornar possível esta pesquisa, entre esses o grupo de estudantes que ajudou nos levantamentos de campo.

OPERAÇÃO DE SINAIS DE TRÁFEGO

Dissertação de Mestrado

por

Elio Santana Fontes

R E S U M O

Na operação de uma rede de tráfego os pontos de conflito são os que mais problemas apresentam. Isto porque o escoamento de fluxos que se inter cruzam deve ser assegurado através de uma forma de controle que minimize o tempo de espera, comprimento de fila, taxa de acidentes, etc, que surgem com a operação de uma interseção.

Em razão disto, o propósito dessa pesquisa é fazer um estudo comparativo entre uma política de controle de sinais manuais e uma outra otimizada segundo o modelo empírico desenvolvido por Webster e Cobbe.

Neste trabalho foram elaborados modelos de simulação da operação de sinais e desenvolvidos programas de computador que permitem encontrar o melhor tempo de ciclo de qualquer semáforo, mediante uma simples mudança na entrada de dados.

TRAFFIC SIGNAL OPERATION

M.Sc. Dissertation

by

Elio Santana Fontes

A B S T R A C T

In the traffic network the conflict points are the ones which most show problems. This is because the continuous supply of flows which cross must be warranted by a type of control that minimizes the delay, the queue length, the accidents rates, etc, that appears with the operation of an intersection.

Accordingly, the purpose of this research is to make a comparative study between a politic of manual signals control and another optimized by empiric model developed by Webster and Cobbe.

In this work were elaborated models of simulation of signal operations and developed computer programs which permit to find the best cycle length of any semaphore, by a simple alteration in the input datas.

I N D I C E

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Considerações Gerais	.1
1.2 - Objetivo da Pesquisa	.2
CAPÍTULO 2 - CONCEITUAÇÃO E MODELOS	
2.1 - Introdução	.6
2.2 - Tipos de Controle de uma interseção	.7
2.3 - Interseções Sinalizadas	.8
2.4 - Sistemas de Sinais	.9
2.5 - Fatores que Afetam a Capacidade de Interseções Sinalizadas	.14
2.6 - Abordagem de Variáveis	.18
2.7 - Relação entre Tempo de Verde e Atendimento	.23
✓ 2.8 - O Modelo de Webster	.26
2.8.1 - Consideração da Performance do Veículo	.27
2.8.2 - Período Amarelo	.30
2.8.3 - Duração da Fase Verde	.31
✓ 2.8.4 - Tempo de Espera	.34
2.8.5 - Comprimento de Fila	.37
2.8.6 - Probabilidade de Entrada na Interseção durante a Primeira Fase Verde	.39
2.8.7 - Intervalo para Análise de vários Tempos de Ciclo	.40

CAPÍTULO 3 - SIMULAÇÃO DE MODELOS

3.1 - Modelos da Situação em Estudo	.43
3.2 - Estudos Realizados	.45
3.3 - Modelos de Simulação Utilizados	.51
3.3.1 - Sinal com Controle Automático	.51
3.3.2 - Sinal com Controle Manual	.52

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 - Características do Sistema Estudado	.56
4.1.1 - Fluxo Médio	.56
4.1.2 - Distribuição de Chegadas	.59
4.1.3 - Distribuição de Atendimento	.59
4.1.4 - Intervalo Mínimo Médio e Tempo Perdido para Colocar a Fila em Movimento	.60
4.1.5 - Velocidade Média e Tempo Perdido pelo Último Veículo	.61
4.1.6 - Fila Média	.62
4.1.7 - Tempo Médio de Espera	.62
4.1.8 - Tempo Perdido Total em cada Fase do Sinal	.63
4.2 - Análise dos Resultados da Política Otimizada	.64
4.3 - Política de Controle Manual Usada	.68
4.4 - Comparação entre a Política Otimizada e a Política de Controle Usada	.69
4.4.1 - Sinal com Controle Automático	.70

4.4.2 - Sinal com Controle Manual	.71
4.5 - Sincronização Sugerida	.73
4.6 - Análise Conclusiva	.74
APÊNDICE A	.76
APÊNDICE B	.130
APÊNDICE C	.135
BIBLIOGRAFIA	.154

LISTA DAS TABELAS

1 - Comprimento máximo de fila para o começo da fase verde para a probabilidade de 0,95	.77
2 - Quadro das faixas de tráfego	.78
3 - Amostragem dos tempos de ciclo com as respectivas fases verde e vermelha para os sinais de controle manual	.79
4 - Composição volumétrica das interseções por fluxo (em veículos/hora)	.80
5 - Composição volumétrica das interseções por fluxo (em percentagem)	.81
6 - Relação dos volumes médio real e equivalente por fluxo de tráfego (veículos/hora)	.82
7 - Relação dos volumes equivalentes médio por faixa de tráfego (veículos/segundo)	.83
8 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada I.A (intervalo de 30 seg.)	.84
9 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo MP2 para a chegada I.B (intervalo de 30 seg)	.85
10 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada I.C (intervalo de 30 seg.)	.86

11 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada II.A (intervalo de 30 seg.)	.87
12 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo VN2 para a chegada II.B (intervalo de 30 seg.)	.88
13 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada II.C (intervalo de 30 seg.)	.89
14 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada III.A (intervalo de 30 seg.)	.90
15 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo MH1 para a chegada III.B (intervalo de 30 seg.)	.91
16 - Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo FP8 para a chegada III.C (intervalo de 30 seg.)	.92
17 - Distribuição dos intervalos médio entre veículos consecutivos (segundos)	.93
18 - Velocidade média e tempo perdido para o último veículo atravessar a interseção	.94
19 - Filas média e máxima observadas	.95
20 - Tempo de espera por hora em função do intervalo médio entre veículos consecutivos para a interseção I	.96

21 - Tempo de espera por hora em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção II.	.97
22 - Tempo de espera por hora em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção III	.98
23 - Tempo perdido total	.99
24 - Fases amarela das interseções	.99
25 - Duração da fase verde	.100
26 - Tempo de espera total da interseção I e tempo de espera médio para cada faixa	.101
27 - Tempo de espera total da interseção II e tempo de espera médio para cada faixa	.102
28 - Tempo de espera total da interseção III e tempo de espera médio para cada faixa	.103
29 - Comprimento de fila médio e máximo de cada faixa da interseção I	.104
30 - Comprimento de fila médio e máximo de cada faixa da interseção II	.105
31 - Comprimento de fila médio e máximo de cada faixa da interseção III	.106
32 - Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para a interseção I	.107
33 - Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para interseção II	.108

34 - Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para a interseção III	.109
35 - Resultados da simulação da operação dos sinais manual e automático por interseção	.110
36 - Resultado da simulação da operação dos sinais manuais por fase	.110
37 - Sincronização dos sinais	.111

LISTA DAS FIGURAS

1 - Relação espaço tempo para uma interseção com sinalização luminosa	.112
2 - Intervalos entre chegadas sucessivas	.113
3 - Probabilidades acumulativas de Poisson para chegadas menor ou igual a N durante o intervalo t. (Adaptado da Ref. 2)	.113
4 - Localização das Ruas, faixas de tráfego, fluxo e chegadas para o estudo teórico	.114
5 - Localização das Ruas e das faixas de tráfego para simulação	.115
6 - Distribuição de chegadas da interseção I (chegada I.A)	.116
7 - Distribuição de chegadas da interseção I (chegada I.B)	.116
8 - Distribuição de chegadas da interseção I (chegada I.C)	.117
9 - Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.A)	.117
10 - Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.B)	.118
11 - Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.C)	.118
12 - Distribuição de chegadas da interseção III	

(chegada III.B)	.119
14 - Distribuição de chegadas da interseção III (chegada III.C)	.120
15 - Variação do intervalo entre veículos consecutivos em função da posição na fila	.120
16 - Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção I	.121
17 - Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção II	.121
18 - Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção III	.122
19 - Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção I	.122
20 - Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção II	.123
21 - Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção III	.123
22 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção I, fase 1	.124
23 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção I, fase 2	.124
24 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção II, fase 1	.125

25 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção II, fase 2	.125
26 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção III, fase 1	.126
27 - Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção III, fase 2	.126
28 - Probabilidade de entrada durante a 1 ^a fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção I	.127
29 - Probabilidade de entrada durante a 1 ^a fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção II	.127
30 - Probabilidade de entrada durante a 1 ^a fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção III	.128
31 - Tempo de espera em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para interseção I	.129
32 - Tempo de espera em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para as interseções II e III	.129

LISTA DAS ILUSTRAÇÕES

1 - Vista parcial da chegada I.B	.131
2 - Vista parcial da chegada I.A	.131
3 - Vista do estacionamento a 45º existente na chegada II.A.	.132
4 - Vista parcial da chegada III.B	.132
5 - Vista parcial da chegada II.B	.133
6 - Vista parcial do relógio e do terminal urbano existente na chegada II.C	.133
7 - Vista parcial da interseção II	.134
8 - Vista dos terminais urbanos existentes na Praça da Bandeira e na chegada III.C	.134

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

Ao longo de sua história uma cidade nasce e cresce tornando mais complexa à medida de seu desenvolvimento global. Algumas de suas soluções que em dada época tinham relativamente pouca importância em inesperados momentos começam exigir atenção como decorrência da defesa do interesse coletivo. Assim acontece com o manejo, operação, etc, do seu sistema de transportes que a partir de certo nível de tamanho da cidade passa a ter maior influência no contexto sócio-econômico da comunidade e portanto vem a requerer mais racional planejamento, operação e manutenção.

Não é sem motivos que o poder central, em comunhão de esforços com governos estaduais e municipais, está realizando um programa de desenvolvimento de cidades de porte médio. São, sem dúvidas, aquelas que em certo estágio de seu desenvolvimento passaram a ter certos problemas característicos dos grandes centros metropolitanos, para os quais não estavam preparados.

Em uma cidade de porte médio onde o crescimento da população e o aumento do número de veículos, ao lado de outros fatores, fazem aumentar dia a dia os pro-

blemas de operação do tráfego é necessário encontrar soluções antes que a comunidade seja alvo de significativas deseconomias.

Se é verdade que certas dificuldades provem da deficiência de algumas facilidades de transportes para o escoamento dos veículos, também é notório que outras resultam de utilização inadequada de dispositivos da rede rodoviária. As soluções requeridas devem ser entregues a engenharia de tráfego, à qual compete a tarefa de planejamento, projeto e controle de operação das facilidades necessárias ao bom escoamento dos veículos.

Em um meio urbano onde o crescimento do fluxo de veículos passa a requerer a instalação de semáforos em pontos de conflito, é importante dimensionar a duração de cada fase do sinal. Hoje, com a disponibilidade de técnicas e meios existentes não é admissível que o procedimento para dimensionar a configuração de funcionamento de um semáforo não seja baseado em métodos científicos.

1.2 - Objetivo da Pesquisa

A análise de um dentre aqueles problemas que passam a incomodar uma cidade de porte médio despertou o interesse e veio a ser o propósito deste trabalho. No caso, o estudo do comportamento de uma política de operação de sinais de tráfego é o assunto aqui desenvolvido.

O modelo da situação problema compreende a operação de um sistema de sinais de tráfego na cidade de Campina Grande, que bem caracteriza o tipo de cidade de mé dio porte brasileira. Esta ostenta uma posição de desta- que nas atividades comerciais e culturais de todo Nordes- te Interior, chegando mesmo a competir com algumas capi- tais da região, dada sua magnitude sócio-econômica. Em de- corrência, um relativamente alto, número de veículos está trafegando em suas vias urbanas promovendo congestionamen- tos e filas consideráveis em certos cruzamentos. Em cer- tas interseções sinalizadas, como mostra a figura 4, notada- mente nos horários de picos, a formação dos comprimentos de filas se alongam provocando interrupção do tráfego nas vias transversais vizinhas.

O objeto desse trabalho é realizar um estu- do comparativo entre os resultados de uma política de ope- ração manual de sinais de tráfego e uma outra fundamenta- da em otimização do tempo de ciclo fixo, segundo o modelo empírico desenvolvido por Webster e Cobbe, com base na si- tuação existente na Rua Floriano Peixoto em Campina Gran- de.

A apresentação desta pesquisa, ao longo dos capítulos demais está abordada como segue.

Capítulo II - foi desenvolvido um estudo bi- bliográfico onde se procurou definir o que é uma interse- ção, apresentando os seus diversos tipos de controle. Pa

ra as interseções sinalizadas foram definidas os diversos tipos de sinais e sistemas quanto à sua forma de controle, como também os fatores que afetam a capacidade de interseções sinalizadas. Ainda neste capítulo foi conduzida uma abordagem teórica sobre as principais variáveis envolvidas no processo da operação de um semáforo. Finalmente o modelo de Webster foi apresentado de forma a se ter uma boa informação teórica sobre o assunto.

Capítulo III - aqui foram apresentados os modelos da situação em estudo, modelos de simulação utilizados, como também os estudos realizados para que se pudesse fazer uma identificação da política adotada na operação dos sinais manuais.

Capítulo IV - neste capítulo foram reunidos os elementos característicos do sistema estudado, realizando-se a apresentação dos valores de cada variável referidos em capítulos anteriores. Uma breve abordagem sobre a política de controle manual usada foi incluída nesse contexto, como também uma comparação entre a política otimizada e a política de controle manual. Finalmente foi sugerida uma sincronização para os sinais e posteriormente as conclusões finais e sugestões para realização de novas pesquisas.

Nos Apêndices A, B e C foram apresentados respectivamente os gráficos e tabelas, ilustrações da situação de campo, e os programas de computador que foram usa

dos para simulação da situação problema e para otimizar o tempo de ciclo através do modelo de Webster.

C A P Í T U L O II

CONCEITUAÇÃO E MODELOS

2.1 - Introdução

Um sistema de tráfego funciona com um conjunto complexo de interrelacionamentos. As características de operação deste sistema são funcionalmente dependentes do número e espécies de usuários que requerem o seu serviço. Isto é particularmente verdade para aqueles pontos onde elementos do sistema chegam juntos - a interseção. Quando os volumes de tráfego aumentam ou mudam sua natureza, por exemplo, um acréscimo no número de caminhões e/ou ônibus, é geralmente a interseção que primeiro demonstra sua incapacidade de servir a demanda aumentada ou alterada. Isto é mais frequentemente ilustrado pelo aumento de congestionamentos, tempos de espera, e um agravamento do panorama de acidentes. Que isto ocorre é lógico, desde que a interseção é um concentrado ponto de conflitos que geralmente opera com uma mais baixa capacidade e nível de serviço que qualquer segmento da via que ela serve.

Quando parece evidente que uma interseção de fato torna-se um entrave para a operação satisfatória do sistema adjacente de vias, deve-se fazer um estudo deta-

lhado de suas capacidades físicas, operacionais e limitações podem ser feitas. Baseado naquele estudo, decisões apropriadas podem ser tomadas quanto à maturidade e grau de um melhoramento possível e justificado¹.

2.2 - Tipos de Controle de uma Interseção

A maioria dos segmentos das redes de tráfego estão localizados no mesmo plano horizontal e frequentemente se entre-cruzam, então conduzindo a conflitos entre fluxos opostos de tráfego, demoras e a acidentes. Desde que a operação de uma interseção muitas vezes pode se tornar um fator crítico determinante da capacidade e performance total da rede de tráfego, engenheiros de tráfego estão continuamente se deparando com o problema de controle de fluxos de interseções a fim de melhorar a performance total. Contudo, este problema é complicado pelo fato de que cada interseção tem características próprias de estrutura física, proporções de fluxos de veículos, movimentos de retorno, movimentos de pedestres e assim por diante.

Para melhor compreensão será feita distinção entre quatro categorias de interseções: (1) interseções não controladas; (2) interseções prioridade; (3) interseções em rótula, e (4) interseções controladas através de sinal de tráfego ou policial de trânsito.

O mais apropriado tipo e grau de controle para um cruzamento será uma função dos volumes que se inter-cruzam, dos valores apresentados nas demoras resultantes, acidentes, etc., e da instalação e custos de manutenção das formas alternativas de controle. Então a substituição de uma forma de controle por um outro requer uma análise da performance e mudanças que ocorrem no uso da interseção².

2.3 - Interseções Sinalizadas

Interseções sinalizadas dão o direito de passagem primeiro para um conjunto de movimentos e então para outro dependendo da estrutura física, do tipo de controle, e demandas de tráfego. Esta forma de controle pode ser obtida através de sinais de tráfego automáticos ou por direção policial.

Na operação de interseções com prioridade o maior fluxo sofre quase nenhuma demora e o menor fluxo é retardado enquanto espera por intervalos aceitáveis no fluxo principal. Quando o fluxo principal cresce, o número de intervalos aceitáveis decresce e então os veículos do menor fluxo são retardados mais ainda. Ou se o menor fluxo cresce, filas se desenvolverão e os veículos do menor fluxo serão retardados tanto na travessia do fluxo principal quanto na fila. Então, dependendo dos volumes de tráfego do maior e menor fluxo, os veículos da rua secundária serão retardados pela fila e pela espera de intervalos aceitáveis.

Se de um lado o uso de controles sinalizados eliminará as demoras para os veículos da rua secundária de espera por intervalos aceitáveis, do outro lhes causará demora enquanto esperam por uma luz verde e para os veículos da frente desocuparem a interseção. Contudo, o controle do sinal agora causará aos veículos da rua principal alguma demora enquanto esperam por uma luz verde e pelos veículos da frente para desocuparem a interseção (onde previamente os veículos da rua principal incorriam em quase nenhuma demora)

Deve ser notado que nem sempre a substituição de um sinal por controles de prioridades reduzirá o retardamento total na interseção².

2.4 - Sistemas de Sinais

Existe uma grande variedade de sinais de tráfego e sistemas de controle, desde os mais simples dispositivos de controle manual até os mais sofisticados controlados por computadores. A terminologia descrita abaixo será constantemente usada neste trabalho.

O tempo de ciclo de um sinal é o período de tempo requerido para uma sequência completa de indicações do sinal. O tempo de ciclo é normalmente dividido em um número de fases, onde cada fase é uma parte desse tempo alocada a um ou mais fluxos de tráfego ou movimentos de pedestres. No mais simples caso, ilustrado na Figura 1,

existem duas fases, uma situação típica encontrada normalmente no cruzamento de duas ruas principais. A Figura 1 mostra as indicações do sinal e os movimentos de tráfego para a chegada A e a chegada B durante o tempo de ciclo completo.

Para um tempo $t = 0$, a luz está verde para o tráfego na chegada A enquanto que o fluxo na chegada B está parado (como é mostrado pelas linhas horizontais indicando um acréscimo no tempo mas nenhum movimento se processa); obviamente, para $t = 0$, a fase 1 está, em mais da metade, concluída. A fase 1 termina com a presença de uma luz amarela na chegada A. Daí é imediatamente seguida na, fase 2, por uma luz vermelha, ainda na chegada A e uma luz verde na chegada B. Um tempo de ciclo completo é igual a soma das fases durante as quais o tráfego se move. Também, é lógico, as duas fases não são necessariamente iguais em termos de duração. Ainda, em alguns casos é necessário acomodar fluxos de pedestres em uma fase separada durante a qual nenhum tráfego ocorre.

O tempo perdido para colocar a fila em movimento é definido como K_1 , na figura 1, e o tempo perdido para o último veículo atravessar a interseção antes que a fase seguinte se inicie é igual a K_2 . Na Figura 2 se supõe que o período amarelo seria usado pelo último veículo para atravessar a interseção. Em alguns casos, nenhum veículo usará o período amarelo, mas desde que os motoristas tendem a usá-lo durante os períodos de pico, é convenient-

te tratá-lo na facção indicada na determinação da capacidade de interseção sinalizada.

Sinais de tráfego para interseções isoladas podem ser classificados com relação à sua flexibilidade em termos de tempo de ciclo e duração de fase como segue: (1) sinais com controle manual; (2) sinais com tempo de ciclo fixo; (3) sinais semi-atuados; (4) sinais completamente atuados; (5) sinais que operam segundo relação entre volume e densidade.

Os sinais com controle manual apresentam uma grande variedade nos tempos de ciclo, onde o operador leva em consideração o volume de tráfego dos veículos que chegam, determinados comprimentos de fila, o tempo de espera e até mesmo durante períodos de pouco movimento se pode estabelecer um tempo de ciclo visualmente controlado.

O sinal de tempo de ciclo fixo é aquele em que o tempo de ciclo e a duração de cada fase permanecem constante durante um dado período do dia ou mesmo para o dia inteiro.

Sinais semi-atuados têm controladores que permitem a variação do tempo de ciclo e duração de cada fase de acordo com as condições de chegada e de volume da via de menor movimento.

Para sinais completamente atuados, é necessário estabelecer tempos de verde mínimo e máximo para todas as chegadas da interseção. Durante condições de tráfego

fego intenso, este tipo de controlador tenderá a operar como um sinal de tempo fixo, também durante condições de pouco tráfego - e particularmente durante aquelas em que o fluxo varia de via para via - maiores vantagens podem resultar.

Os sinais que operam segundo relação entre volume e densidade são os mais complexos do tipo de sinais completamente atuados. Esses controladores permitem um ajustamento quase contínuo tanto da duração da fase como do tempo de ciclo, isto de acordo com dados da distribuição de chegadas dos veículos, do tempo de espera para todas as vias da interseção; esses dados são detectados, armazenados dentro da memória do sinal, e continuamente analisados para uso em conjunto com os tempos mínimos de verde, incrementos de tempo verde e tempos máximos de verde. O sinal é então mais responsável pelas atuais condições de tráfego e variações no volume, e então pode ser usado mais efetivamente para minimizar o tempo de espera ou aumentar a capacidade.

Na maioria dos centros urbanos seria irrealístico limitar a atenção para interseções isoladas desde que sua proximidade física e dependência de comportamento requerem que o sistema completo seja considerado. O mais simples caso seria uma grande rua com interseções sinalizadas, e o caso mais complexo seria a rede de tráfego completa. Vários tipos de sistemas de controle de sinais são usados para esses problemas, incluindo: (1) sistemas simultâneos; (2) sistemas alternados; (3) sistemas progres-

sivos, e (4) sistemas controlados por computadores.

Com um sistema simultâneo, todos os sinais ao longo da via mostram a mesma cor ao mesmo tempo. O tempo de ciclo é idêntico para todas as interseções ao longo da via. Geralmente o sistema é somente útil para ruas com pequenos blocos (e então para somente uma distância limitada) ou talvez para vias com condições de permitir altas velocidades. Contudo, sob condições extremas de operação, quando os sistemas progressivos frequentemente fracassam, os sistemas simultâneos podem ter uma vantagem desde que o tráfego para todos os blocos se movem juntos.

Com um sistema alternado, um grupo (ou sequência) de sinais estará vermelho, o seguinte verde, e assim por diante, através do desenvolvimento da via. O sistema pode conduzir a movimentos contínuos de veículos (dependendo das velocidades, larguras dos cruzamentos, etc) e sob condições de tráfego intenso pode também operar mais eficientemente do que os sistemas progressivos.

Com um sistema progressivo, interseções sucessivas terão um tempo de ciclo comum, mas as fases vermelha e verde para interseções individuais podem ser variadas para acomodar condições do tráfego local que atravessa.

Uma extensão óbvia do sistema progressivo de uma simples via seria o controle de uma completa rede de

tráfego. Tem-se dedicado estudos e desenvolvidos esquemas que atualmente têm sido implementados e operando com uma eficiência bastante regular. O problema do controle de uma rede de tráfego envolve uma grande quantidade de dados e quase sempre requer os serviços de um computador ².

2.5 - Fatores que afetam a Capacidade de Interseções Sinalizadas.

Vários são os fatores que atuam na performance de um semáforo:

- a) Geometria e Dimensões - de um modo geral a capacidade de atendimento de uma interseção diminui quando o raio de curvatura da trajetória é pequeno, obrigando a uma redução sensível na velocidade. Como ônibus e caminhões têm comprimento relativamente grande e menor aceleração do que os automóveis, gastam mais tempo para atravessar a interseção. Esta influência é mais acentuada no caso de veículos pesados em subidas. A largura da via, mais propriamente o número de faixas de tráfego, tem uma significativa importância na capacidade de um trecho típico. Obviamente, as larguras das vias variam muito com as interseções, dependendo da largu-

ra das ruas e do posicionamento de marcas no pavimento e outros dispositivos de controle do tráfego. Dados disponíveis indicam que, fundamentalmente mas com razoável tolerância, tanto a capacidade da via como volumes de serviço variam diretamente com a largura da pista ³.

- b) Condições de Estacionamento - regulamentações de estacionamento em um trecho deviam ser consideradas como medidas de controle de tráfego, em termos usuais pela sinalização e atuação policial. As condições de estacionamento têm acentuado efeito na capacidade da interseção, a presença ou ausência de estacionamento é considerada como uma condição básica que seria definida inicialmente antes que outros fatores sejam avaliados. A remoção de um estacionamento proporciona um substancial ganho na capacidade. Se a eliminação (ou adição) de estacionamento está sendo considerada em um ou ambos os lados da via, a capacidade seria avaliada para cada situação. A largura de uma via influenciada por um veículo estacionado é, em média substancialmente maior do que o simples espaço físico que ele ocupa. As

reações de precaução dos motoristas que passam manobrando súbtamente para evitar os veículos parados ou portas abrindo em suas partes, resultam em perda efetiva de mais ou menos 4,20m de largura da rua, em média. Desse modo as condições do estacionamento devem ser encaradas com serie dade na análise da performance de uma in terseção³ .

- c) Fator da Hora de Pico - nas aplicações da moderna engenharia de tráfego muitas vezes não é bastante conhecer somente que a capacidade adequada existe para contro lar, em uma hora, mas também em que momento ocorrerá o tráfego mais intenso. Va riações na demanda através da hora pode produzir pico nas taxas de chegadas para curtos períodos durante a hora que substancialmente excede a taxa média. O fator da hora de pico é uma medida de consistência de demanda. Para interseções ele é definido como a razão entre o número de veículos contados durante a hora de pico e quatro vezes o número de veículos contados durante os 15 minutos de maior intensidade de tráfego. Um fator de hora de pico deve ser considerado para cada che-

gada da interseção. Ele reflete variações nas características de pico da via e proporciona um meio mais preciso de se avaliar suas características de operação³.

- d) Parada de Ônibus - o efeito específico das paradas para descer ou subir passageiros na capacidade de qualquer interseção particular depende da área da cidade, largura das ruas, condições de estacionamento, número de ônibus e localização das paradas. Os efeitos que são causados pela localização das paradas afetando a capacidade da interseção, dependem do tipo de parada, se é simplesmente junto ao meio fio ou se tem um recuo apropriado para evitar bloqueamento do fluxo de tráfego. Esse tipo de parada, logicamente, dependerá da disponibilidade de áreas laterais para sua implantação e também do volume de ônibus que trafega por tais vias durante a hora de pico. É óbvio que uma rota com frequentes serviços de ônibus tem um efeito na capacidade consideravelmente maior do que uma servida por somente um ou dois ônibus por hora. Portanto a influência de tais fatores deverá ser estudada em cada caso separadamente de mo-

do a se avaliar mais precisamente os seus efeitos e se adotar procedimentos corretos para minimizá-los de modo a se preservar a performance das interseções³.

2.6 - Abordagem de Variáveis

Para o dimensionamento do tempo de ciclo de um semáforo é preciso que se conheça o comportamento de determinadas variáveis como por exemplo os volumes de tráfego envolvidos em cada direção principalmente nos períodos de pico.

As principais variáveis que serão abordadas são as seguintes:

- Fluxo médio nos períodos de pico;
- Tipo de distribuição das chegadas dos veículos;
- Tipo de distribuição de atendimento aos veículos;
- Intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos que atravessam uma dada seção transversal da rua;
- Velocidade média dos veículos durante a travessia do sinal;
- Tempo necessário para o último veículo atravessar a interseção;

- Tempo necessário para colocar a fila em andamento;
- Fila média na faixa;
- Tempo médio de espera na fila.

As chegadas dos veículos podem ser estudadas de duas maneiras diferentes:

- a) Analisando os intervalos entre as chegadas sucessivas, e
- b) Analisando o número de chegadas durante intervalos de tempo com duração pre-determinada.

A análise dos intervalos fornece mais informações sobre o processo de chegadas e por isso é recomendável. O segundo método pode ser aplicado quando existem indícios claros de que o processo é de Poisson.^{2,4,5}

Suponha que se mediram n intervalos sucessivos, conduzindo os valores $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. Pode-se representar os intervalos e as chegadas (eventos) numa escala linear, conforme indicado na figura 2.

Seja t o intervalo de tempo total de chegadas dado por:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i$$

A origem do intervalo t_1 (e por conseguinte, de t) pode coincidir ou não com uma chegada de veículo ao sinal.

A razão média de chegadas λ é calculada dividindo-se o número de chegadas (n) pelo intervalo total:

$$\lambda = n/t \quad (\text{chegadas por unidade de tempo})$$

Eddie⁶, estudando as chegadas de veículos em intervalos de 30 segundos, obteve um bom ajustamento da distribuição de chegadas à distribuição de Poisson, para vazões baixas. Para vazões maiores, a distribuição de chegadas era melhor representada por uma distribuição normal. Drew e Pinnell⁷, verificaram que as chegadas de veículos podiam ser representadas por uma distribuição de Poisson durante o período de 30 minutos de pico, mas não durante uma hora de pico.

O processo de atendimento dos veículos que chegam ao sistema depende de:

- a) Disponibilidade de posições de serviço, as quais podem estar todas ocupadas ou haver uma ou mais vagas, sendo que, no caso de interseções, seriam as faixas de tráfego;
- b) Disponibilidade de elementos para serem atendidos, que seria representado por veículos que chegam ao sistema.

De uma forma geral existirão momentos em que não há fluxo de veículos em todas as faixas. Em outras ocasiões, os veículos que chegam são obrigados a esperar

por não poderem cruzar a interseção imediatamente.

O tempo de atendimento, ou seja para atraves sar o cruzamento, é também uma variável aleatória.^{4,5}

Uma outra variável importante para o dimensionamento operacional de um semáforo é o tempo perdido pa ra colocar a fila em movimento e para que se possa deter- minar o seu valor é preciso que se conheça os intervalos (em segundos) entre todos os veículos da fila, ou seja entre o aparecimento da luz verde e o primeiro veículo, entre o primeiro e o segundo veículo, entre o segundo e o terceiro veículo e assim por diante. Uma vez conhecido o valor do intervalo mínimo médio entre veículos consecuti- vos, o tempo perdido para colocar a fila em movimento po- de ser determinado através do somatório das diferenças en tre cada um dos intervalos observados e o intervalo míni- mo médio.

Logo,

$$k_1 = \sum_{i=1}^n (k_i - H) \quad (1)$$

Onde,

k_1 , tempo perdido para colocar a fila em mo vimento (em segundos);

k_i , intervalo entre veículos consecutivos (seg.);

H, intervalo mínimo médio ou "time headway" (seg.);

n, número de veículos na fila.

O tempo gasto pelo último veículo para atravessar a interseção depende da velocidade média dos veículos e da largura da interseção. Para o último veículo é permitido que ele comece a atravessar a interseção durante a fase amarela.^{2,8}

O tempo gasto pelo último veículo para atravessar a interseção pode ser determinado através da expressão seguinte:

$$k_{2i} = \frac{DP_i + L}{U_i} \quad (2)$$

Onde,

k_{2i} , tempo perdido para o último veículo atravessar a interseção no sentido i ;

DP_i , distância a percorrer (em alguns casos é a própria largura da interseção, em metros);

L , comprimento do veículo (em metros);

U_i , velocidade média dos veículos por fluxo no sentido i (em m/s).

As variáveis mais importantes que devem ser levadas em consideração na operação de um sinal de tráfego são fila média na faixa e tempo médio de espera.

A determinação do comprimento médio de fila é um importante critério para se estabelecer a sincronização de um determinado semáforo. Isto porque a formação de

grandes filas pode vir a prejudicar o escoamento do tráfego de outras facilidades adjacentes, causando-lhes bloqueamento trazendo sérios transtornos à operação de um sistema de tráfego.

O tempo perdido na espera é um importante fator para se decidir qual tempo de ciclo é o ótimo, ou seja aquele que minimiza a demora total da interseção proporcionando menores gastos de combustível para aqueles veículos que usam o sistema de tráfego.⁹

2.7 - Relação entre Tempo de Verde e o Atendimento

A capacidade de atendimento para um determinado período de verde é dada pela seguinte relação:

$$N = \frac{G - k_1}{H} \quad (3)$$

Onde:

N, capacidade de atendimento (nº de veículos);

G, duração da fase verde + amarelo (seg.);

k_1 , tempo perdido para colocar a fila em movimento (inércia inicial, segundos);

H, intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos que atravessam uma dada seção transversal (segundos).

De acordo com o "Traffic Flow Theory & Control" Donald R. Drew, a relação entre G (duração do verde) e N (capacidade de atendimento por faixa) pode ser colocada na forma apresentada abaixo, como pode ver na Figura 1.

$$G' = H(N-1) + k_1 + k_2 = H(N-1) + K \quad (4)$$

Onde:

k_2 , tempo necessário para que o último carro atravessasse a interseção.

Os valores de k_1 e H dependem do tipo de movimento e o valor de k_2 depende da velocidade do carro e da largura da interseção. Alguns valores de H e k_1 para os padrões norte-americanos são apresentados a seguir:⁸

Tipo de movimento	H	k_1
linha reta	2,0	4,0
dobrar à esquerda	2,0	3,9
dobrar à direita	2,0	4,1

A determinação dos valores de H e k_1 pode ser feita através de duas maneiras. Uma delas é se determinar todos os intervalos entre veículos consecutivos, desde o aparecimento do sinal verde e o primeiro veículo (considerando-se como referência a linha de meio-fio) até que o intervalo entre veículos consecutivos permaneça constante. Com isso obter-se-á o menor intervalo médio e o tempo perdido para colocar a fila em movimento pode ser obtido através do somatório das parcelas resultantes da dife-

rença entre cada intervalo e o menor médio.

Outra maneira de se determinar H e k_1 é variar sistematicamente o tempo de verde e fazer várias contagens de número de veículos (N) que atravessam a interseção para obter uma amostra satisfatória e através da análise de regressão facilmente chega-se a determinação dos respectivos valores de H e k_1 . Logo o tempo perdido total (K) em cada interseção pode ser calculado da seguinte maneira:

$$K_i = k_1 + k_{2i} \quad (5)$$

Onde:

K_i , tempo perdido total para o fluxo i , (em segundos);

k_1 , tempo perdido para colocar a fila em movimento, sendo igual a 3,9 segundos para todos os fluxos;

k_{2i} , tempo perdido para o último veículo do fluxo i atravessar a interseção (em segundos).

A relação entre G (duração do verde) e N (capacidade de atendimento por faixa) pode ser representada pela seguinte expressão:⁸

$$G' = 2,1 (N-1) + K \quad , \text{ ou} \quad (6)$$

$$G' = 2,1 \times N + \quad + K - 2,1 \quad (7)$$

2.8 - O Modelo de Webster

Em 1958, Webster do Road Research Laboratory na Inglaterra descreveu uma compreensiva análise da performance de uma interseção sinalizada². Webster considerou o fluxo de tráfego com natureza randômica e desenvolveu equações das quais o tempo de espera por veículo (e tempo total de espera da interseção) podem ser computados como uma função do tempo de ciclo, a duração do tempo de verde, o volume por faixa de tráfego, e "o grau de saturação" (ou relação entre o fluxo atual e o fluxo máximo que pode passar através da interseção). Para completar ele desenvolveu modelos para computar um tempo de ciclo aproximado que minimizará o tempo total de espera, e para calcular os comprimentos médios de filas e a probabilidade das filas alcançarem algum valor máximo.

Os resultados de Webster foram obtidos de um estudo de simulação combinado com análise teórica e então checados contra dados de campo.

A pesquisa de Webster representa um excelente exemplo da aplicação dos métodos de simulação para obter resultados úteis e práticos e, posteriormente foi usada extensivamente por Bone, Martin e Harvey⁹ para desenvolver um caminho geral para a seleção de um tempo de ciclo para sinais de tempo fixo. Sua aproximação geral para a análise de interseções sinalizadas envolve os seguintes aspectos:

- Consideração quanto à performance do veículo;
- Determinação do período amarelo;
- Duração do tempo de verde;
- Determinação do tempo de espera;
- Determinação dos comprimentos de fila;
- Determinação da probabilidade com que os veículos transporão a interseção durante a primeira fase verde.

As computações são repetidas para um certo número de possíveis tempos de ciclo, e o valores para o tempo de espera, comprimento de fila e probabilidade de entrada durante a primeira fase verde são usados como base para selecionar o tempo de ciclo ótimo. Estes meios servem como critério uma vez que tempo de espera por veículo e a probabilidade de entrada durante a primeira fase verde geralmente caracterizam o custo de atendimento aos veículos nas interseções; também, tanto o comprimento médio da fila como a probabilidade que qualquer comprimento máximo será excedido são muitas vezes importantes fatores de projeto e pois representam vital informação ao engenheiro de tráfego. 2, 10.

2.8.1 - Consideração da Performance do Veículo

Quando um sinal se torna verde, o primeiro veículo geralmente fica sujeito a um intervalo de tempo

ou um tempo de espera inicial, e então é seguido por outros veículos. Daí, todos se movem deixando entre si intervalos de tempos aproximadamente iguais desde quando um fluxo contínuo seja mantido. O movimento de veículos através da interseção na maioria dos casos se torna complicado quando se considera os movimentos de conversões, passageiros de pedestres e o efeito de veículos comerciais. Existem vários métodos que tratam do assunto, mas aqui será adotado aquele que utiliza fatores empíricos de correção onde se considera esses efeitos e os transforma em volume equivalente de unidades de carro de passageiro (p.c.u). A técnica envolve aumento do volume atual de veículos para proporcionar um tempo adicional requerido pelos movimentos de conversão e veículos comerciais. Este método é reconhecidamente aproximado, mas é de uso conveniente e, quando adequadamente aplicado, produz resultados satisfatórios para sincronização e avaliação da performance. Contudo, se tráfego de caminhões ou movimentos de conversões têm características acentuadas, estes itens devem ser examinados separadamente.²

- a) Efeitos de Movimentos de Conversões: Veículos que dobram à esquerda levam mais tempo para transpor uma interseção do que aqueles que seguem em linha reta. Segundo estudos realizados para os padrões norte-americanos², o valor médio de 1,3 seg. deve ser adicionado ao tempo de verde nor

mal para cada veículo que dobra à esquerda. Este incremento é para ser aplicado à soma das conversões à esquerda que entram na interseção de cada direção durante a mesma fase verde. Desde que o valor 1,3 seg. somente se aplica a condições similares às aquelas das interseções onde o retardamento de conversão à esquerda foi observado, é que mediante levantamento de campo se determinou valores apropriados para as interseções em estudo (§ 4.1.1).

- b) Efeito de Veículos Comerciais: Por causa do seu comprimento e geralmente mais baixa capacidade de aceleração, veículos comerciais requerem mais tempo para transpor uma interseção do que carros de passageiros. O efeito variará largamente com os diferentes tamanhos dos caminhões. Sua influência é mais marcante para veículos pesados, especialmente em aclives. Greenshields et al tem sugerido que para entrar na interseção um veículo comercial em média equivale a 1,5 carros de passageiros. As condições supostas para este fator são greide em nível e uma predominância de caminhões pequenos e médios. A parcela de tempo extra para um caminhão entrar na in

terseção sobre aquele necessário para um carro de passageiro variará com a posição do caminhão na faixa de tráfego da via. Se é o primeiro da fila, será adicionado materialmente ao intervalo inicial, especialmente se carregado. Se ele entra durante um período de fluxo de saturação e mantém a mesma velocidade dos outros veículos, o efeito será bem reduzido².

2.8.2 - Período Amarelo

O objetivo da fase amarela é o de alertar os veículos que se aproximam de que a fase vermelha está prestes a se iniciar e permitir que os veículos que já tenham alcançado a interseção, possam atravessá-la. Uma regra empírica utilizada nos Estados Unidos atribui um segundo para cada 10 milhas/hora de velocidade permitida. O problema no entanto requer uma análise mais criteriosa⁴.

Uma má escolha da fase amarela pode gerar o que se denominou de "região de dilema", constituída por uma zona próxima à interseção, na qual um veículo não pode parar com segurança, nem tampouco tem condições de cruzar a interseção sem um aumento sensível de velocidade⁴. Olson e Rothery¹¹ sugerem que o período amarelo deve ser tal que um veículo que poderia apenas parar (ao ver a luz amarela) antes de entrar na interseção ou poderia também

continuar com uma velocidade uniforme e atravessar a interseção antes que a luz se torne vermelha. Este período amarelo de não dilema seria

$$t_a = t_d + \frac{U}{2A_2} + \frac{W + L}{U} \quad (8)$$

Onde:

t_a , duração da fase amarela (ou ambar), seg;

t_d , tempo de reação do motorista, seg;

U , velocidade de aproximação do veículo, m/seg;

W , largura da interseção, metros;

L , comprimento do veículo, metros;

A_2 , taxa constante da desaceleração, m/seg².

A parcela $\frac{U}{2A_2}$ da expressão representa o tempo para percorrer a distância necessária para frear o veículo a partir da velocidade U e $(W+L)/U$ representa o tempo para atravessar a interseção. De certo modo, isto representa um tempo de amarelo razoavelmente grande, mas é condizente com outras leis de tráfego e faz com que o motorista evite a concepção da zona de dilema.^{2, 10}

2.8.3 - Duração da Fase Verde

Antes que qualquer tempo de ciclo possa ser

avaliado, ele deve ser dividido em fases verde com indicação dos fluxos de tráfego da interseção que terão prioridade em cada fase do sinal. O tempo disponível para distribuição é o tempo de ciclo menos os elementos de tempo fixo independentes do tempo de ciclo, (tal como tempo perdido).

O tempo total de verde disponível para os movimentos dos veículos é dado pela duração do ciclo menos o tempo perdido total. De um modo geral, inicialmente tempo é perdido para colocar a fila de veículos em movimento e também no final do período amarelo quando se espera o último veículo atravessar a interseção. Então, em qualquer fase, *

$$K = k_1 + k_2 , \quad (9)$$

Onde:

K , tempo perdido total, seg;

k_1 , tempo perdido para colocar a fila em movimento, seg;

k_2 , tempo perdido para o último veículo atravessar a interseção, seg.

Dessa maneira o tempo total de verde efetivo disponível para movimentos dos veículos será dado por:

$$G_E = C - \sum_{i=1}^p K_i , \quad (10)$$

(*) Para maiores esclarecimentos a respeito das parcelas de tempo perdido ver seções 2.6 e 4.1.

Onde:

G_E , tempo total de verde efetivo, seg;

K_i , tempo perdido total durante a i^{th} fase, seg;

p , número de fases;

C , tempo de ciclo, seg.

O tempo total de verde efetivo para movimentos dos veículos pode ser distribuído entre as fases em proporção direta aos volumes de cálculo durante cada fase. Assim em cada artéria seleciona-se a direção de maior intensidade de tráfego, tem-se dessa maneira os fluxos dominantes (incluindo ajustamentos para movimentos de conversão, veículos comerciais, etc). Contudo, em situações onde uma fase tem significativamente um maior volume total de tráfego (provavelmente por causa de um maior número de faixas), a experiência tem mostrado que pequenas reduções no tempo total de espera da interseção podem ser alcançadas através de um aumento da duração da fase verde a favor da fase de mais alto volume.

Para a distribuição proporcional de G_E , a fase verde total (incluindo o período amarelo) pode ser obtido como segue:

$$G_1 = \frac{VC_1}{VC} \times G_E + K_1$$

.....

$$G_i = \frac{VC_i}{VC} \times G_E + K_i$$

.....

$$G_p = \frac{VC_p}{VC} \times G_E + K_p, \quad (11)$$

Onde:

G_i , tempo de verde e amarelo durante a i^{th} fase, seg;

VC_i , volume de cálculo durante a i^{th} fase (volume dominante de cada fase);

VC , soma dos volumes de cálculo durante to das as fases = $\sum_{i=1}^p VC_i$.

Note que para determinar a duração vigente da fase verde é preciso adicionar o tempo perdido. E, quando se fizer referência à fase verde, o período amarelo es tã incluído dentro do tempo de verde. 2, 10

Também, $G_{E,i}$ o tempo de verde efetivo durante a i^{th} fase, é

$$G_{E,i} = G_i - K_i \quad (12)$$

2.8.4 - Tempo de Espera

O tempo médio de espera por veículo em um fluxo de uma chegada j durante a fase i pode ser deter-

minado através da expressão (13), que foi desenvolvida por Webster por meio do estudo do escoamento do tráfego em uma interseção com sinal luminoso¹⁰:

$$d_j = \frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i X_j)} + \frac{X_j^2}{2 V_j(1-X_j)} - 0,65 \left(\frac{C}{V_j^2} \right)^{1/3} X_j^{2+5\lambda_i}, \quad (13)$$

Onde:

d_j , tempo médio de espera por veículo em um fluxo de uma chegada j durante a fase i , seg;

C , tempo de ciclo, seg;

λ_i , proporção do tempo de ciclo efetivamente verde durante a fase i $\left[= (G_i - K_i) / C \right]$;

V_j , volume atual na chegada j durante a fase i , em veículos/faixa/seg;

X_j , grau de saturação para a chegada j (razão entre o fluxo atual e fluxo máximo que pode entrar na interseção através dessa chegada) $\left[= V_j / \lambda_i S \right]$;

S , fluxo de saturação, veículos/faixa/seg ($= 1/h$);

h , intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos do fluxo máximo, pode ser 2,0 ou 2,1 seg.

Para a expressão (13), foi necessário fazer uma distinção entre cada uma das chegadas em que o tráfego se move durante a fase i . Isto porque o tempo de verde efetivo (e , posteriormente, λ_j) para a fase i é determinado com base nos volumes de cálculo máximo ou o volume da faixa mais saturada da via, isto para todas as chegadas, pelas quais o tráfego se move durante a fase i , enquanto o tempo de espera para a chegada j é baseado nos volumes atuais de seus fluxos de tráfego (que pode ser diferente do volume de cálculo máximo da fase i).

O fluxo médio atual por faixa para a chegada j pode ser determinado por meio da expressão (14):

$$M_j = V_j C, \quad (14)$$

Onde:

M_j , fluxo médio atual/faixa/ciclo para a chegada j ;

V_j e C são definidos como anteriormente.

Uma vez calculado d_j através da expressão (13), o tempo total de espera por hora pode ser determinado simplesmente multiplicando d_j pelo volume por hora de cada faixa. Além disso, se a chegada j tem múltiplas faixas e diferentes volumes em cada faixa, o tempo de espera para cada faixa da via pode ser computado separadamente. Por outro lado, se os volumes de cada faixa da via são iguais ou se resultados aproximados são suficientes (onde

os volumes das faixas diferem por pouco), através dos volumes das faixas da chegada j pode ser calculada a média a fim de computar V_j e X_j , e, posteriormente, d_j .

Finalmente, o tempo total de espera da interseção pode ser computado somando-se os tempos de espera para todas as faixas de todas as chegadas da interseção (ou somando-se os tempos de espera para todas as chegadas se o método aproximado é usado ²).

2.8.5 - Comprimentos de Fila

O tamanho da linha de espera ou a fila de veículos esperando em uma interseção sinalizada é de particular interesse em áreas urbanas onde as interseções se encontram bastante próximas umas das outras. Grandes filas de veículos podem bloquear o tráfego de interseções adjacentes ou podem interferir com outras atividades importantes (ou pontos de acesso). Também filas excessivas podem interferir com o próprio alinhamento de veículos que fazem movimentos de conversão à esquerda ou à direita. O conhecimento do comprimento de fila pode então ser um critério importante para a avaliação da sincronização do sinal.

Uma fórmula aproximada para determinar o comprimento médio de fila para o começo do período verde para as j -ésimas faixas foi desenvolvida por Webster¹⁰ e é

como segue:

$$N_j = \frac{V_j R_i}{2} + V_j d_j \text{ ou } N_j = V_j R_i, \text{ o que} \\ \text{der o maior valor,} \quad (15)$$

Onde:

N_j , número médio de veículos esperando na fila da j -ésima faixa pelo início do período verde;

V_j , taxa do fluxo atual para a j -ésima faixa, veículos/faixa/seg;

R_i , i -ésima fase vermelha, seg;

d_j , tempo médio de espera por veículo para a j -ésima faixa, seg.

A equação (15) somente permite a determinação da fila média, ou aquela fila que será excedida durante aproximadamente 5 ciclos num total de 10. Contudo, numa análise mais detalhada da performance da interseção, é muitas vezes útil conhecer o comprimento de fila que será igualado ou excedido em somente 1 entre 20 ciclos ou somente 5 por cento do tempo. Webster estabeleceu os comprimentos de fila para este caso de maior possibilidade quando se leva em conta o número de veículos acumulados durante a fase vermelha e aquelas que podem ter sido remanescentes de uma fase verde prévia. A Tabela 1 inclui estes comprimentos máximos de fila (ou 95 por cento de probabilidade) para várias situações de fluxo.

2.8.6 - Probabilidade de Entrada na Interseção Durante a Primeira Fase Verde

Se os motoristas são impossibilitados de de ocupar a interseção durante a primeira luz verde após as chegadas e são retidos por um ou mais ciclos, eles tornam-se irritados com a espera e além disso inevitavelmente re tardam sucessivos veículos. Consequentemente um outro critério de performance da interseção é determinar a probabilidade $P(X)$ de um veículo ser capaz de entrar durante a primeira luz verde. Isto é como uma grande medida de con forto e conveniência associado com uma sincronização particular do sinal.

Para qualquer chegada (ou faixa de tráfego), a probabilidade de ser capaz de entrar durante a primeira luz verde pode ser determinado como segue:

1. Supõe que as chegadas na interseção são regidas por uma distribuição de Poisson;
2. Calcula o número máximo de veículos que podem entrar na interseção durante o tem po de verde efetivo;
3. Usando probabilidade acumuladas de Poisson, como mostrado na Figura 3 (adaptada da referência 2, pg 458), e o fluxo atual por ciclo para a chegada (ou faixa de tráfego) considerada, ou M_j , determina a probabi-

lidade associada com o número de chegadas durante um ciclo completo sendo igual ou menor do que o número máximo de veículos que podem entrar durante o tempo de verde efetivo.

Esta aproximação não leva em conta os efeitos do retardamento de veículos retidos em ciclos anteriores, e sim estima a probabilidade de ser capaz de desocupar a interseção durante a primeira fase verde.

Para os cálculos serão empregados as seguintes expressões:

$$N_j = \frac{G_j - k_j}{H} \quad e, \quad (16)$$

$$M_j = V_j C_j \quad (17)$$

Onde:

N_j , número máximo de veículos que podem entrar durante a fase verde;

M_j , fluxo médio atual por ciclo e por faixa.

Os demais parâmetros se referem às variáveis já descritas anteriormente ^{2, 10}.

2.8.7 - Intervalo para Análise de vários Tempos de Ciclo

Com a finalidade de avaliar propriamente a performance do controle sinalizado para uma interseção, é

necessário analisar um número de tempos de ciclo alternativos. Na prática, o número de tempos de ciclo a ser analisado deve ser uma função dos recursos disponíveis para fazer os cálculos. Contudo, pelo menos 6 (seis) tempos de ciclo seriam avaliados a fim de determinar a forma geral do critério performance como função do tempo de ciclo. Ciclos adicionais também devem ser analisados para acrescentar detalhes na área crítica da curva. Com auxílio de um programa de computador pode-se avaliar um grande número de tempos de ciclo fazendo-os variar a intervalos de 5 ou 10 segundos, tornando-se possível traçar curvas ou diagramas de tempo de espera, fila média, etc., em função do tempo de ciclo e com base na análise de tais diagramas pode-se determinar o tempo de ciclo "ótimo" que minimiza essas variáveis. Para tempos de ciclos menores do que o "ótimo", tempos de espera aumentam muito rapidamente e teoricamente tornando-se infinito quando a interseção torna-se saturada. Para tempos de ciclo maiores do que o "ótimo", tempos de espera aumentam, mas segundo uma taxa muito mais baixa.

Webster¹⁰ deduziu uma expressão aproximada para determinar o tempo de ciclo C_0 que minimizará o tempo de espera total da interseção, a equação para isto conhecida como tempo de ciclo "ótimo" é

$$C_0 = \frac{1,5 K + 5}{1 - y} \quad (18)$$

te à pesquisa foram feitas observações visuais que permitem discernir perfeitamente a política adotada pelo operador do sinal. Para uma melhor análise foram elaborados modelos de simulação para as interseções controladas manualmente e também para a interseção que possui um sinal com controle automático.

As observações seguintes referentes à algumas chegadas das interseções são de caráter elucidativo, tentando, de certa forma, explicar a ocorrência de grandes demoras e formação de comprimentos de fila exagerados.

1. Chegada I.A - De acordo com ilustração 2 existe um estacionamento paralelo ao meio fio do lado direito da via e que influi na capacidade da mesma, principalmente quando estão trafegando ônibus e caminhões em número suficientemente grande. Na atual situação, o estacionamento reduz a largura da via de um valor igual a 2,75 m (9 pés), restando apenas 6,45m que permitem a formação de duas faixas de tráfego, com 3,23m de largura cada uma, o que é insuficiente para o tráfego de veículos pesados (ônibus e caminhões).

2. Chegada I.B - Nesta chegada foram observadas grandes filas (quase sempre uma só) em razão da existência do estacionamento a 45º, como mostra a ilustração 1, localizado do lado esquerdo da rua o qual reduz a capacidade da mesma a menos da metade. Algumas vezes se estaciona em fila dupla piorando ainda mais a situação exist

tente. Esse tipo de estacionamento em ângulo ocupa, na via, uma largura de 5,83m restando apenas 4,17m da sua largura total o que na verdade sô dá mesmo para uma faixa de tráfego de 3,5m de seção transversal. A capacidade atualmente existente não permite a formação de duas filas no espaço disponível, principalmente quando ocorre a chegada de um caminhão que é mais largo do que um carro de passeio e bloqueia a formação de uma segunda fila. Sendo assim é aconselhável aumentar a capacidade da via e uma solução seria mudar de estacionamento em ângulo para estacionamento paralelo ao meio fio, que requer apenas uma largura de 2,75m. Assim, seria possível se estabelecer duas faixas de tráfego com 3,6m cada uma e aí então haveria melhores condições para o escoamento do tráfego naquela artéria.

3. Chegada II.A - Nesta artéria foram observadas grandes filas (quase sempre uma fila sô) em razão da presença do estacionamento a 45º, como mostra a ilustração 3, situado no lado direito da Rua, o que reduz a capacidade da mesma a menos da metade. Às vezes, há a formação de estacionamento em fila dupla que piora a situação atual prejudicando bastante a performance da interseção. Esta pista com a capacidade existente não permite a formação de duas filas na chegada, principalmente quando há presença de ônibus ou caminhão na fila que por ser mais largo impede a formação de uma segunda fila. Como é sabido tais veículos requerem uma faixa de tráfego com cerca de 3,5m de largura. Um estacionamento em ângulo de 45º ocu-

pa, da via, uma largura de 5,83m. Como a largura total é de 9,2m, resta apenas espaço para uma faixa de tráfego.

Para aumentar a capacidade da via para duas ou três faixas de tráfego é preciso que se elimine totalmente o estacionamento existente ou, na pior das hipóteses, que se mude a forma de estacionamento em ângulo para o tipo paralelo ao meio fio. Não é o ideal porque não permite a chegada simultânea de veículos comerciais em ambas as faixas, mas é aceitável desde que se discipline o tráfego de modo que os veículos pesados usem uma só faixa de tráfego (a da direita) deixando uma segunda faixa (a da esquerda) somente para carros de passageiros. Para isso é necessário que se faça as sinalizações horizontal e vertical orientando adequadamente os motoristas como proceder.

4. Chegada II.B - De acordo com a ilustração 5 e a Figura 4 esta via tem uma largura de 10,0m permitindo a implantação de três faixas de tráfego com 3,33 m de largura cada uma, sendo que atualmente duas delas são usadas pelo tráfego direto na Rua Venâncio Neiva (fluxo VN1) e a outra faixa ou seja a da esquerda, é ocupada pelo tráfego que se dirige para a Avenida Floriano Peixoto em direção à Praça da Bandeira (fluxo VN2). Às vezes a faixa do meio é usada pelos veículos que drobram à esquerda (fluxo VN2) quando o volume de tráfego neste sentido aumenta.

Foi observado que o estacionamento e o ponto de taxi existentes na Rua Venâncio Neiva, após o semá-

foro, na hora de pico têm provocado sérios transtornos à performance da interseção, reduzindo a capacidade da via e chegando até a bloquear totalmente a interseção não permitindo o tráfego de veículos através da Avenida Floriano Peixoto.

Às vezes, quando alguns motoristas estacionam em fila dupla e chega um veículo grande, o tráfego é engarrafado chegando à situação descrita no parágrafo anterior. Para evitar problemas dessa natureza é aconselhável aumentar a capacidade da via eliminando o estacionamento ou o ponto de taxi.

5. Chegada II.C - Nesta pista, na prática, são usadas duas faixas de tráfego embora disponha da largura total da via que é de 9,20m. Mas lateralmente existe um terminal de ônibus, como mostram as ilustrações 6 e 7, que de certo modo influencia na performance da interseção ainda que não seja muito acentuadamente devido ao fato do mesmo se localizar num recuo de 2,50m ao lado da via.

6. Chegada III.A - A performance da interseção III é influenciada pela sua geometria e relevo, como mostram as ilustrações 6 e 7, sendo que aí o efeito é agravado pela base do relógio existente, que obriga os veículos a formarem fila com raio de curvatura provocando um certo emprensamento àqueles que trafegam na faixa da esquerda.

De acordo com a ilustração 8, na Praça da

Bandeira, existe um terminal de ônibus que reduz a capacidade da via prejudicando sensivelmente a performance da interseção. Além do espaço normalmente ocupado, nas horas de pico os ônibus que chegam, se acumulam em filas que bloqueiam totalmente a interseção, pois há um armazenamento na própria via e então surgem os engarrafamentos.

A única solução para este problema é se fazer a mudança desse terminal para um local adequado.

7.Chegada III.B - De acordo com a ilustração 4 existe um estacionamento paralelo ao meio fio do lado esquerdo e um ponto de taxi do lado direito que reduzem a capacidade à metade. Esta via tem uma largura de 13,10m. O estacionamento e o ponto de taxi ocupam, na seção transversal, uma faixa de aproximadamente 5,50m de largura restando 7,60m que proporcionam a implantação de duas faixas de tráfego com 3,80m cada uma, o que permitem boas condições para o escoamento do tráfego.

Foram observadas grandes filas por causa da ocorrência de estacionamento em fila dupla durante certos momentos reduzindo-se assim o fluxo do tráfego a uma só faixa. Quando a situação perdura por muito tempo a tendência é se ter a formação de uma única fila de comprimento bas-

8. Chegada III.C - Como se pode ver na ilustração 8, neste trecho existe um terminal de ônibus que também reduz a capacidade da via à metade.

Quando chegam vários ônibus de uma vez há um bloqueamento total ou parcial da via não permitindo a passagem de outros veículos. O mesmo ocorre quando chegam veículos comerciais na fila não dando lugar à formação de duas filas de espera. Por isso foram observados comprimentos de fila bastante elevados. Uma solução para o problema seria também se mudar o terminal para um local conveniente 3, 12 e 13.

3.3 - Modelos de Simulação Utilizados

3.3.1 - Sinal com Controle Automático

Enquadra-se neste caso a interseção I que é equipada com um semáforo automático operando segundo dois tempos de ciclo diferentes que dão prioridade ao tráfego da Rua Floriano Peixoto ou ao da Rua Maciel Pinheiro, tendo uma duração de 37,0 e 38,0 segundos respectivamente. Cada tempo de ciclo desses é composto de duas fases: uma fase verde e uma fase vermelha. O primeiro deles apresenta uma duração da fase verde de 17,0 segundos seguida da outra fase que tem uma duração de 20,0 segundos. Já o tempo de ciclo de 38,0 segundos é dividido numa fase verde de 18,0 segundos de duração e uma fase vermelha de 20,0 segundos

também de duração.

As variáveis que foram levantadas em campo através de pesquisa são apresentadas na seção 4.1. Para determinação do tempo perdido ou tempo de espera foi usado um modelo baseado na fórmula empírica de Webster¹⁰ onde se considerou como dados para o programa de computador os tempos de ciclo com as respectivas fases, tempo perdido para colocar a fila em movimento e as vazões médias. Como se sabe, a existência de estacionamento, terminais urbanos nas proximidades de um sinal luminoso causam uma maior demora aos usuários do sistema de tráfego fazendo com que haja um acréscimo no intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos que se movimentam em uma fila. A influência de tais fatores é difícil de ser avaliada em termos quantitativos e para que se chegasse a uma boa aproximação da realidade de campo foi inserido no programa de computador apresentado no Apêndice C uma variação nos intervalos mínimo médio afim de que posteriormente se possa fazer uma comparação entre os resultados colhidos e os levantamentos de campo.

3.3.2 - Sinal com Controle Manual

As interseções II e III são dotadas de semáforos com controle manual sendo o principal objetivo o estudo da política adotada pelo operador para dar priorida-

de a determinado fluxo de tráfego. Nesse tipo de controle pode-se ter uma grande variação no tempo de ciclo a depender da hora do dia que implicará num baixo ou alto volume de tráfego. Determinados comprimentos de fila também irão influenciar numa mudança na prioridade do sinal. Uma amostragem dos tempos de ciclo adotados pelo operador é apresentada na Tabela 3 do Apêndice A, a partir da qual foram determinados parâmetros que foram úteis na simulação da presente situação.

Para que se pudesse simular a operação dos sinais foi elaborado um programa de computador que é apresentado no Apêndice C, o qual é composto de um programa principal e quatro subrotinas que se encarregam da geração de números, de tempos de ciclo e de intervalos entre veículos consecutivos que no caso seria a chegada de veículos às filas que se formam nas proximidades do sinal.

No modelo utilizado foi empregado um método de incremento de tempo fixo, onde o computador simula um "relógio" que registra o instante de tempo real que foi alcançado pelo sistema, de modo que se possa manter uma sequência de tempo correta para os acontecimentos. O tempo indicado pelo "relógio" é chamado de "tempo de relógio". O relógio é sintonizado em intervalos de tempo discretos e uniformes de 1,0 (um) segundo o sistema é examinado ou explorado em todas as unidades do "tempo de relógio" para determinar se existe algum evento que deva ocorrer naquele determinado "tempo de relógio"¹⁴.

Os intervalos entre chegadas consecutivas obedecem a uma distribuição exponencial e são gerados pela subrotina TRANS que é alimentada pela subrotina ALETO geradora de números aleatórios entre 0 e 1. Os tempos de ciclo são gerados pela subrotina GAUSS obedecendo a uma distribuição normal de parâmetros apresentados na Tabela 3 do Apêndice A e finalmente a subrotina RANDO fornece valores randômicos para geração dos tempos de ciclo. O programa principal simula a formação de filas, passagem dos veículos através das interseções, calcula as fases verde e vermelha para cada tempo de ciclo e finalmente acumula os tempos de espera em cada uma das doze faixas de ambas as interseções. Um esquema das faixas de tráfego é apresentado na Figura 5 do Apêndice A mostrando também as fases de cada sinal.

A existência de estacionamentos e terminais urbanos nas proximidades dos cruzamentos como também a geometria das interseções levam a um maior tempo perdido na operação do sistema. Quase sempre tais fatores externos provocam bloqueamento do tráfego interferindo na continuidade do fluxo durante uma dada fase verde do sinal. De certo modo pode-se considerar que tais atrasos sejam computados no intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos que se movimentam numa mesma faixa de tráfego dando um acréscimo em seu valor. Torna-se difícil estabelecer a priori que acréscimo será dado ao valor mínimo médio de 2,1 segundos, portanto para se contornar essa dificuldade o

programa de computador executa os cálculos para valores entre 2,1 e 4,0 segundos com a finalidade de posteriormente se fazer comparações entre os resultados obtidos e os levantamentos de campo e desse modo se chegar ao valor que represente a situação do campo.

C A P Í T U L O I V

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 - Características do Sistema Estudado

Cada sistema de tráfego apresenta valores próprios para as variáveis que o caracteriza, tornando possível uma análise de seu funcionamento através de parâmetros determinados por pesquisa de campo ou qualquer outro processo similar.

4.1.1 - Fluxo Médio

Para que fosse efetuada a determinação dos valores das vazões médias correspondentes a cada fluxo foram realizadas contagens volumétricas em postos instalados em pontos estratégicos, sendo repetidas em diferentes dias da semana de modo a se pegar os momentos de maior intensidade de tráfego.

Para se obter os volumes equivalentes através da transformação dos volumes reais observados em unidades de carros de passageiros (p.c.u) é preciso conhecer os valores dos fatores de equivalência entre um veículo que dobra à esquerda e um que segue em linha reta, entre

um que dobra à direita e outro que segue direto e finalmente o fator de equivalência entre um veículo comercial e um carro de passageiro.

As observações para determinação do fator de equivalência entre um veículo que dobra à esquerda e outro que segue em linha reta foram realizados da seguinte maneira: procederam-se contagens do número de veículos que passavam durante um determinado intervalo de tempo (na maioria 15 segundos), em momentos de fluxo contínuo, para os movimentos de conversão à esquerda e em linha reta. As contagens foram repetidas de modo a se obter uma amostra satisfatória para posteriormente chegar ao intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos. O valor médio foi determinado de duas maneiras: numa delas foi calculada a média dos valores obtidos da relação entre o intervalo de tempo e o número de veículos que passaram durante esse intervalo encontrando-se um valor de 2,2 segundos para o intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos. Com a finalidade de confirmar o valor obtido acima, o intervalo mínimo médio foi calculado através da relação entre o somatório dos intervalos de tempo e o somatório do número de veículos que passaram durante esses intervalos obtendo-se um valor de 2,2 segundos o que vem confirmar o cálculo anterior.

De acordo com determinação apresentada (§2.6) o valor do intervalo mínimo médio para veículos que seguem em linha reta é da ordem de 2,0 a 2,1 segundos, então o fa

tor de equivalência entre um veículo que dobra à esquerda e outro que segue direto pode ser dado pela relação entre os respectivos valores do intervalo mínimo médio: $2,2/2,1$ ou $2,2/2,0$ o que é igual a $1,1$.

De acordo Whol - Martin², os veículos que realizam movimentos de conversão à direita necessitam de um acréscimo de 1 segundo ao valor do menor intervalo médio para os veículos que seguem direto, desse modo a folga aceitável para esses movimentos será $2,1 + 1,0 = 3,1$ segundos. O fator de equivalência terá um valor igual a $1,4$ resultante da operação $3,1/2,1$. Esse valor foi adotado em razão da impossibilidade de observações de fluxos contínuos durante um período aceitável para que se pudesse fazer as contagens a determinados intervalos do número de veículos que dobram à direita e também a situação apresentada na referência citada se assemelha bastante com aquelas das interseções em estudo sendo representados pelos fluxos MP1, VN3, FP4, MH2, FP9.

No presente trabalho foi adotado um valor de $1,5$ para o fator de equivalência entre um veículo comercial e um carro de passageiro. Isto devido ao fato de ser difícil se determinar tal fator no campo e também as condições em que foi determinado se aproximam bastante daquelas em estudo².

Usando-se os fatores de equivalência anteriormente apresentados procedeu-se a determinação dos volu-

mes equivalentes do tráfego em cada fluxo das interseções em estudo que são apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

4.1.2 - Distribuição de Chegadas

Para que a distribuição de chegadas seja Poisson, é necessário haver independência entre as mesmas. Há casos (como em uma seção da rua imediatamente após o semáforo), em que a não independência das chegadas, indica não haver aderência à distribuição de Poisson. Em alguns casos, as chegadas dos veículos podem ser representadas pela distribuição de Poisson para um determinado intervalo de observação, mas não para outros intervalos.

A fim de testar a validade de se admitir o escoamento regido por um processo de Poisson, foi feita uma contagem, a intervalos constantes de 30 segundos, do volume de tráfego por fluxo ou faixa em cada sentido, isto para todas as três interseções.

Para verificar, em caso específico, se a distribuição de chegadas obedece à distribuição de Poisson, emprega-se o teste de aderência χ^2 . No presente trabalho, foi aplicado o teste do χ^2 aos resultados do levantamento experimental apresentados nas Tabelas 8 a 16 e nas Figuras 6 a 14, e foi possível concluir que não há evidência para se rejeitar a aderência à distribuição.

4.1.3 - Distribuição de Atendimento

Os atendimentos formam processos estocásticos, cuja análise, via de regra, é difícil. Isso ocorre porque os atendimentos dependem das características próprias das facilidades de tráfego mas são função também da disponibilidade de clientes que seria a chegada de veículos. Por essa razão, dependendo do sistema, poderão haver longos períodos sem atendimento, seguidos por outros caracterizados por maior número de elementos atendidos.

Em lugar de encarar o atendimento como um processo, entendendo como tal a evolução estocástica do sistema continuamente ao longo do tempo, é preferível considerar a capacidade potencial de atendimento de cada faixa de tráfego. Em outras palavras, quando se diz que o serviço é exponencial, isso significa que os tempos de atendimento, quando houver continuidade no escoamento de tráfego, serão regidos por uma distribuição exponencial, sendo que neste trabalho é admitido uma distribuição de atendimento desse tipo.

4.1.4 - Intervalo Mínimo Médio e Tempo Perdido para Colocar a Fila em Movimento

De acordo com procedimento já exposto (§ 2.6) foram obtidos os valores dos intervalos entre veículos consecutivos que se movem numa mesma fila e são mostrados na Tabela 17.

O intervalo mínimo médio determinado é igual

a 2,1 segundos, vindo a permanecer constante a partir do sétimo veículo como se pode notar mais facilmente na curva mostrada na Figura 15 do Apêndice A.

O tempo perdido para colocar a fila em movimento pode ser determinado através do somatório das diferenças entre cada um dos intervalos observados e o intervalo mínimo médio.

Substituindo os valores de cada parcela da expressão (1) e efetuando os cálculos teremos então:

$$K_1 = 1,7 + 1,0 + 0,6 + 0,3 + 0,2 + 0,1 = 3,9 \text{ seg.}$$

Desse modo K_1 , pode ser tomado como aproximadamente 3,9 segundos por fase.

4.1.5 - Velocidade Média e Tempo Perdido pelo último Veículo

Cada sentido do movimento tem uma velocidade característica e uma distância a percorrer na travessia da interseção. Desse modo será apresentado a seguir, na Tabela 18, os valores do tempo gasto pelo último veículo para atravessar o cruzamento. Isto para cada sentido de cada interseção em estudo, e foram calculados através da expressão (2).

Para os cálculos será considerado um valor para o comprimento do veículo (L) igual a 5,0 m.

4.1.6 - Fila Média

No presente estudo, os comprimentos de fila foram determinados segundo levantamento de campo, onde se procurou obter valores que caracterizassem cada fluxo de tráfego de modo a se conseguir estabelecer uma relação entre o comprimento de fila de determinadas chegadas e a mudança de prioridade no sinal efetuada pelo operador.

Como é mostrado nas ilustrações de 1 a 8 do Apêndice B, a influência de estacionamentos, terminais urbanos, geometria da interseção, relevo, etc., foi analizada na seção 2.5. Aqui apenas se tentará expor as causas da formação de grandes comprimentos de fila e elevados tempos de espera em cada uma das três interseções.

Os valores dos comprimentos de fila observados no campo são apresentados na Tabela 19 mostrada no Apêndice A.

4.1.7 - Tempo Médio de Espera

A determinação do tempo de espera através de um modelo experimental é bastante difícil e por esta razão não foi possível fazer levantamento de campo com essa finalidade. Para contornar esse problema foram desenvolvidos modelos de simulação, descritos anteriormente (§3.3), que permitem obter os tempos de espera para cada faixa de tráfego e finalmente para toda interseção. Os resulta

dos obtidos são mostrados nas Tabelas 20, 21 e 22 apresentados no Apêndice A.

4.1.8 - Tempo Perdido Total em cada Fase do Sinal

Para as interseções em estudo as determinações dos valores de H e k_1 foram feitas de acordo com os procedimentos e cálculos apresentados nas seções 2.6 e 4.1.4, sendo que tais valores são os mesmos para todas as interseções, ou seja $H = 2,1$ e $k_1 = 3,9$. Já os valores de k_2 que são diferentes para cada interseção e cada direção de movimento foram determinados de acordo com as seções 2.6 e 4.1.5.

Os valores do tempo perdido total por fase para todas as interseções são apresentados na Tabela 23.

4.1.9 - Relação entre Tempo de Verde e o Atendimento

O estabelecimento de uma relação entre tempo de verde e o atendimento é uma importante característica de cada fluxo de tráfego. A expressão (7) juntamente com os valores do tempo perdido total apresentados na Tabela 23 permitem caracterizar cada fluxo de tráfego das interseções de maneira satisfatória.

Com os dados levantados até o momento não é possível se estabelecer uma relação entre o tempo de verde e atendimento através da análise de regressão que re-

presente satisfatoriamente o tráfego atual. Isto é váli para as três interseções em estudo porque os dados necessários devem ser coletados através de contagem do número de veículos que atravessam a interseção fixando-se sistematicamente o tempo de verde de modo que se possa repetir a contagem para um mesmo tempo de verde afim de se obter uma amostra representativa. Como um dos sinais tem controle automático torna-se difícil alterar o sistema e fazer variar o tempo de verde, já os outros dois têm controle manual e para se executar o procedimento adequado é preciso a colaboração de autoridade competente no sentido de autorizar o operador a fixar o tempo de ciclo variando-o sistematicamente de acordo com determinação prévia.

4.2 - Análise dos Resultados da Política Otimizada

A determinação da configuração de funcionamento operacional de um semáforo através do modelo de Webster (§ 2.8), de um modo geral, se baseia principalmente no tempo de espera total da interseção, nos comprimentos médios de fila e na probabilidade de entrada durante a primeira fase verde.

Na sequência de cálculo, inicialmente é determinada a duração do período amarelo de cada fase através da expressão (8).

Os tempos de amarelo apresentados na Tabela 24 do Apêndice A foram determinados adotando-se um tempo

de reação do motorista (t_d) igual a 1 (um) segundo, uma taxa constante de desaceleração (A_2) igual $3,66 \text{ m/seg}^2$, tais valores foram adotados de acordo com os padrões fornecidos por Whohl e Martin².

Para o comprimento do veículo (L) adotou-se um valor igual a 5 metros correspondendo ao comprimento médio dos carros de passageiros de fabricação nacional, valor esse sugerido por Novaes⁴. Finalmente, os valores das velocidades de aproximação (U) e da largura das interseções foram determinados no campo segundo metodologia já apresentada (§ 4.1.5), com os respectivos valores apresentados na Tabela 18 do Apêndice A.

Seguindo-se o procedimento exposto (§2.8.3) e através da expressão (12) juntamente com os volumes equivalentes dominantes de cada fase, como também as parcelas de tempo perdido e ainda a duração dos períodos amarelos de cada interseção, isto por fase, determinados e apresentados, é possível se chegar à determi

Os valores dos tempos de espera médio por veículo foram plotados em gráficos como mostram as Figuras 16, 17 e 18. Já os tempos de espera total para cada interseção são apresentados em gráfico nas Figuras 19, 20 e 21.

Para a interseção I podemos notar através das curvas mostradas nas Figuras 16 e 19, que para tempos de ciclo menores do que 35 segundos há um rápido acrêscimo no tempo de espera médio e tempo de espera total da interseção. Já os tempos de ciclo maiores do que 45 segundos há um aumento bem moderado desses valores.

Analisando as curvas das Figuras 17 e 20 podemos ver que há um rápido aumento nos valores dos tempos de espera para tempos de ciclo menores do que 45 segundos. Também pode-se notar que os tempos de ciclo acima de 55 segundos apresentam um acrêscimo bem suave nos tempos de espera para a interseção II.

Finalmente para a interseção III, as Figuras 18 e 21 mostram claramente que os tempos de ciclo com valores menores do que 45 segundos também apresentam um rãpido aumento nos tempos de espera médio e total da interseção. Já para tempos de ciclo maiores do que 55 segundos o acrêscimo nos tempos de espera apresenta uma taxa bastante discreta.

Os valores dos comprimentos de fila determinados através da expressão (15) e apresentados nas Tabelas 29, 30 e 31 do Apêndice A foram obtidos através do pro

grama de computador e da Tabela 1 já mencionados anteriormente. Os valores para a faixa crítica de cada fase da interseção foram plotados em gráfico como mostram as Figuras 22, 23, 24, 25, 26 e 27.

Através de uma análise das Figuras 22 e 23 podemos notar que para tempos de ciclo menores do que 35 segundos os comprimentos de fila médio e máximo apresentam valores elevados. Já para tempos de ciclo acima de 45 segundos o acréscimo se dá de maneira suave, podendo-se concluir que para a interseção I o tempo de ciclo ótimo está em torno de 45 segundos.

Para a interseção II a análise das curvas das Figuras 24 e 25 diz que os tempos de ciclo menores do que 50 segundos apresentam um aumento bastante acentuado nos comprimentos de fila médio e máximo da interseção. Os tempos de ciclo acima de 55 segundos apresentam uma taxa de acréscimo bem mais suave para os comprimentos de fila da interseção.

Do mesmo modo para a interseção III, as curvas das Figuras 26 e 27 mostram que os aumentos dos comprimentos de fila para os tempos de ciclo menores do que 55 segundos são bem mais acentuados do que os apresentados pelos tempos de ciclo acima desse valor.

Outro critério para análise da performance de uma interseção com sinal luminoso é a probabilidade de um veículo ser capaz de entrar durante a primeira luz verde.

Para efeitos de análise da performance da interseção somente interessa as probabilidades para a faixa crítica de cada fase (isto é, para a faixa de mais alto volume durante cada fase), portanto, nas Figuras 28, 29 e 30 serão apresentados os gráficos das faixas críticas de cada interseção, mas serão fornecidas as probabilidades para todas as faixas das três interseções como mostram as Tabelas 32, 33 e 34.*

Da análise das curvas apresentadas nas Figuras pode-se concluir que quanto maior é o tempo de ciclo maior é a probabilidade de entrada durante a primeira fase verde.

Finalmente, para as interseções em estudo foi analisado um intervalo de 10 tempos de ciclo em torno do "ótimo" determinado através da expressão (18). Os valores dos tempos de ciclo "ótimo" obtidos dessa maneira para as interseções I, II e III são respectivamente 47, 57 e 58 segundos.

4.3 - Política de Controle Manual Usada

Vários aspectos podem ser levados em consideração para se decidir inverter a prioridade de um sinal de tráfego. Os mais importantes são tempo de espera e comprimento de fila.

(*) A probabilidade de entrada $P(X \leq N)$ na interseção durante a primeira fase verde é dada em percentagem.

No estudo da situação atual pode-se observar e concluir que para os períodos de pico o operador dos sinais de controle manual leva em consideração principalmente o comprimento de fila da chegada III.A que permite apenas a acomodação de uma fila máxima de 14 carros de passageiros, para que proceda a mudança de prioridade da fase 1 para a fase 2. Para retornar a prioridade à fase 1 quase sempre era considerado o volume de tráfego procedente da Rua Venâncio Neiva que no caso estavam atravessando as interseções, como também o tempo de espera na chegada III.B. Às vezes quando ocorria a chegada de muitos ônibus no fluxo FP5, por serem tais veículos de comprimento avantajado e facilmente poderia haver um bloqueamento na interseção III, o operador então dava prioridade à fase 1.

Frequentemente os veículos que usam a fase 1 são submetidos a grandes tempos de espera principalmente na chegada II.A, onde a presença de um estacionamento em ângulo não permite a formação de duas filas de espera, fazendo com que haja o alongamento de uma única fila chegando até a bloquear o tráfego através da interseção I. Não é este fato levado em consideração pelo operador para que procedesse a mudança de prioridade dos sinais.

Fora dos períodos de pico o operador se baseia nos volumes de tráfego em cada via ou então estabelece um tempo de ciclo visualmente controlado.

4.4 - Comparação entre a Política Otimizada e a Política Usada

4.4.1 - Sinal com Controle Automático

A operação desse semáforo se baseia numa política de tempo fixo apresentando dois tempos de ciclo diferentes, um para servir o tráfego procedente da Rua Floriano Peixoto e outro para a Rua Maciel Pinheiro, cujas durações já foram apresentadas (§3.3.1).

Os resultados obtidos através da simulação de operação desse sinal são mostrados nas Tabelas 20 e 35 como também nas curvas apresentadas na Figura 31.

Numa análise das curvas nota-se que, para a faixa 6, o tempo de espera sofre um rápido aumento para valores do intervalo mínimo médio acima de 2,5 segundos, ao passo que para valores próximos de 2,1 segundos permanece quase constante. Daí, ser possível concluir que quanto maior for a influência de fatores externos no intervalo mínimo médio, maior será o tempo perdido na operação do sinal.

Uma vez feita as comparações entre as observações de campo e os resultados da simulação finalmente se conclui que o intervalo mínimo médio de 2,8 segundos é o que melhor representa a situação de campo.

Para o cruzamento entre as Ruas Maciel Pinheiro e Floriano Peixoto a política otimizada através da fórmula empírica de Webster selecionou o tempo de ciclo de 45 segundos, que apresenta um tempo de espera total da interseção igual a 5,7 horas e um comprimento máximo de fi-

la de 8 veículos. Combinando as observações de campo com resultados da simulação foi obtido um valor para o tempo de espera total da interseção igual a 7,9 horas e para o comprimento máximo de fila igual a 17 veículos. Da comparação entre esses resultados apresentados pode-se notar que a política otimizada apresenta vantagens pois há uma redução no tempo de espera de 2,2 horas, o que em termos financeiros representa uma grande economia de combustível e tempo perdido. Também o comprimento máximo de fila se apresenta bastante inferior àquele apresentado pela situação atual. Isto significa que o número de paradas adicionais calculado através da expressão (19) terá um valor igual a 63 unidades, isto para uma hora de operação do sinal.

$$NPA = (FMO - FMM) \times V/100 \quad (19)$$

Onde,

NPA, número de paradas adicionais;

FMO, comprimento médio de fila observada
(número de veículos);

FMM, comprimento médio de fila fornecido pelo modelo (número de veículos);

V, volume real por faixa de tráfego (veículos/segundo).

4.4.2 - Sinal com Controle Manual

A simulação da operação dos sinais com controle manual, já exposta anteriormente (§3.3.2), apresentou os resultados mostrados nas Tabelas 21, 22, 35 e 36 e nas curvas da Figura 32 como apresentados no Apêndice A.

De acordo com as comparações entre as observações de campo e os resultados da simulação se conclui que o valor de 3,7 segundos para o intervalo mínimo médio representa com boa aproximação a situação de campo.

Através da análise da curva referente à faixa 1 mostrada na Figura 32 pode-se notar que valores do intervalo mínimo médio acima de 2,9 segundos apresentam um rápido crescimento no tempo de espera. Já para valores menores o tempo de espera permanece quase constante.

Dessa análise pode-se concluir que a influência acentuada de fatores externos como a presença de estacionamento e terminais urbanos afetam sensivelmente a performance das interseções.

Para o cruzamento entre as Ruas Venâncio Neiva e Floriano Peixoto a política otimizada selecionou o tempo de ciclo de 55 segundos, que apresenta um valor igual 10,3 horas para o tempo de espera total da interseção e um comprimento máximo de fila de 9 veículos. Mais uma vez combinando as observações de campo com os resultados da simulação foram obtidos os valores de 13,9 horas para o tempo de espera total da interseção e uma fila máxima de 25 veículos. Comparando-se estes resultados nota-se que ain

da aqui a política otimizada leva vantagem sobre a política da situação atual, isto porque ela apresenta uma redução de 3,6 horas no tempo de espera total da interseção e um comprimento máximo de fila com valor quase três vezes menor do que aquele observado no campo. O número de paradas será reduzido num valor igual a 103 unidades, determinado por meio da expressão (19).

Para o cruzamento entre as Ruas Marquês do Herval e Floriano Peixoto a política otimizada através da fórmula empírica de Webster selecionou o tempo de ciclo de 55 segundos, que apresenta um tempo de espera total da interseção igual a 8,2 horas e um comprimento máximo de fila de 7 veículos. Combinando as observações de campo com os resultados da simulação foi obtido um valor para o tempo de espera total da interseção igual a 7,7 horas e para o comprimento máximo de fila igual a 17 veículos. Comparando-se os resultados obtidos pode-se notar que a política da situação atual apresenta um valor para o tempo de espera total um pouco menor do que aquele fornecido pela política otimizada, mas tal diferença é de apenas 0,5 horas, valor quase insignificante. Já para os comprimentos máximos de fila a política otimizada leva vantagem pois reduz o número de paradas em 65 unidades. No cômputo geral a política otimizada apresenta resultados mais favoráveis do que os da situação atual.

4.5 - Sincronização Sugerida

Para a seleção de um tempo de ciclo, vários critérios podem ser considerados, dentre eles os mais importantes são tempo de espera, comprimento de fila e probabilidade de entrada durante a primeira fase verde.

Analisando-se os resultados obtidos através da fórmula de Webster se conclui que o tempo de ciclo que minimiza o tempo de espera e o comprimento de fila para a interseção I é o de 45 segundos.

Para a interseção II o tempo de ciclo de 55 segundos é o que menores valores apresentam, permitindo assim considerar este o ciclo selecionado.

Se fosse considerado apenas o tempo de espera e o comprimento de fila para decidir qual o melhor tempo de ciclo para a interseção III facilmente seria selecionado o ciclo de 50 segundos, mas levando-se em consideração também a probabilidade de entrada se conclui que o tempo de ciclo de 55 segundos permite a entrada de um maior número de veículos durante a primeira fase verde e como os tempos de espera e comprimentos de fila para ambos os ciclos são quase os mesmos pode-se finalmente optar pelo tempo de ciclo de 55 segundos.

Na Tabela 37 é apresentada a sincronização dos sinais para as três interseções.

4.6 - Análise Conclusiva

Com fundamento nos estudos apresentados na

seção 4.4, finalmente se conclui que a política otimizada conduz a uma sensível economia de tempo de espera, número de paradas e combustível que seria o mais importante.

Com base nisso algumas melhoras podem ser obtidas através de modificações introduzidas no sistema, já sugeridas nas seções 3.2 e 4.5, onde as Tabelas 2 e 37 mostram respectivamente o esquema das faixas de tráfego e as durações de todas as fases dos sinais envolvidos. Considerando-se a operação dos três semáforos em conjunto uma configuração adequada seria a seguinte:

1^a etapa - A prioridade nas interseções I, II e III seria dada respectivamente aos fluxos FP1 e FP2 ; VN1, VN2 e VN3; FP6, FP8 e FP9. Os fluxos restantes teriam sinal vermelho.

2^a etapa - Nas interseções I, II e III, a prioridade seria concedida respectivamente aos fluxos MP1 e MP2; FP3, FP4 e FP5; MH1, MH2 e MH3. Os outros fluxos teriam luz vermelha.

Finalmente algumas sugestões para trabalhos futuros são dadas a seguir:

- a) Padronização de uma metodologia para levantamento de campo;
- b) Influência de estacionamentos e terminais urbanos na performance da interseção.

Desse modo, ficam estabelecidos procedimentos racionais que conduzem a uma configuração adequada de funcionamento de um sinal de tráfego.

APÊNDICE A

TABELAS E FIGURAS

TABELA 1: Comprimento máximo de fila para o começo da fase verde para a probabilidade de 0,95

x_j	λ_i	M_j				
		2,5	5,0	10,0	20,0	40,0
0,3	0,4	5	7	12	20	34
	0,6	4	5	9	15	24
	0,8	3	4	6	9	15
0,5	0,2	6	7	15	26	47
	0,4	5	7	12	20	35
	0,6	4	5	9	15	24
	0,8	3	4	6	9	15
0,7	0,2	7	9	15	25	44
	0,4	6	8	12	20	34
	0,6	5	7	9	15	25
	0,8	5	5	7	9	15
0,8	0,2	9	12	16	25	46
	0,4	8	11	14	21	35
	0,6	8	9	11	16	25
	0,8	7	8	9	11	16
0,9	0,2	19	18	22	30	49
	0,4	19	17	20	23	39
	0,6	19	16	17	21	34
	0,8	18	15	15	18	22
0,95	0,2	36	28	33	40	55
	0,4	35	27	30	35	47
	0,6	34	26	25	34	39
	0,8	34	25	27	27	32
0,975	0,2	74	63	65	62	84
	0,4	74	57	65	59	75
	0,6	69	61	62	54	65
	0,8	65	56	61	52	64

Adaptação: Ref. 2, tabela 14.8

TABELA 2: Quadro das faixas de tráfego

Interseção			Chegada		
			A	B	C
I	Número de faixas de tráfego prático e teórico	P	2	2	2
		T	2	2	2
II		P	1	3	2
		T	2	3	2
III		P	1	1	2
		T	2	2	2

TABELA 3: Amostragem dos tempos de ciclo com as respectivas fases verde e vermelha para os sinais de controle manual (*)

(a) Sentido VN

Fase Verde (seg.)	Fase Vermelha (seg.)	Tempo de Ciclo(seg.)
49	56	105
59	56	115
66	30	96
50	32	82
49	44	93
45	35	80
34	43	77
48	41	89
33	55	88
48	51	99
42	57	99
49	50	99
35	24	59
52	37	89

(b) Sentido FP

Fase Verde (seg.)	Fase Vermelha (seg.)	Tempo de Ciclo(seg)
56	49	105
56	59	115
30	66	96
32	50	82
44	49	93
35	45	80
43	34	77
41	48	89
55	33	88
51	48	99
57	42	99
50	49	99
24	35	59
37	52	89

(*) Tempo de ciclo médio = 90,71 seg.

Desvio padrão (S) = 13,67

TABELA 4: Composição volumétrica das interseções por fluxo (em veículos/hora)

	Fluxo	Automóveis	Caminhões	Ônibus	Total
INTERSEÇÃO I	FP1	439	11	82	532
	FP2	233	22	37	292
	MP1	177	6	-	183
	MP2	338	19	2	359
	MP3	96	-	-	96
INTERSEÇÃO II	FP3	513	13	54	580
	FP4	108	9	-	117
	FP5	393	31	56	480
	VN1	416	12	-	428
	VN2	376	23	32	431
	VN3	12	-	-	12
INTERSEÇÃO III	FP6	475	17	53	545
	FP7	416	12	22	450
	FP8	180	7	69	256
	FP9	132	3	10	145
	MH1	350	19	7	376
	MH2	16	4	-	20
	MH3	181	12	7	200

TABELA 5: Composição volumétrica das interseções por fluxo (em porcentagem)

	Fluxo	Automóveis	Caminhões	Ônibus	Total
INTERSEÇÃO I	FP1	83	2	15	100
	FP2	80	7	13	100
	MP1	97	3	-	100
	MP2	94	5	1	100
	MP3	100	-	-	100
INTERSEÇÃO II	FP3	89	2	9	100
	FP4	92	8	-	100
	FP5	82	6	12	100
	VN1	97	3	-	100
	VN2	87	5	8	100
	VN3	100	-	-	100
INTERSEÇÃO III	FP6	87	3	10	100
	FP7	92	3	5	100
	FP8	70	3	27	100
	FP9	91	2	7	100
	MH1	93	5	2	100
	MH2	80	20	-	100
	MH3	91	6	3	100

TABELA 6: Relação dos volumes médio real e equivalente -
por fluxo de tráfego (veíc./horas) *

INTERSEÇÃO I	Fluxos	FP1	FP2	MP1	MP2	MP3	-	-
	Volume real	532	292	183	359	96	-	-
	Volume equivalente	578	323	266	412	135	-	-
INTERSEÇÃO II	Fluxos	FP3	FP4	FP5	VN1	VN2	VN3	-
	Volume Real	580	117	480	428	431	12	-
	Volume equivalente	612	178	524	435	559	17	-
INTERSEÇÃO III	Fluxos	FP6	FP7	FP8	FP9	MH1	MH2	MH3
	Volume Real	545	450	256	145	376	20	200
	Volume equivalente	581	681	288	217	386	34	254

* Ver esquema dos fluxos de tráfego na fig. 4.

TABELA 7: Relação dos volumes equivalentes médio por faixa de tráfego (veíc./seg) *

INTERSEÇÃO I	Fluxos	FP1	FP2	MP1	MP2	MP3	-	-
	Volume equivalente	0,080	0,045	0,074	0,114	0,037	-	-
INTERSEÇÃO II	Fluxos	FP3	FP4	FP5	VN1	VN2	VN3	-
	Volume equivalente	0,085	0,049	0,073	0,060	0,155	0,005	-
INTERSEÇÃO III	Fluxos	FP6	FP7	FP8	FP9	MH1	MH2	MH3
	Volume equivalente	0,081	0,189	0,080	0,060	0,107	0,009	0,071

* Ver esquema das faixas de tráfego na figura 4

TABELA 8: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada I.A (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	1	0,008	0,006
1	5	0,042	0,033
2	14	0,117	0,082
3	17	0,142	0,138
4	19	0,158	0,174
5	20	0,167	0,176
6	15	0,125	0,147
7	9	0,075	0,106
8	6	0,050	0,067
9	5	0,042	0,037
10	4	0,032	0,019
11	2	0,017	0,009
12	2	0,017	0,004
13	1	0,008	0,001
14	0	0,000	0,001
15	0	.....	0,000
16	0	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 5,042 veículos/intervalo de 30 seg.

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 9: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo MP2 para a chegada I.B (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	6	0,050	0,026
1	12	0,100	0,095
2	18	0,150	0,174
3	24	0,200	0,212
4	29	0,242	0,192
5	14	0,117	0,140
6	5	0,042	0,085
7	4	0,032	0,044
8	3	0,025	0,020
9	2	0,017	0,008
10	2	0,017	0,003
11	1	0,008	0,001
12	0	0,000	0,000
13	0	0,000	0,000
14	0	.....	.....
15	0	.....	.....
16	0	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média=3,642 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 10: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada I.C (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	8	0,067	0,050
1	20	0,167	0,150
2	27	0,225	0,225
3	23	0,192	0,224
4	16	0,133	0,168
5	14	0,117	0,100
6	6	0,050	0,050
7	3	0,025	0,021
8	2	0,017	0,008
9	1	0,008	0,003
10	0	0,000	0,001
11	...	.....	0,000
12	...	.....	.....
13	...	.....	.....
14	...	.....	.....
15	...	.....	.....
16	...	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 2,992 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 11: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada II.A (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	1	0,008	0,005
1	4	0,033	0,027
2	8	0,067	0,071
3	16	0,133	0,125
4	20	0,167	0,165
5	25	0,208	0,174
6	15	0,125	0,153
7	9	0,075	0,116
8	8	0,067	0,076
9	5	0,042	0,045
10	4	0,033	0,024
11	2	0,017	0,011
12	2	0,017	0,005
13	1	0,008	0,002
14	0	0,000	0,001
15	0	0,000	0,000
16	...	.....	0,000
	120	1,000	1,000

Média = 5,283 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 12: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo VN2 para a chegada II.B (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Observada	Frequência Relativa(*)
0	1	0,008	0,007
1	5	0,042	0,036
2	11	0,092	0,089
3	18	0,150	0,145
4	21	0,175	0,178
5	26	0,217	0,176
6	14	0,116	0,144
7	7	0,058	0,101
8	5	0,042	0,062
9	5	0,042	0,034
10	3	0,025	0,017
11	2	0,017	0,007
12	1	0,008	0,003
13	1	0,008	0,001
14	0	0,000	0,000
15	0	0,000	0,000
16	0	0,000	0,000
17	0	0,000	0,000
	120	1,000	1,000

Média = 4,917 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 13: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada II.C (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	3	0,025	0,039
1	9	0,074	0,127
2	26	0,217	0,205
3	36	0,300	0,222
4	26	0,217	0,180
5	11	0,092	0,117
6	5	0,042	0,063
7	2	0,017	0,029
8	1	0,008	0,012
9	1	0,008	0,005
10	0	0,000	0,001
11	...	.....	0,000
12	...	.....	.....
13	...	.....	.....
14	...	.....	.....
15	...	.....	.....
16	...	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 3,242 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 14: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção por fluxo de tráfego para a chegada III.A (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	3	0,025	0,007
1	7	0,058	0,034
2	10	0,083	0,085
3	15	0,125	0,142
4	20	0,167	0,176
5	24	0,200	0,175
6	14	0,117	0,146
7	7	0,058	0,104
8	6	0,050	0,065
9	5	0,042	0,036
10	3	0,025	0,018
11	3	0,025	0,008
12	2	0,017	0,003
13	1	0,008	0,001
14	0	0,000	0,000
15	...	.....	.....
16	...	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 4,983 veículos/interv=lo de 30 segundos

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 15: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo MHI para a chegada III.B (intervalo de 30 segundos)

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequencia Teórica(*)
0	9	0,075	0,037
1	16	0,133	0,122
2	17	0,142	0,201
3	26	0,217	0,221
4	19	0,158	0,182
5	16	0,133	0,120
6	11	0,092	0,066
7	3	0,025	0,031
8	2	0,017	0,013
9	1	0,008	0,005
10	0	0,0	0,002
11	0	0,0	0,000
12	0	0,0	0,000
13	0	0,0	0,000
14	0	0,00	0,000
15	0	0,00	0,000
16	...	....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 3,300 veículos/intervalo de 30 segundos.

(*) - Distribuição de POISSON

TABELA 16: Distribuição do número de veículos que passaram pela interseção referente ao fluxo FP8 para a chegada III.C (intervalo de 30 segundos).

Nº de carros p/ intervalo	Nº de intervalos observados	Frequência Relativa	Frequência Teórica(*)
0	12	0,100	0,086
1	25	0,208	0,211
2	32	0,267	0,259
3	23	0,192	0,212
4	14	0,117	0,130
5	8	0,067	0,063
6	3	0,025	0,026
7	2	0,016	0,009
8	1	0,008	0,003
9	0	0,000	0,001
10	0	0,000	0,000
11	...	.....	.....
12	...	.....	.....
13	...	.....	.....
14	...	.....	.....
15	...	.....	.....
16	...	.....	.....
	120	1,000	1,000

Média = 2,450 veículos/intervalo de 30 segundos

(*) - Distribuição do POISSON

TABELA 17: Distribuição dos intervalos médio entre veículos consecutivos (segundos)

Posição na Fila	Headway inicial segundos	Tempo adicional (em segundos) requerido sobre o "Headway" mínimo de 2,1 seg.
1º veículo	3,8	1,7
2º veículo	3,1	1,0
3º veículo	2,7	0,6
4º veículo	2,4	0,3
5º veículo	2,3	0,2
6º veículo	2,2	0,1
7º veículo	2,1	0,0
.....
n-ésimo veículo	2,1	0,0
Total	...	3,9

TABELA 18: Velocidade média e tempo perdido para o último veículo atravessar a interseção

INTERSEÇÃO I	Fluxo	FP1	FP2	MP1	MP2	MP3	-
	DP	12,0	12,0	6,0	13,0	6,0	-
	U	5,83	6,94	5,56	5,56	5,56	-
	k_2	2,92	2,45	1,98	3,24	1,98	-
INTERSEÇÃO II	Fluxo	FP3	FP4	FP5	VN1	VN2	VN3
	DP	11,5	6,0	11,5	20,8	11,2	6,0
	U	6,11	2,78	7,22	6,94	5,56	2,78
	k_2	2,70	3,96	2,29	3,72	2,91	3,96
INTERSEÇÃO III	Fluxo	FP6	FP8	FP9	MH1	MH2	MH3
	DP	22,0	28,0	6,0	28,0	14,0	18,0
	U	5,28	6,39	2,78	5,56	4,17	2,78
	k_2	5,11	5,16	3,96	5,94	4,56	8,27

TABELA 19: Filas média e máxima observadas

INTERSEÇÃO	* CHEGADA	Fila média (p.c.u)			Fila máxima (p.c.u)		
		Posição da faixa			Posição da faixa		
		esq.	meio	dir.	esq.	meio	dir.
I	I,A	6	-	6	13	-	10
	I,B	4	-	9	7	-	17
	I,C	5	-	5	11	-	9
II	II,A	16	-	5	25	-	8
	II,B	9	7	4	22	13	8
	II,C	5	-	5	10	-	13
III	III,A	8	-	4	14	-	11
	III,B	6	-	8	14	-	17
	III,C	7	-	6	16	-	13

* Ver esquema das chegadas na figura 4 do apêndice A.

TABELA 20: Tempo de espera por hora em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção I (*)

FAIXA	Intervalo mínimo médio / Tempo de espera														
	2,1 TEH	2,2 TEH	2,3 TEH	2,4 TEH	2,5 TEH	2,6 TEH	2,7 TEH	2,8 TEH	2,9 TEH	3,0 TEH	3,1 TEH	3,2 TEH	3,3 TEH	3,4 TEH	3,5 TEH
1	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5
2	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5
3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
6	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,5	3,1	4,1	6,2	12,4	>20,0	>20,0	>20,0	>20,0	>20,0
7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
TOTAL	4,6	4,7	4,9	5,3	5,6	6,1	6,9	7,9	10,0	16,5	>20,0	>20,0	>20,0	>20,0	>20,0

(*) TEH = Tempo de espera para o período de uma hora de simulação (em horas)

- Intervalo mínimo médio (em segundos)

- Ver esquema das faixas de tráfego na figura 5 apêndice A

TABELA 21: Tempo de espera por hora em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção II (*)

FAIXA	Intervalo mínimo médio / Tempo de espera														
	2,1 TEH	2,2 TEH	2,3 TEH	2,4 TEH	2,5 TEH	2,6 TEH	2,7 TEH	2,8 TEH	2,9 TEH	3,0 TEH	3,1 TEH	3,2 TEH	3,3 TEH	3,4 TEH	3,5 TEH
1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,5	1,7	1,9	2,3	2,8	3,7
2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	2,1	2,5
7	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
TOTAL	5,3	5,3	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,4	5,5	5,8	6,0	6,3	6,8	7,6	9,0

(*) TEH = Tempo de espera para o período de um hora de simulação (em horas)

- Intervalo mínimo médio (em segundos)

- Ver esquema das faixas de tráfego na figura .3 do apêndice A.

TABELA 22: Tempo de espera por hora em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção III (*)

FAIXA	Intervalo mínimo médio / Tempo de espera														
	2,1 TEH	2,2 TEH	2,3 TEH	2,4 TEH	2,5 TEH	2,6 TEH	2,7 TEH	2,8 TEH	2,9 TEH	3,0 TEH	3,1 TEH	3,2 TEH	3,3 TEH	3,4 TEH	3,5 TEH
4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
9	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,4	2,6
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
11	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
12	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
TOTAL	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,6	5,7	5,8	6,0	6,3	6,5

- (*) TEH = Tempo de espera para o período de uma hora de simulação (em horas)
- Intervalo mínimo médio (em segundos)
 - Ver esquema das faixas de tráfego na figura 15 do apêndice A.

TABELA 23: Tempo perdido total

INTERSEÇÃO I	Fluxo	FP1	FP2	MP1	MP2	MP3	-
	k_2	2,9	2,5	2,0	3,2	2,0	-
	K	6,8	6,4	5,9	7,1	5,9	-
INTERSEÇÃO II	Fluxo	FP3	FP4	FP5	VN1	VN2	VN3
	k_2	2,7	4,0	2,3	3,7	2,9	4,0
	K	6,6	7,9	6,2	7,6	6,8	7,9
INTERSEÇÃO III	Fluxo	FP6	FP8	FP9	MH1	MH2	MH3
	k_2	5,1	5,2	4,0	5,9	4,6	8,3
	K	9,0	9,1	7,9	9,8	8,5	12,2

TABELA 24: Fases amarela das interseções

INTERSEÇÃO		I	II	III
Tempo de amarelo (seg)	FASE 1*	5	5	7
	FASE 2	6	6	8

* A fase 1 se refere ao tráfego da Rua Floriano Peixoto e a fase 2 aos fluxos procedentes das Ruas Maciel Pí-
nheiro, Venâncio Neiva e Marques do Herval.

TABELA 25: Duração da fase verde *

Tempo de Ciclo (seg.)	INTERSEÇÃO I		INTERSEÇÃO II		INTERSEÇÃO I I I	
	Tempo de verde (seg.)		Tempo de verde (seg.)		Tempo de verde (seg.)	
	FASE 1	FASE 2	FASE 1	FASE 2	FASE 1	FASE 2
25	12	13	-	-	-	-
30	14	16	-	-	-	-
35	16	19	14	21	16	19
40	18	22	16	24	18	22
45	20	25	18	27	20	25
50	22	28	20	30	23	27
55	24	31	21	34	25	30
60	26	34	23	37	27	33
65	28	37	25	40	29	36
70	30	40	27	43	31	39
75	-	-	28	47	33	42
80	-	-	30	50	36	44

* este valor inclui o período de amarelo.

TABELIA 26: Tempo de espera total da interseção I e
tempo de espera médio para cada faixa (*)

Faixa de tráfego	Volume Real por hora	Tempo de Ciclo (seg)																			
		25		30		35		40		45		50		55		60		65		70	
		TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP	TEM	TEP
1	266	45,6	3,37	30,2	2,23	20,0	1,48	18,2	1,35	18,0	1,14	18,4	1,35	19,0	1,41	19,8	1,46	20,6	1,52	21,5	1,59
2	266	45,6	3,37	30,2	2,23	20,0	1,48	18,2	1,35	18,0	1,14	18,4	1,35	19,0	1,41	19,8	1,46	20,6	1,52	21,5	1,59
3	146	15,6	0,63	13,4	0,55	13,5	0,55	14,0	0,57	14,7	0,60	15,4	0,63	16,2	0,66	17,1	0,70	18,0	0,73	18,8	0,77
4	146	15,6	0,63	13,4	0,55	13,5	0,55	14,0	0,57	14,7	0,60	15,4	0,63	16,2	0,66	17,1	0,70	18,0	0,73	18,8	0,77
5	183	15,2	0,77	11,9	0,60	11,3	0,57	11,3	0,57	11,4	0,58	11,7	0,59	12,0	0,61	12,3	0,63	12,7	0,65	13,1	0,67
6	359	33,5	3,34	23,0	2,29	15,7	1,57	14,3	1,42	13,9	1,39	14,0	1,39	14,2	1,41	14,5	1,44	14,8	1,48	15,2	1,52
7	96	9,8	0,26	9,4	0,25	9,4	0,25	9,5	0,25	9,8	0,26	10,1	0,27	10,4	0,28	10,8	0,29	11,1	0,30	11,5	0,31
TOTAL	-	11,74	-	8,70	-	6,45	-	6,08	-	5,71	-	6,21	-	6,44	-	6,68	-	6,93	-	7,22	-

(*) Ver esquema das faixas de tráfego de cada interseção na figura 4 do apêndice A

TEM = tempo de espera médio (seg/veículo)

TEP = tempo de espera total por faixa (hora)

TABELA 27: Tempo de espera total da interseção II e tempo de espera médio para cada faixa(*)

Faixa de tráfego	Volume Real por hora	Tempo de Ciclo (seg.)																			
		35		40		45		50		55		60		65		70		75		80	
		TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET
1	290	51,9	4,19	30,3	2,44	25,6	2,07	24,3	1,96	24,2	1,95	24,5	1,98	25,2	2,03	26,1	2,10	27,0	2,18	28,0	2,26
2	290	51,9	4,19	30,3	2,44	25,6	2,07	24,3	1,96	24,2	1,95	24,5	1,98	25,2	2,03	26,1	2,10	27,0	2,18	28,0	2,26
3	117	16,0	0,52	16,3	0,53	17,0	0,55	17,9	0,58	18,8	0,61	19,8	0,65	20,9	0,68	22,0	0,71	23,1	0,75	24,2	0,78
4	240	25,4	1,70	21,5	1,44	20,7	1,38	20,9	1,40	21,5	1,44	22,3	1,49	23,3	1,55	24,3	1,62	25,3	1,69	26,4	1,76
5	240	25,4	1,70	21,5	1,44	20,7	1,38	20,9	1,40	21,5	1,44	22,3	1,49	23,3	1,55	24,3	1,62	25,3	1,69	26,4	1,76
6	431	31,0	3,71	19,1	2,29	16,4	1,96	15,4	1,84	15,1	1,80	15,0	1,80	15,1	1,81	15,3	1,83	15,5	1,86	15,8	1,89
7	214	9,4	0,56	9,4	0,56	9,4	0,56	9,6	0,57	9,8	0,58	10,0	0,60	10,2	0,61	10,5	0,63	10,8	0,64	11,1	0,66
8	214	9,4	0,56	9,4	0,56	9,4	0,56	9,6	0,57	9,8	0,58	10,0	0,60	10,2	0,61	10,5	0,63	10,8	0,64	11,1	0,66
TOTAL	-	17,13	-	11,70	-	10,53	-	10,28	-	10,35	-	10,59	-	10,87	-	11,24	-	11,63	-	12,03	-

(*) Ver esquema das faixas de tráfego de cada interseção na figura 4 do apêndice A

TEM = tempo de espera médio (seg./veículo)

TET = tempo de espera total por faixa (hora)

TABELA 28: Tempo de espera total da interseção III e tempo de espera médio para cada faixa (*)

Faixa de tráfego	Volume Real por hora	Tempo de Ciclo (seg.)																			
		35		40		45		50		55		60		65		70		75		80	
		TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET	TEM	TET
1	273	85,9	6,50	28,4	2,15	22,7	1,72	21,4	1,62	21,2	1,61	21,5	1,63	22,1	1,67	22,8	1,73	23,5	1,78	24,3	1,84
2	273	85,9	6,50	28,4	2,15	22,7	1,72	21,4	1,62	21,2	1,61	21,5	1,63	22,1	1,67	22,8	1,73	23,5	1,78	24,3	1,84
3	256	73,3	5,21	27,4	1,95	22,3	1,59	21,1	1,50	21,1	1,50	21,4	1,52	22,0	1,56	22,7	1,61	23,4	1,66	24,2	1,72
4	145	21,6	0,87	18,4	0,74	18,0	0,72	18,2	0,73	18,8	0,76	19,4	0,78	20,1	0,81	20,9	0,84	21,7	0,87	22,5	0,91
5	376	66,9	6,98	23,4	2,45	19,0	1,99	17,8	1,86	17,6	1,83	17,6	1,84	17,8	1,86	18,1	1,89	18,5	1,93	18,9	1,97
6	200	16,3	0,90	14,8	0,82	14,5	0,81	14,6	0,81	14,8	0,82	15,1	0,84	15,4	0,86	15,8	0,88	16,2	0,90	16,6	0,92
7	20	10,6	0,06	10,8	0,06	11,0	0,06	11,3	0,06	11,6	0,06	12,0	0,07	12,4	0,07	12,8	0,07	13,2	0,07	13,6	0,08
TOTAL			27,02	-	10,32	-	8,61	-	8,20	-	8,19	-	8,31	-	8,50	-	8,75	-	8,99	-	9,28

(*) Ver esquema das faixas de tráfego de cada interseção na figura 4 do apêndice A

TEM = tempo de espera médio (seg./veículo)

TET = tempo de espera total por faixa (hora)

TABELA 29: Comprimento de fila médio e máximo
de cada faixa da interseção I (*)

Faixa de Tráfego	Tempo de Ciclo (seg.)																			
	25		30		35		40		45		50		55		60		65		70	
	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX
1	4	19	3	9	2	8	2	8	2	8	2	8	2	9	2	9	3	10	3	11
2	4	19	3	9	2	8	2	8	2	8	2	8	2	9	2	9	3	10	3	11
3	3	7	2	6	1	5	1	5	1	5	1	5	1	6	1	7	1	7	1	8
4	3	7	2	6	1	5	1	5	1	5	1	5	1	6	1	7	1	7	1	8
5	2	7	1	6	1	5	1	5	1	5	1	6	1	7	1	7	2	7	2	8
6	4	19	3	10	2	7	2	7	2	7	2	7	2	8	3	8	3	9	3	10
7	0	5	0	4	0	3	0	3	0	3	0	4	0	4	0	5	1	5	1	6

(*) Ver esquema das faixas de tráfego da interseção na figura 4 do apêndice A

FMD = comprimento de fila médio

FMX = comprimento de fila máximo

TABELA 30: Comprimento de fila médio e máximo de cada faixa de interseção II (*)

Faixa de Tráfego	Tempo de Ciclo (seg.)																			
	35		40		45		50		55		60		65		70		75		80	
	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX
1	5	19	4	11	3	10	3	9	3	9	3	10	3	11	4	12	4	13	4	14
2	5	19	4	11	3	10	3	9	3	9	3	10	3	11	4	12	4	13	4	14
3	1	6	1	5	1	5	1	5	1	6	1	7	2	7	2	8	2	9	2	10
4	2	9	2	7	2	6	2	5	2	6	2	7	3	8	3	9	3	10	3	11
5	2	9	2	7	2	6	2	5	2	6	2	7	3	8	3	9	3	10	3	11
6	5	18	4	12	3	10	3	8	3	8	4	9	4	10	4	11	4	12	4	13
7	0	5	1	4	1	4	1	4	1	5	1	6	1	7	1	8	1	9	1	10
8	0	5	1	4	1	4	1	4	1	5	1	6	1	7	1	8	1	9	1	10

(*) Ver esquema das faixas de tráfego da interseção na figura 4 do apêndice A

FMD = comprimento de fila médio

FMX = comprimento de fila máximo

TABELA 31: Comprimento de fila médio e máximo
de cada faixa da interseção III (*)

Faixa de Tráfego	Tempo de Ciclo (seg.)																			
	35		40		45		50		55		60		65		70		75		80	
	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX	FMD	FMX
1	7	30	3	12	2	9	2	8	2	7	3	8	3	8	3	9	4	10	5	12
2	7	30	3	12	2	9	2	8	2	7	3	8	3	8	3	9	4	10	5	12
3	6	18	3	11	2	8	2	7	2	6	3	7	3	8	3	9	3	10	3	11
4	1	7	1	6	1	5	1	5	2	5	2	6	2	7	2	7	2	7	2	8
5	8	28	3	10	3	7	3	7	3	7	3	8	3	9	4	10	4	11	5	12
6	1	7	1	6	1	5	1	5	1	5	2	6	2	7	2	7	2	8	2	9
7	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-

(*) Ver esquema das faixas de tráfego da interseção na figura 4 do apêndice A

FMD = comprimento de fila médio

FMX = comprimento de fila máximo

TABELA 32: Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para a interseção I

F L U X O		FP1	FP2	MP1	MP2	MP3	
Tempo de Ciclo (em segundos)	25	N	2,29	2,48	3,67	3,05	3,67
		M	2,00	1,13	1,85	2,85	0,93
		$P(X \leq N)$	72	94	96	69	99,3
	30	N	3,24	3,43	5,10	4,48	5,10
		M	2,40	1,35	2,22	3,42	1,11
		$P(X \leq N)$	82	98	98	80	99,9
	35	N	4,24	4,43	6,48	5,86	6,48
		M	2,80	1,58	2,59	3,99	1,30
		$P(X \leq N)$	87	99	99,2	87	99,9
	40	N	5,19	5,38	7,91	7,29	7,91
		M	3,20	1,80	2,96	4,56	1,48
		$P(X \leq N)$	92	99,3	99,4	92	100
	45	N	6,19	6,38	9,29	8,67	9,29
		M	3,60	2,03	3,33	5,13	1,67
		$P(X \leq N)$	94	99,6	99,8	95	100
	50	N	7,19	7,38	10,67	10,05	10,67
		M	4,00	2,25	3,70	5,70	1,85
		$P(X \leq N)$	95	99,8	99,9	96	100
	55	N	8,14	8,33	12,10	11,48	12,10
		M	4,40	2,48	4,07	6,27	2,04
		$P(X \leq N)$	96	99,9	99,9	97	100
	60	N	9,14	9,33	13,48	12,86	13,48
		M	4,80	2,70	4,44	6,84	2,22
		$P(X \leq N)$	97	99,9	100	99	100
65	N	10,14	10,33	14,86	14,24	14,86	
	M	5,20	2,93	4,81	7,41	2,41	
	$P(X \leq N)$	98	100	100	99,2	100	
70	N	11,10	11,29	16,29	15,67	16,29	
	M	5,60	3,15	5,18	7,98	2,59	
	$P(X \leq N)$	99	100	100	99,5	100	

TABELA 33: Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para a interseção II

F L U X O		FP3	FP4	FP5	VN1	VN2	VN3	
Tempo de Ciclo (em segundos)	35	N	3,62	3,05	3,81	6,33	6,76	6,29
		M	2,98	1,72	2,56	2,10	5,43	0,18
		$P(X \leq N)$	73	91	83	99,4	72	100
	40	N	4,48	3,91	4,67	7,86	8,29	7,81
		M	3,40	1,96	2,92	2,40	6,20	0,20
		$P(X \leq N)$	80	95	88	99,8	82	100
	45	N	5,33	4,76	5,52	9,38	9,81	9,33
		M	3,83	2,21	3,29	2,70	6,98	0,23
		$P(X \leq N)$	85	97	92	99,9	90	100
	50	N	6,14	5,57	6,33	10,95	11,38	10,91
M		4,25	2,45	3,65	3,00	7,75	0,25	
$P(X \leq N)$		87	98	93	100	94	100	
55	N	7,00	6,43	7,19	12,48	12,91	12,43	
	M	4,68	2,70	4,02	3,30	8,53	0,28	
	$P(X \leq N)$	89	99	95	100	95	100	
60	N	7,86	7,29	8,05	14,00	14,43	13,95	
	M	5,10	2,94	4,38	3,60	9,30	0,30	
	$P(X \leq N)$	91	99,1	96	100	96	100	
65	N	8,71	8,14	8,91	15,52	15,95	15,48	
	M	5,53	3,19	4,75	3,90	10,08	0,33	
	$P(X \leq N)$	94	99,3	96	100	97	100	
70	N	9,52	8,95	9,71	17,10	17,52	17,05	
	M	5,95	3,43	5,11	4,20	10,85	0,35	
	$P(X \leq N)$	95	99,6	97	100	97	100	
75	N	10,38	9,81	10,57	18,62	19,05	18,57	
	M	6,38	3,68	5,48	4,50	11,63	0,38	
	$P(X \leq N)$	95	99,8	98	100	98	100	
80	N	11,24	10,67	11,43	20,14	20,57	20,10	
	M	6,80	3,92	5,84	4,80	12,40	0,40	
	$P(X \leq N)$	96	99,9	99	100	99	100	

TABELA 34: Probabilidade de entrada durante a primeira fase verde para a interseção III

F L U X O			FP6	FP8	FP9	MH1	MH2	MH3
Tempo de Ciclo (em segundos)	35	N	3,43	3,38	4,00	4,33	5,05	3,29
		M	2,84	2,80	2,10	3,75	0,32	2,49
		$P(X \leq N)$	77	77	93	72	100	80
	40	N	4,43	4,38	5,00	5,71	6,43	4,67
		M	3,24	3,20	2,40	4,28	0,36	2,84
		$P(X \leq N)$	82	82	96	79	100	92
	45	N	5,48	5,43	6,05	7,05	7,76	6,00
		M	3,65	3,60	2,70	4,82	0,41	3,20
		$P(X \leq N)$	86	86	97	84	100	95
	50	N	6,48	6,43	7,05	8,43	9,14	7,38
		M	4,05	4,00	3,00	5,35	0,45	3,55
		$P(X \leq N)$	91	91	98	91	100	97
	55	N	7,52	7,48	8,10	9,76	10,48	8,71
		M	4,46	4,40	3,30	5,89	0,50	3,91
		$P(X \leq N)$	93	92	99,1	95	100	99
	60	N	8,52	8,48	9,10	11,14	11,86	10,10
		M	4,86	4,80	3,60	6,42	0,54	4,26
		$P(X \leq N)$	96	96	99,4	96	100	99,3
	65	N	9,57	9,52	10,14	12,48	13,19	11,43
		M	5,27	5,20	3,90	6,96	0,59	4,62
		$P(X \leq N)$	96	97	99,8	98	100	99,8
	70	N	10,57	10,52	11,14	13,86	14,57	12,81
		M	5,67	5,60	4,20	7,49	0,63	4,97
		$P(X \leq N)$	97	98	99,9	99	100	99,9
75	N	11,62	11,57	12,19	15,19	15,91	14,14	
	M	6,08	6,00	4,50	8,03	0,68	5,33	
	$P(X \leq N)$	98	99	100	99,3	100	100	
80	N	12,67	12,62	13,24	16,52	17,24	15,48	
	M	6,48	6,40	4,80	8,56	0,72	5,68	
	$P(X \leq N)$	99	99	100	99,5	100	100	

TABELA 35: Resultados da simulação da operação dos sinais manual e automático por interseção (*)

INTERSEÇÃO I			INTERSEÇÃO II			INTERSEÇÃO III		
Faixa	Máxima Fila	Tempo de espera	Faixa	Máxima Fila	Tempo de espera	Faixa	Máxima Fila	Tempo de espera
1	13	1,0	1	31	6,9	4	3	0,6
2	10	1,0	2	2	0,4	5	5	1,0
3	11	0,4	3	4	0,4	9	7	3,7
4	9	0,4	6	12	4,2	10	3	0,5
5	7	0,7	7	3	1,2	11	5	1,1
6	17	4,1	8	3	0,8	12	3	0,8
Total	-	7,6	Total	-	13,9	Total	-	7,7

(*) Tempo de espera para uma hora de simulação (em horas)

TABELA 36: Resultados da simulação da operação dos sinais manuais por fase (*)

F A S E 1			F A S E 2		
Faixa	Máxima Fila	Tempo de espera	Faixa	Máxima Fila	Tempo de espera
1	31	6,9	6	12	4,2
2	2	0,4	7	3	1,2
3	4	0,4	8	3	0,8
4	3	0,6	9	7	3,7
5	5	1,0	10	3	0,5
-	-	-	11	5	1,1
-	-	-	12	3	0,8
Total	-	9,3	Total	-	12,3

(*) Tempo de espra para uma hora de simulação (em horas)

Máxima fila (em número de veículos)

TABELA 37: Sincronização dos sinais

INTERSEÇÃO	FASE *	FASE VERMELHA	FASE VERDE		TOTAL
			LUZ VERDE	LUZ AMBAR	
I	1	25	15	5	45
	2	20	19	6	45
II	1	34	16	5	55
	2	21	28	6	55
III	1	30	18	7	55
	2	25	22	8	55

(*) A fase 1 se refere ao tráfego da rua Floriano Peixoto e a fase 2 ao tráfego das outras ruas que interceptam.

G = Verde + Amarelo
 H = Intervalo entre Atendimento
 K = Tempo perdido = $K_1 + K_2$
 N = Número de Atendimentos

$$G = H(N-1) + K$$

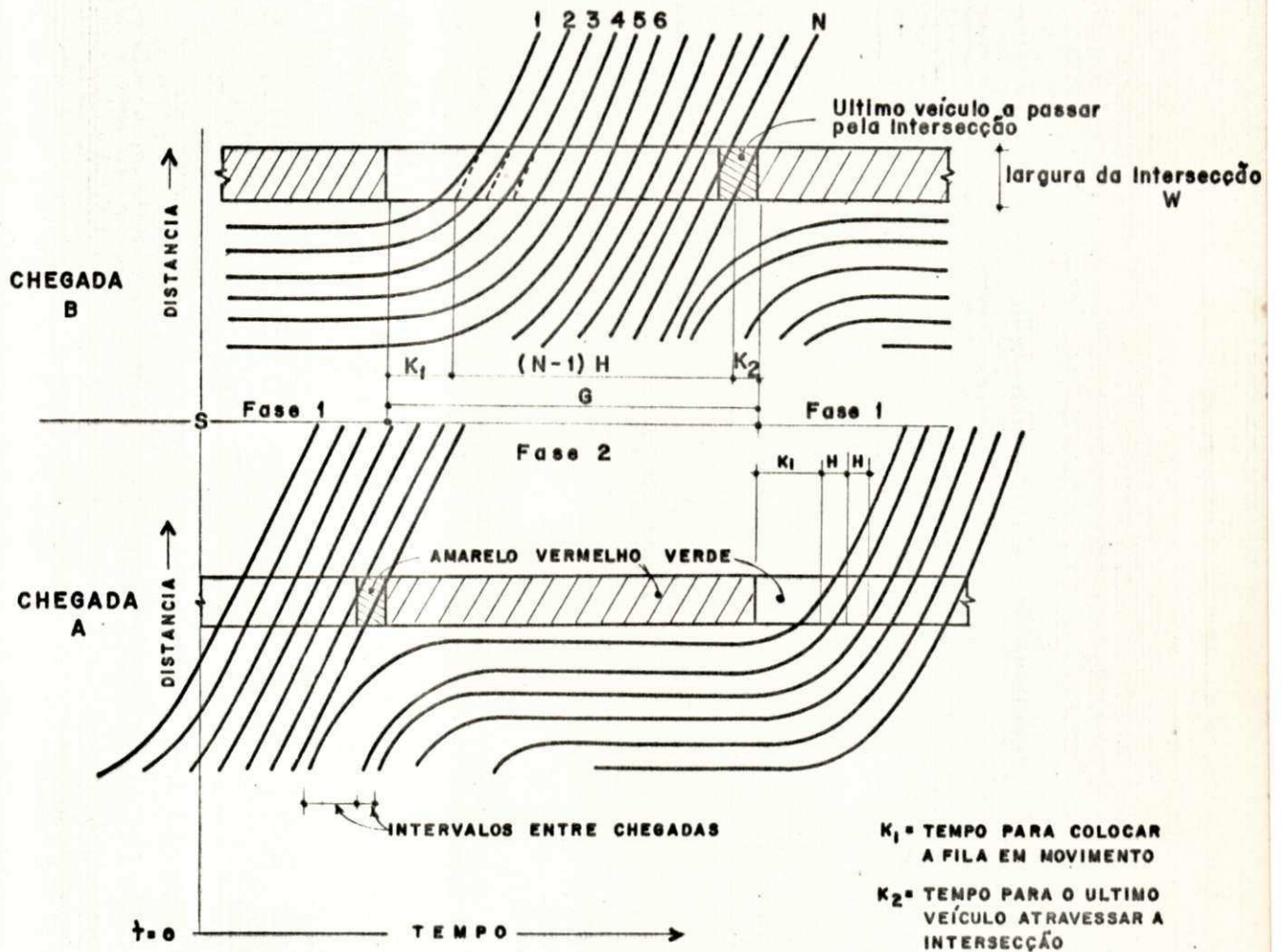


FIGURA 1: Relação espaço tempo para uma interseção com sinalização luminosa

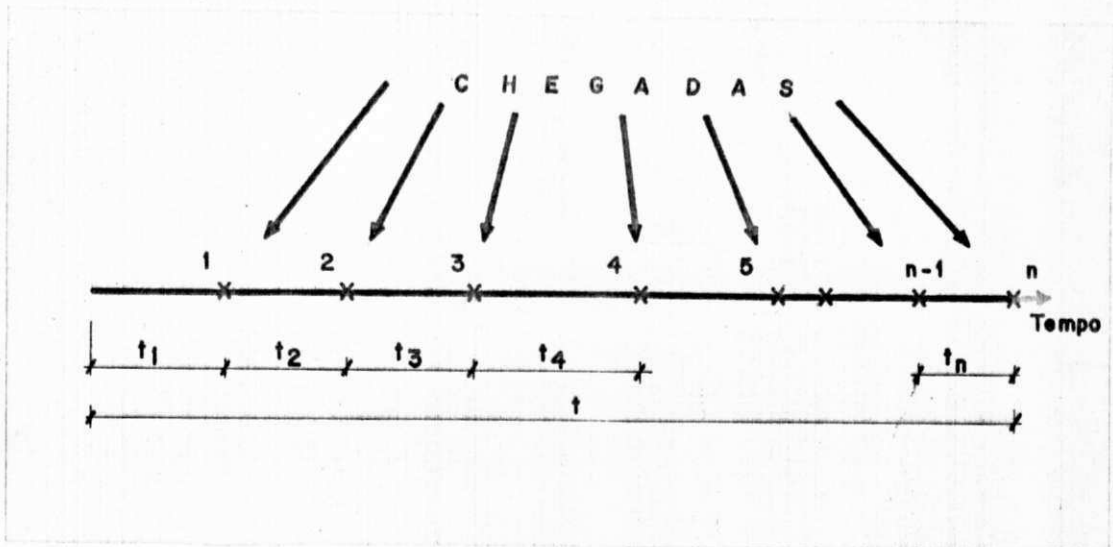
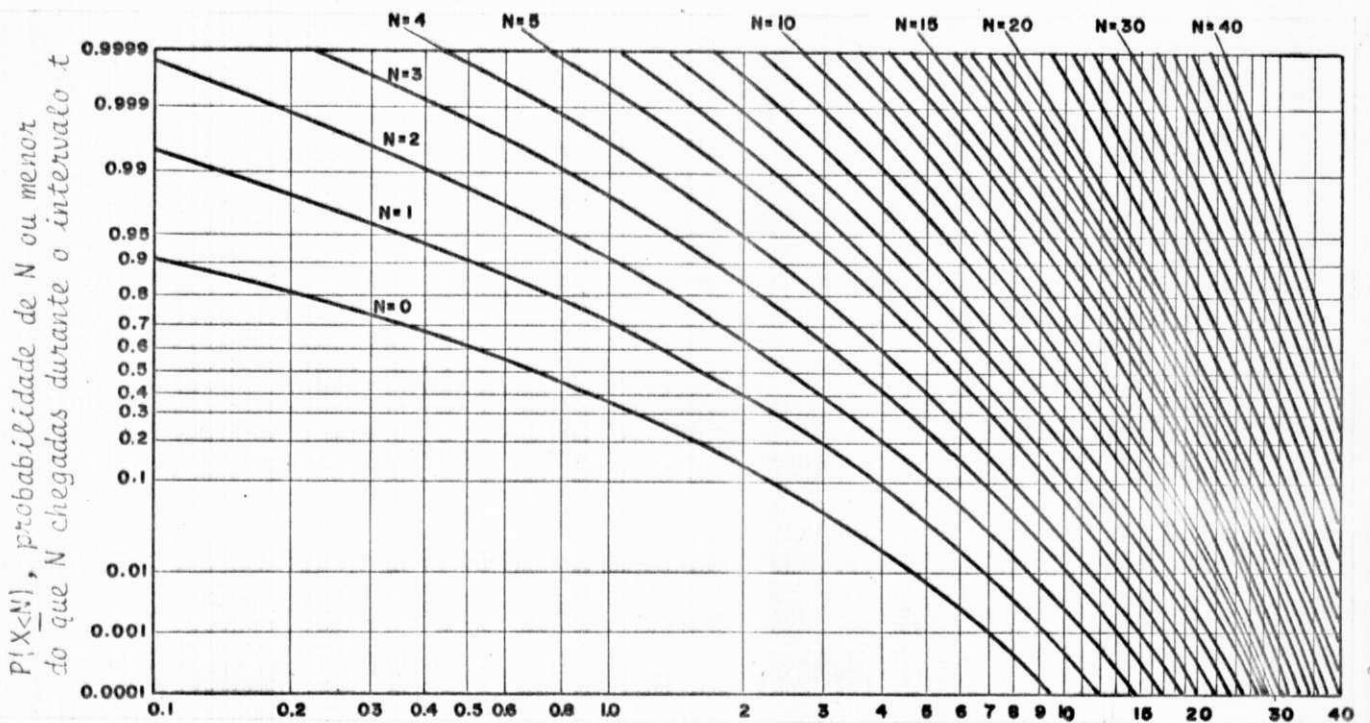


FIGURA 2: Intervalos entre chegadas sucessivas



μ , número médio de chegadas durante o intervalo t

FIGURA 3: Probabilidades acumulativas de Poisson para chegadas menor ou igual a N durante o intervalo t. (Adaptado da Ref.2 , pg 458)

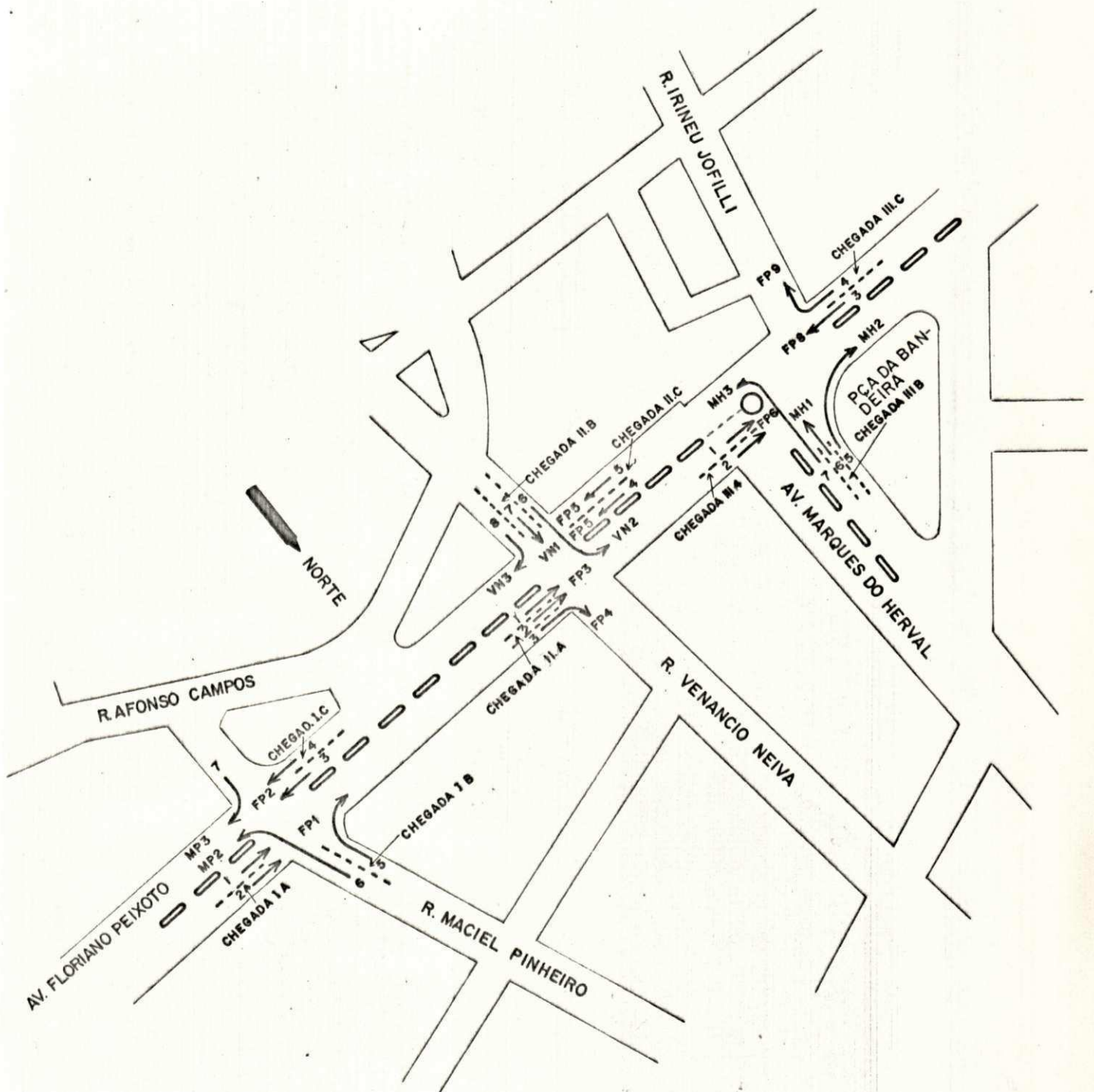


FIGURA 4: Localização das Ruas, faixas de tráfego, fluxo e chegadas para o estudo teórico (Esc. 1:2000)

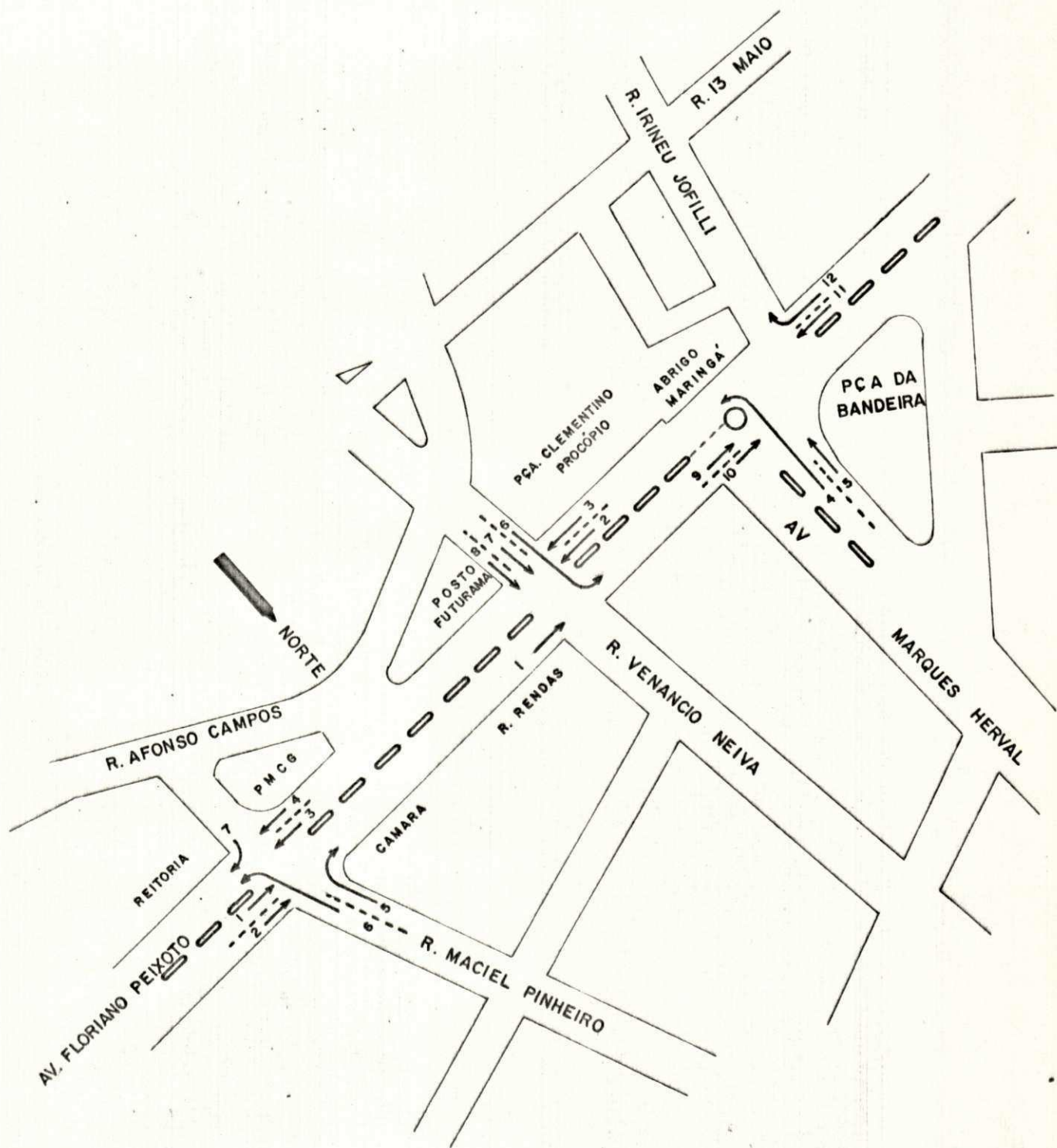


FIGURA 5: Localização das Ruas e das faixas de tráfego para simulação (Esc. 1:2000)

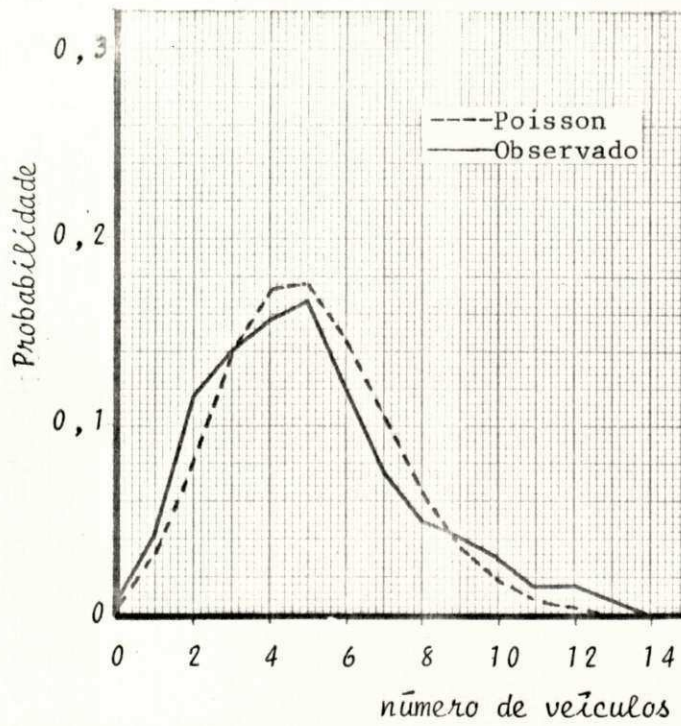


FIGURA 6: Distribuição de chegadas da interseção I (chegada I.A.)

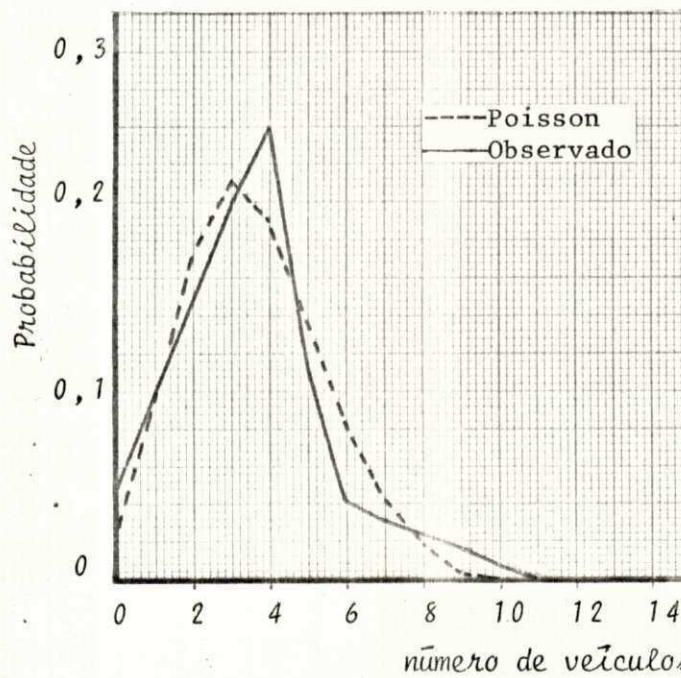


FIGURA 7: Distribuição de chegadas da Interseção I (chegada I.B.)

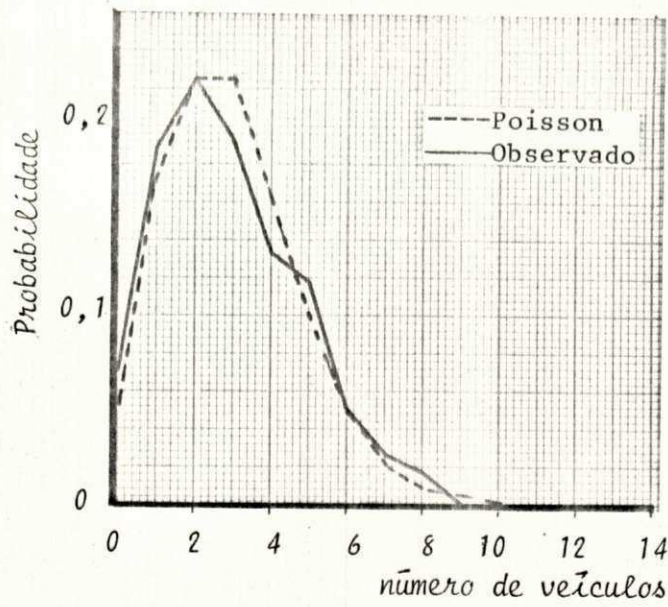


FIGURA 8: Distribuição de chegadas da interseção I (chegada I.C.)

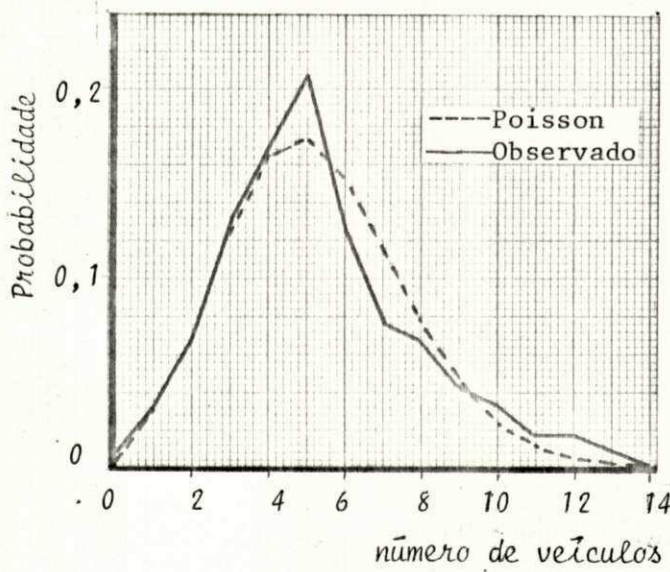


FIGURA 9: Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.A)

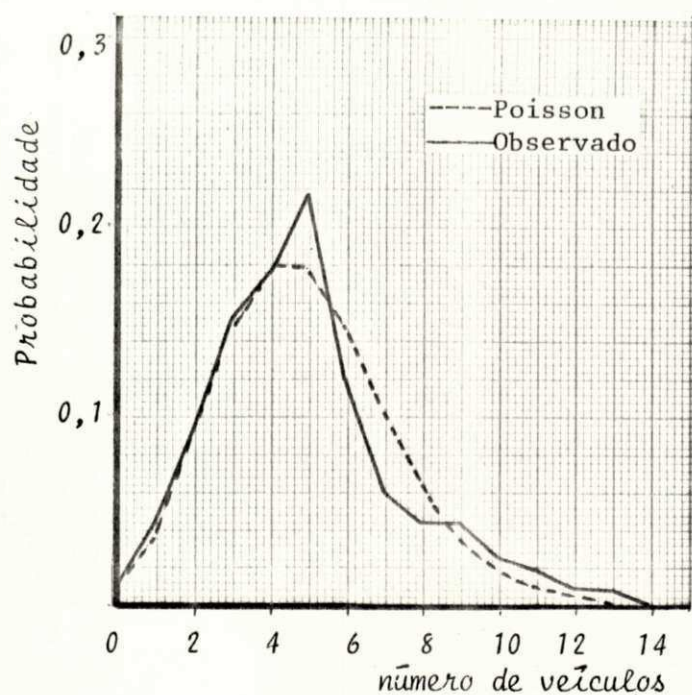


FIGURA 10: Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.B)

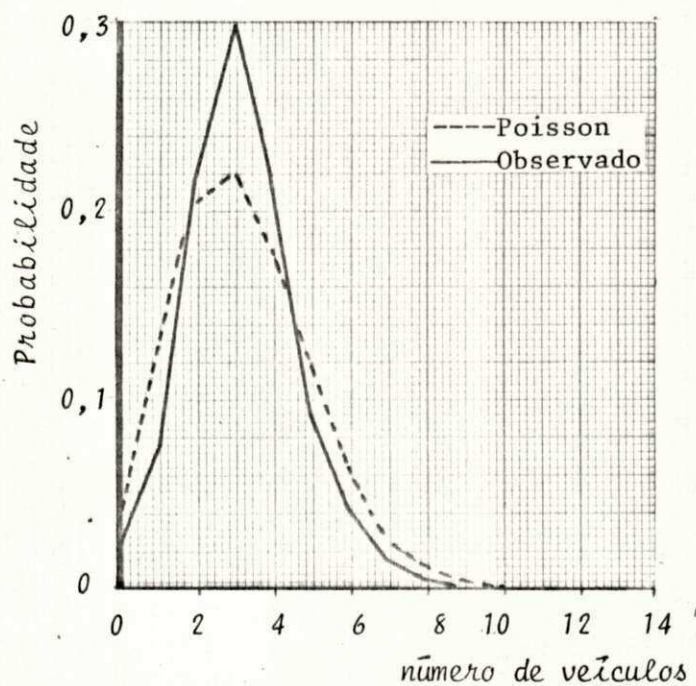


FIGURA 11: Distribuição de chegadas da interseção II (chegada II.C.)

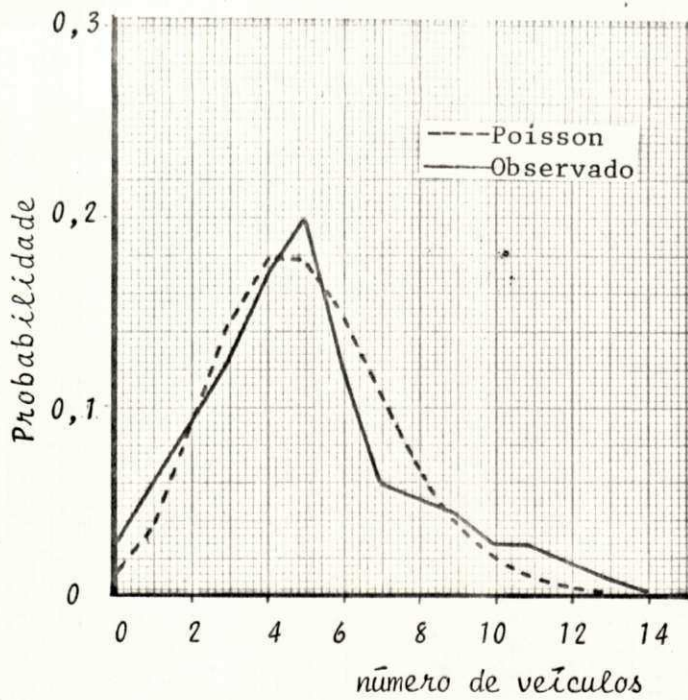


FIGURA 12: Distribuição de chegadas da interseção III (chegada III.A)

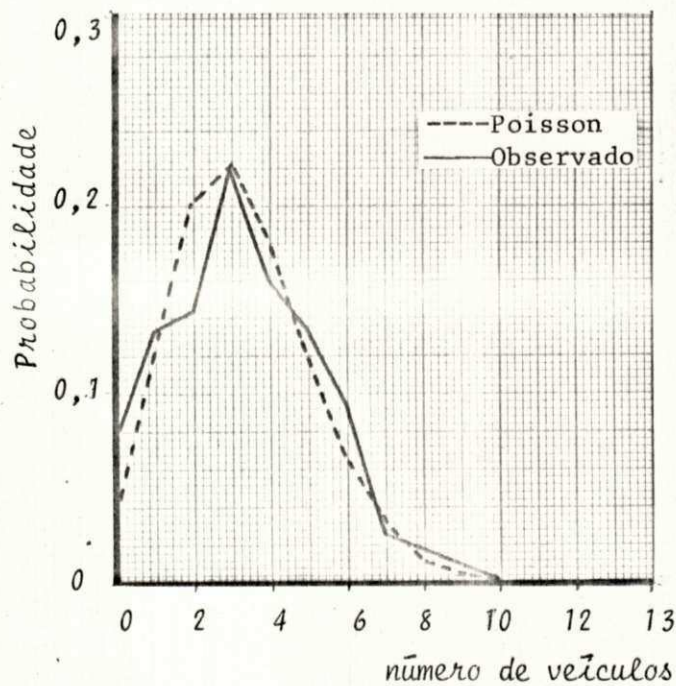


FIGURA 13: Distribuição de chegadas da interseção III (chegada III.B.)

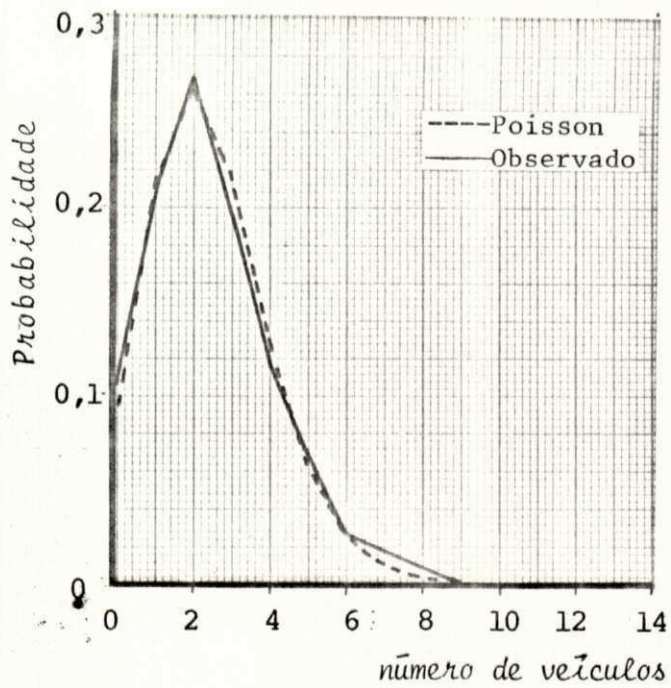


FIGURA 14: Distribuição de chegadas da interseção III (chegada III.C)

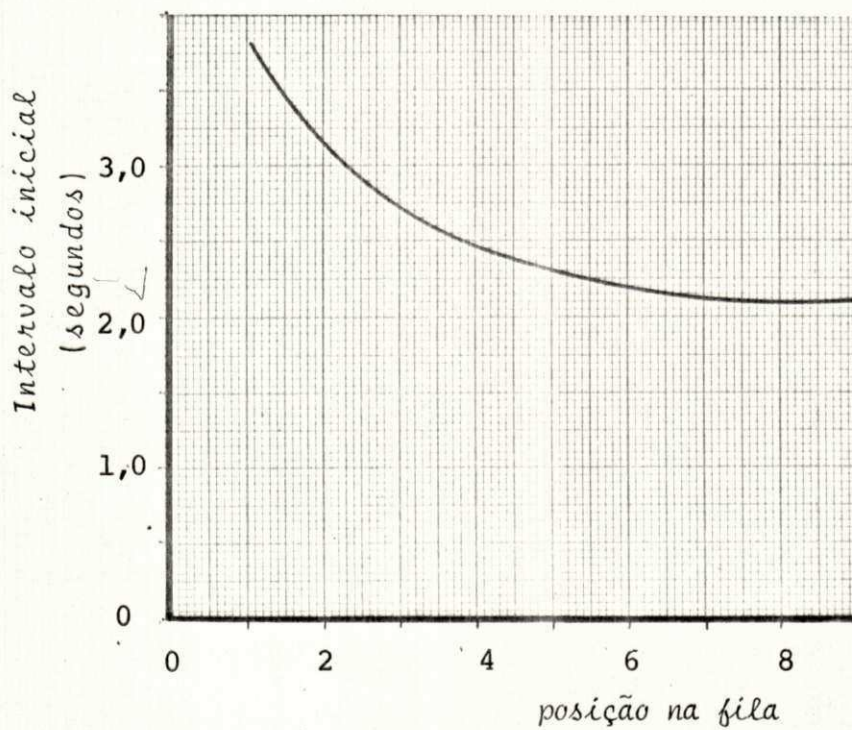


FIGURA 15: Variação do intervalo entre veículos consecutivos em função da posição na fila

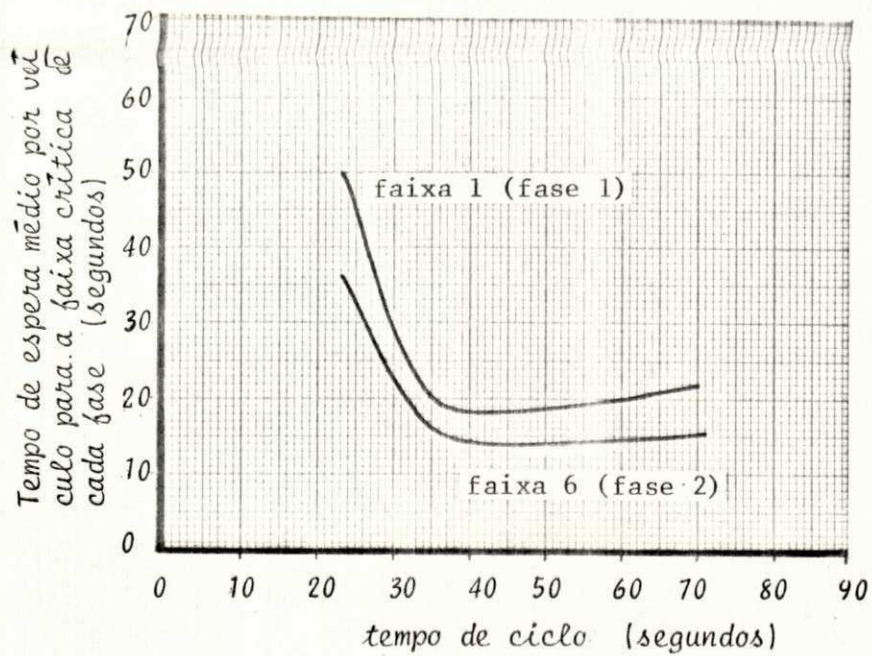


FIGURA 16: Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção I

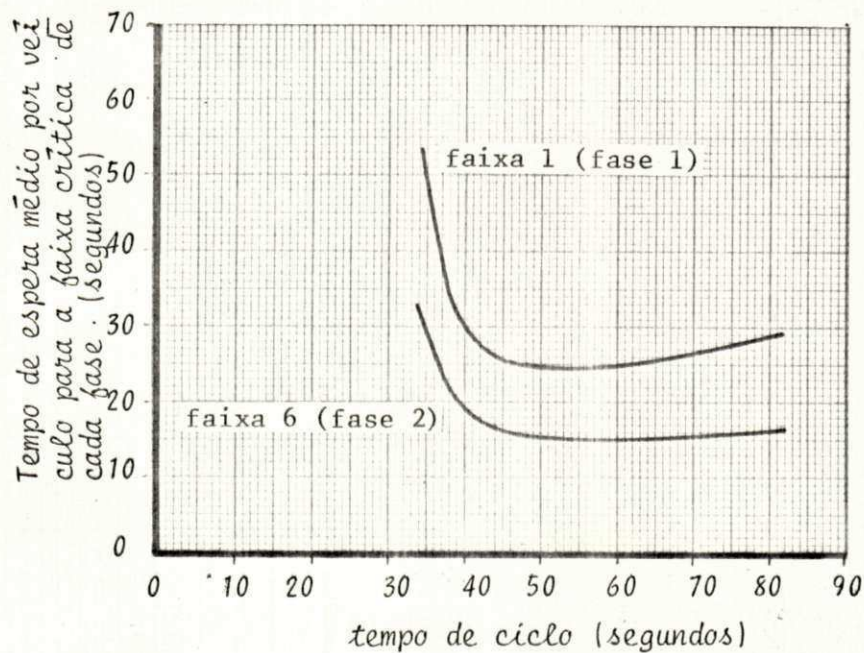


FIGURA 17: Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção II

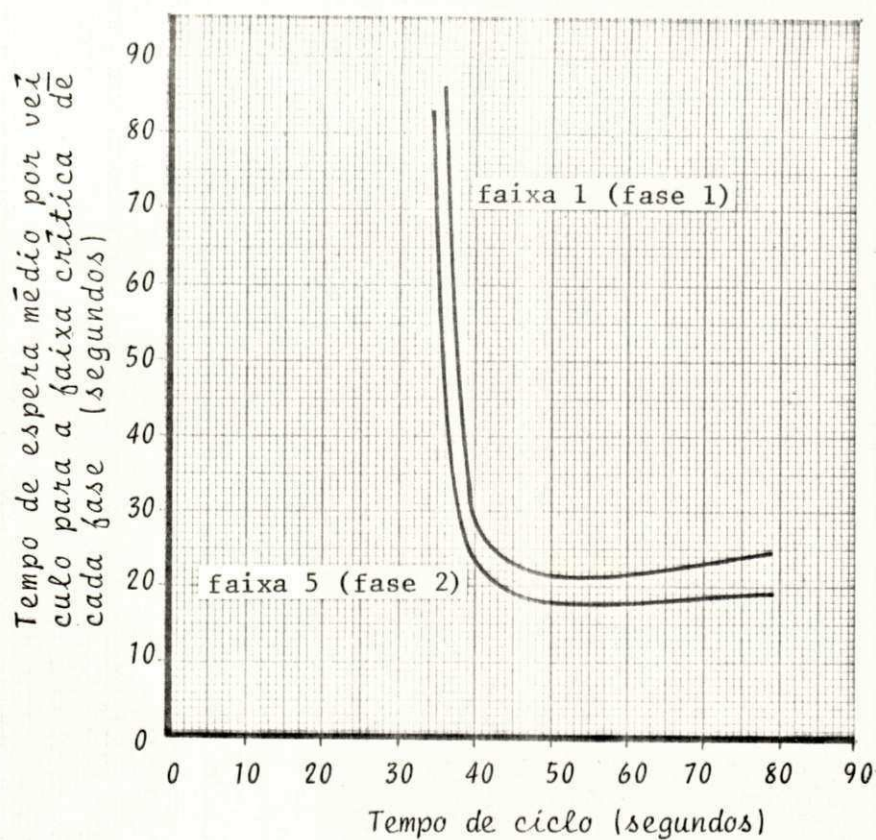


FIGURA 18: Tempo de espera médio por veículo em função do tempo de ciclo para a interseção III

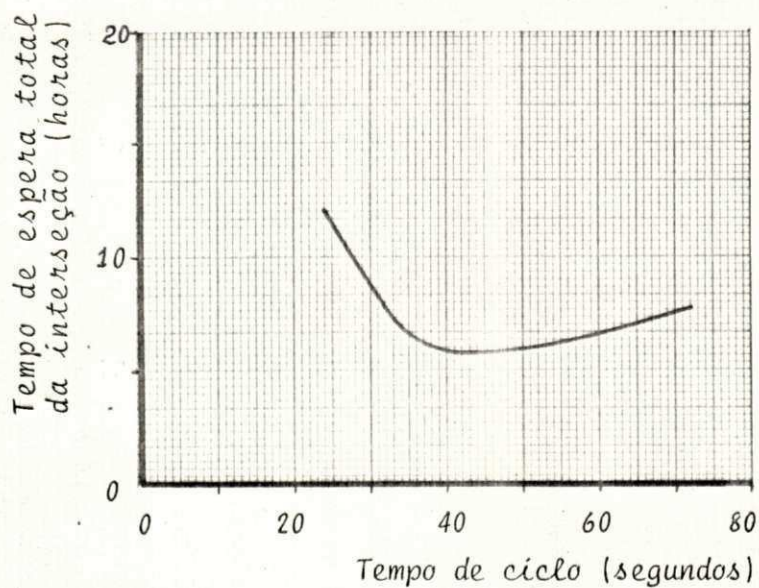


FIGURA 19: Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção I

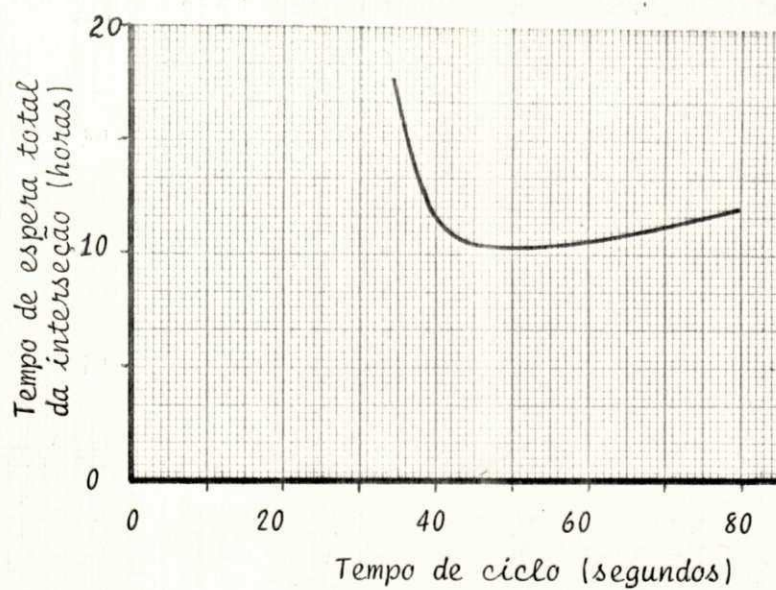


FIGURA 20: Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção II

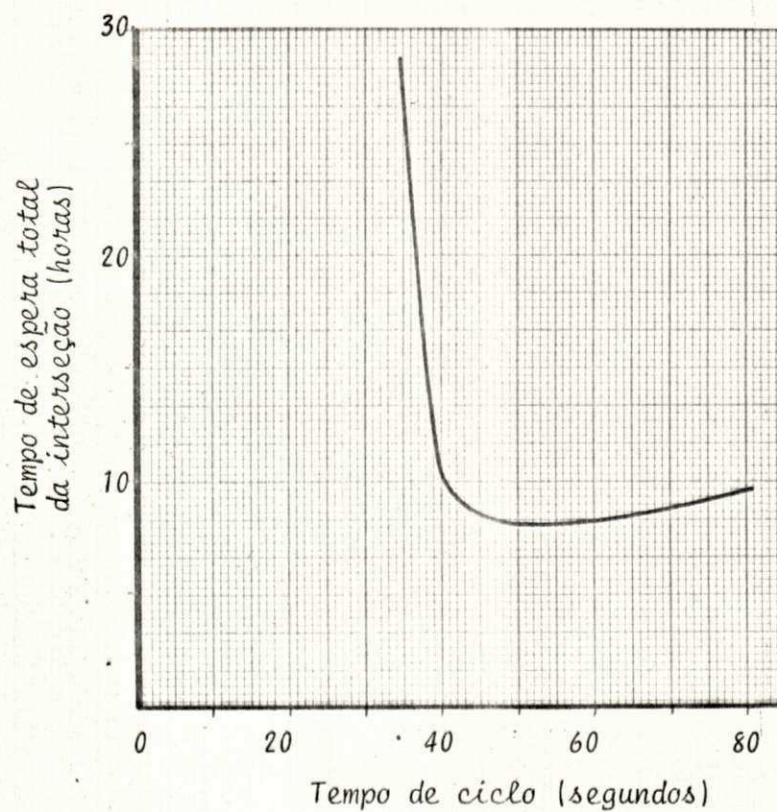


FIGURA 21: Tempo de espera total em função do tempo de ciclo para a interseção III

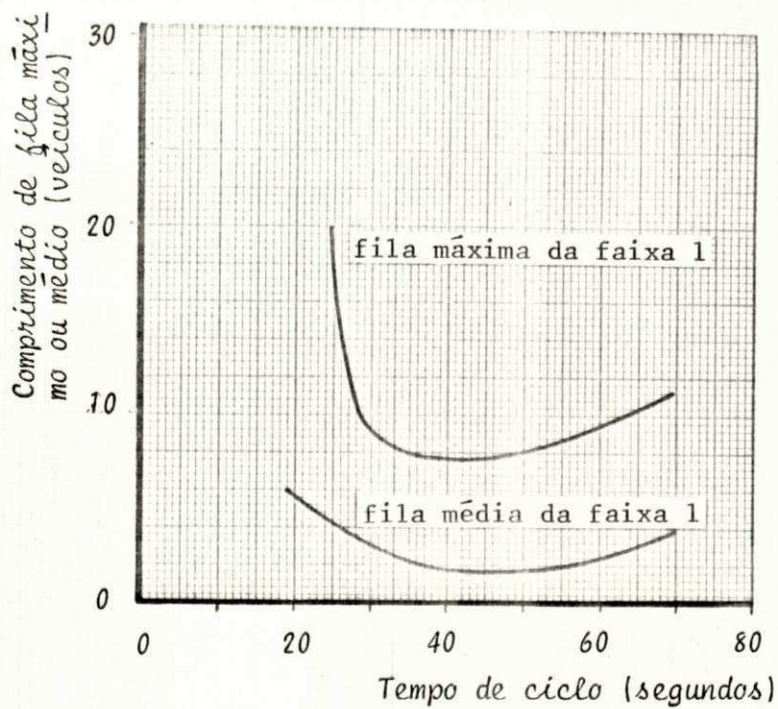


FIGURA 22: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção I, fase 1

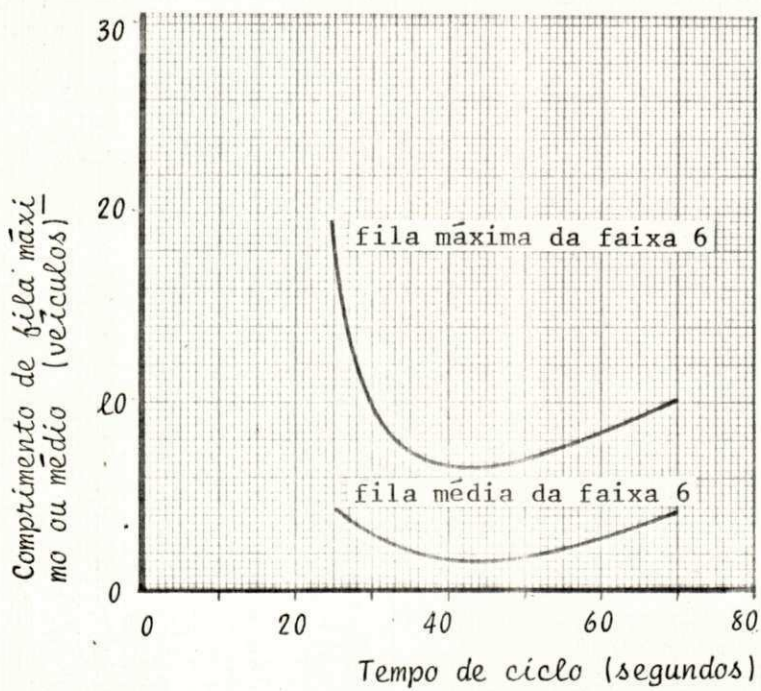


FIGURA 23: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção I, fase 2

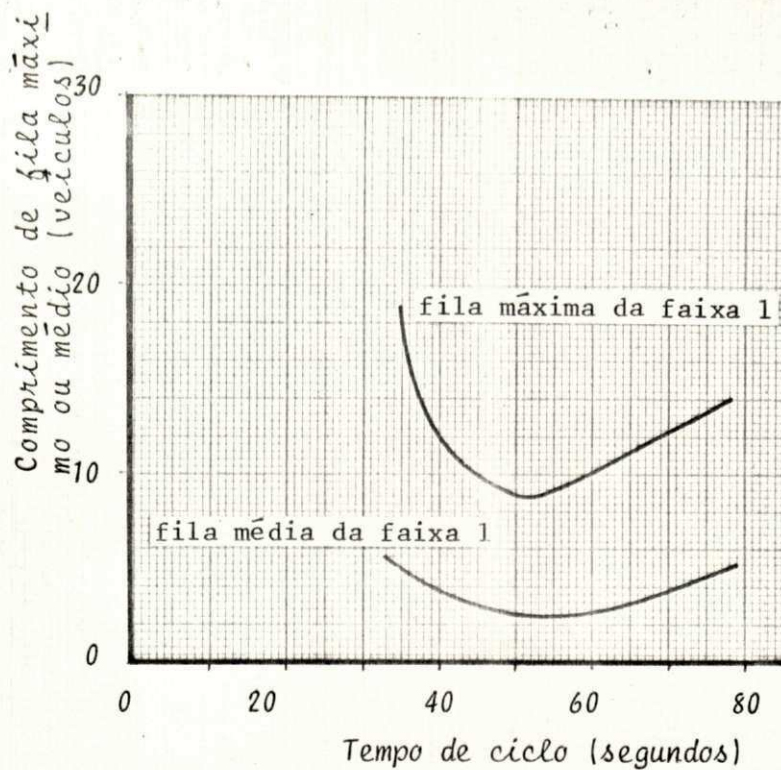


FIGURA 24: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção II, fase 1

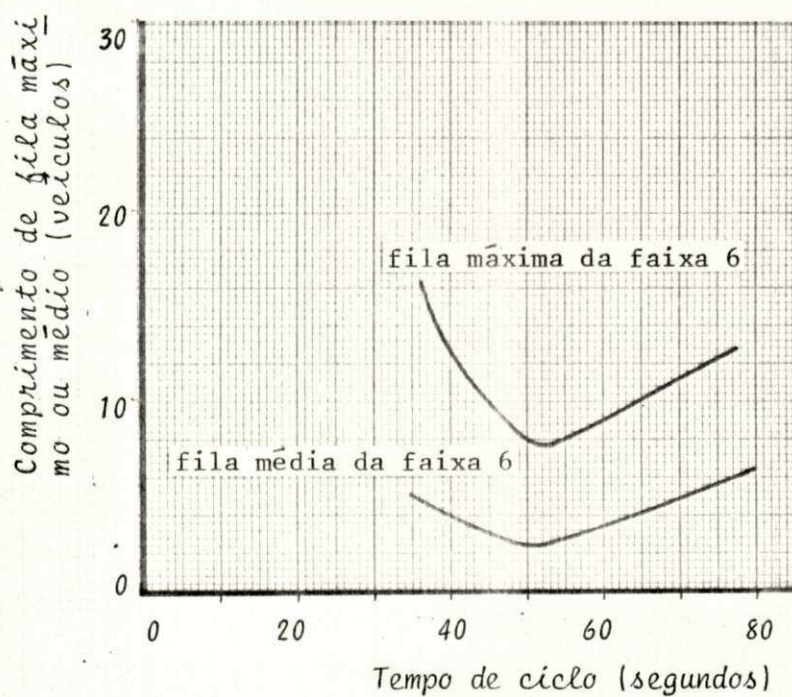


FIGURA 25: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção II, fase 2

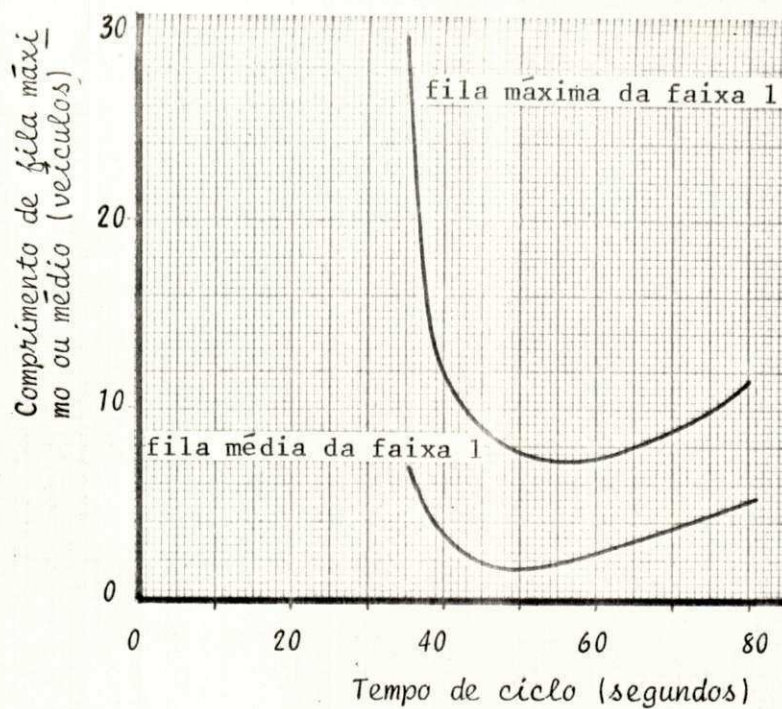


FIGURA 26: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção III, fase 1

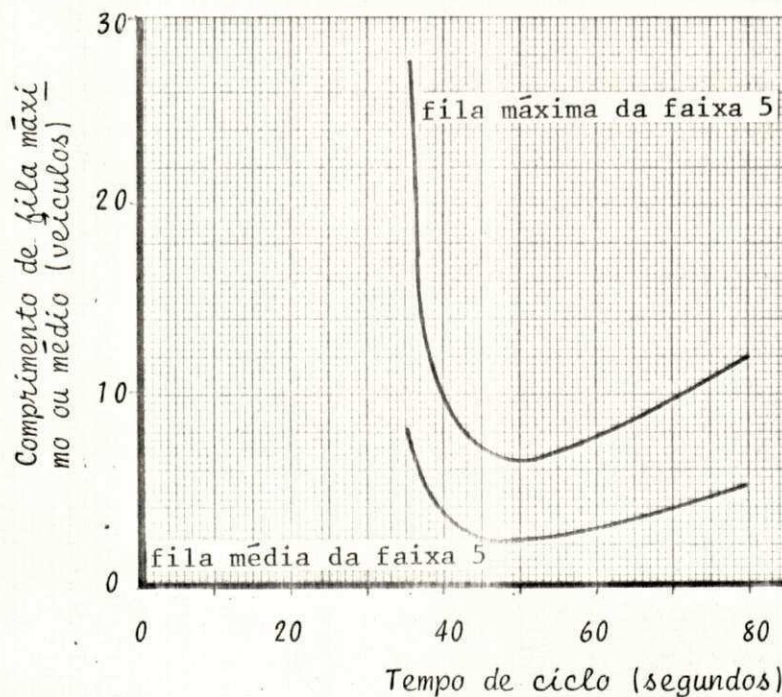


FIGURA 27: Comprimento de fila em função do tempo de ciclo para a interseção III, fase 2

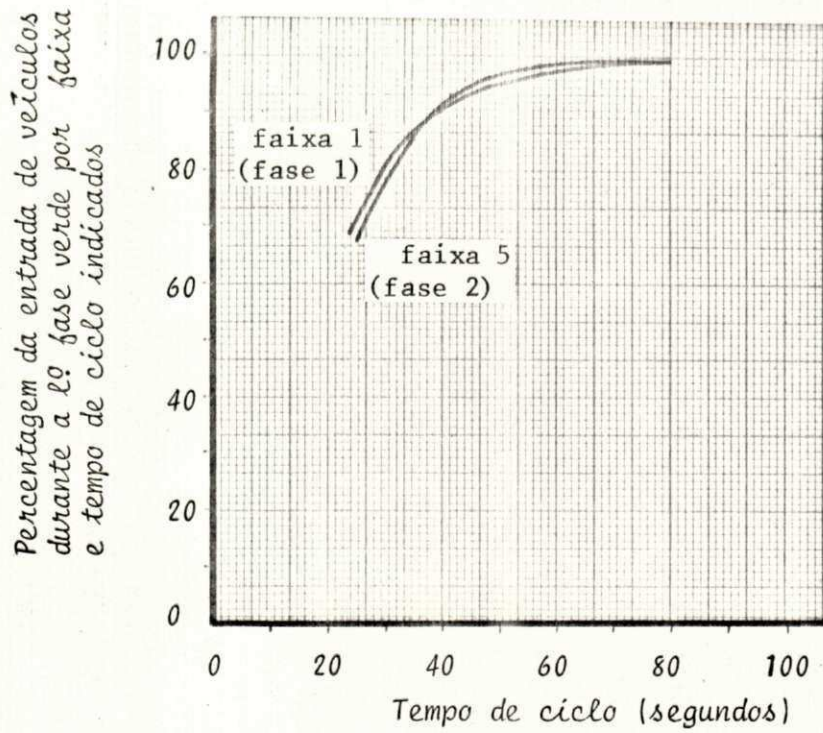


FIGURA 28: Probabilidade de entrada durante a 1ª fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção I

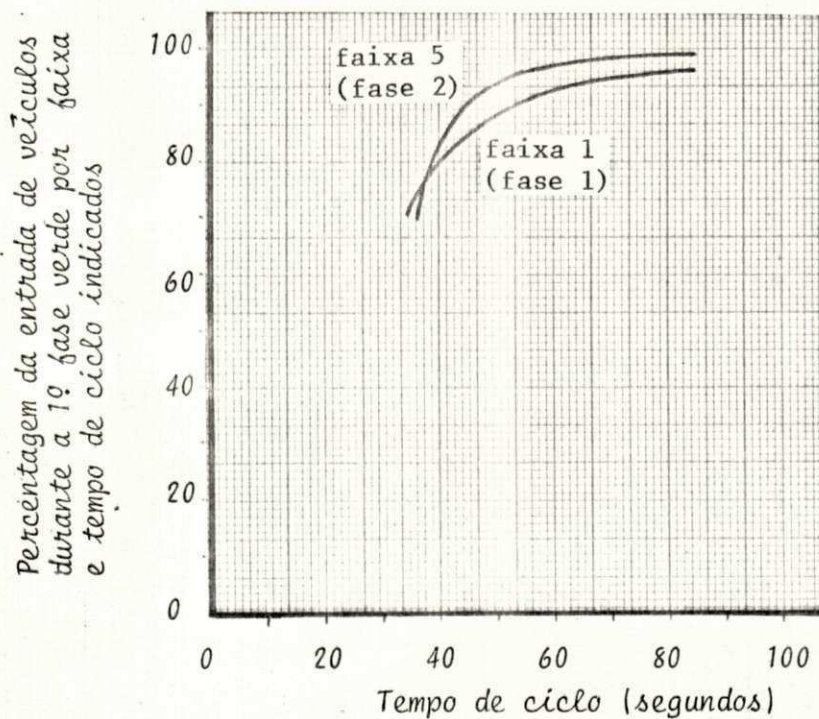


FIGURA 29: Probabilidade de entrada durante a 1ª fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção II

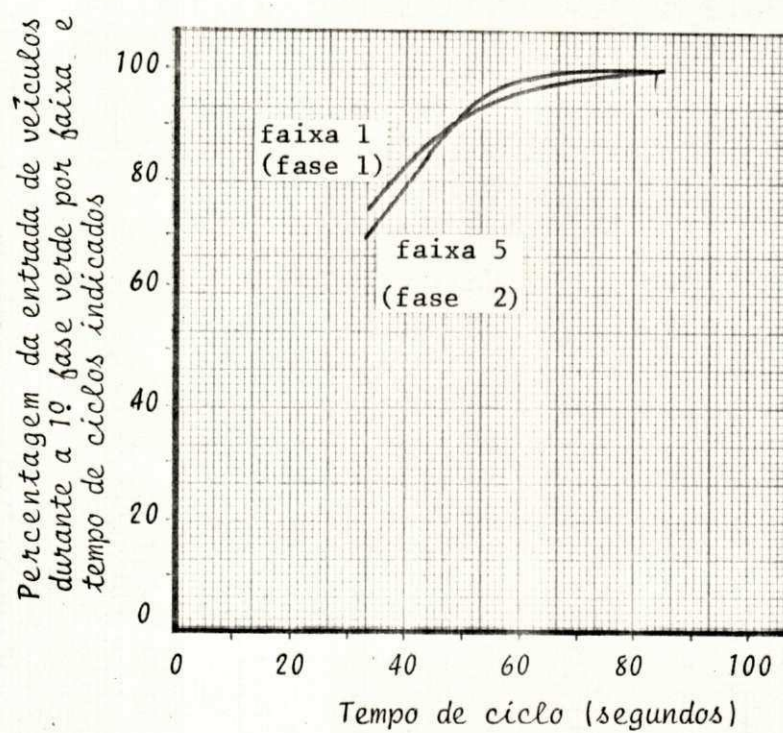


FIGURA 30: Probabilidade de entrada durante a 1ª fase verde em função do tempo de ciclo para a interseção III

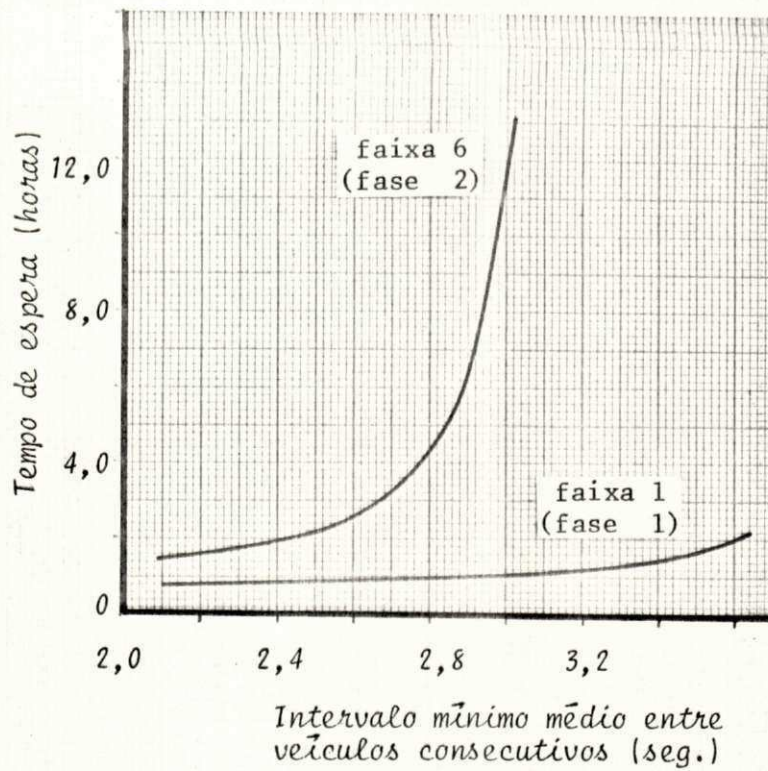


FIGURA 31: Tempo de espera em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para a interseção I

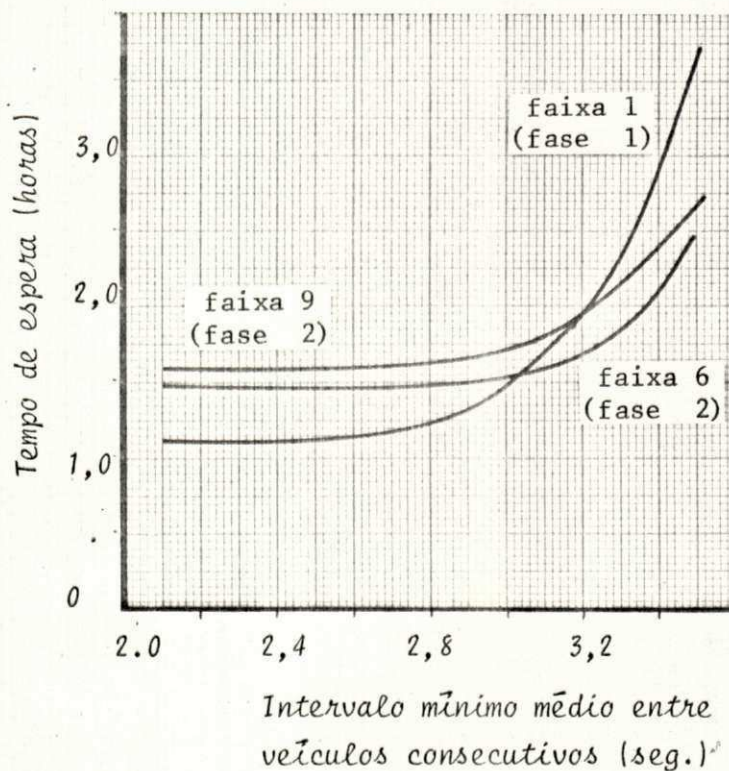


FIGURA 32: Tempo de espera em função do intervalo mínimo médio entre veículos consecutivos para as interseções II e III

APÊNDICE B

ILUSTRAÇÕES



ILUSTRACÃO 1: Vista parcial da chegada I.B



ILUSTRACÃO 2: Vista parcial da chegada I.A

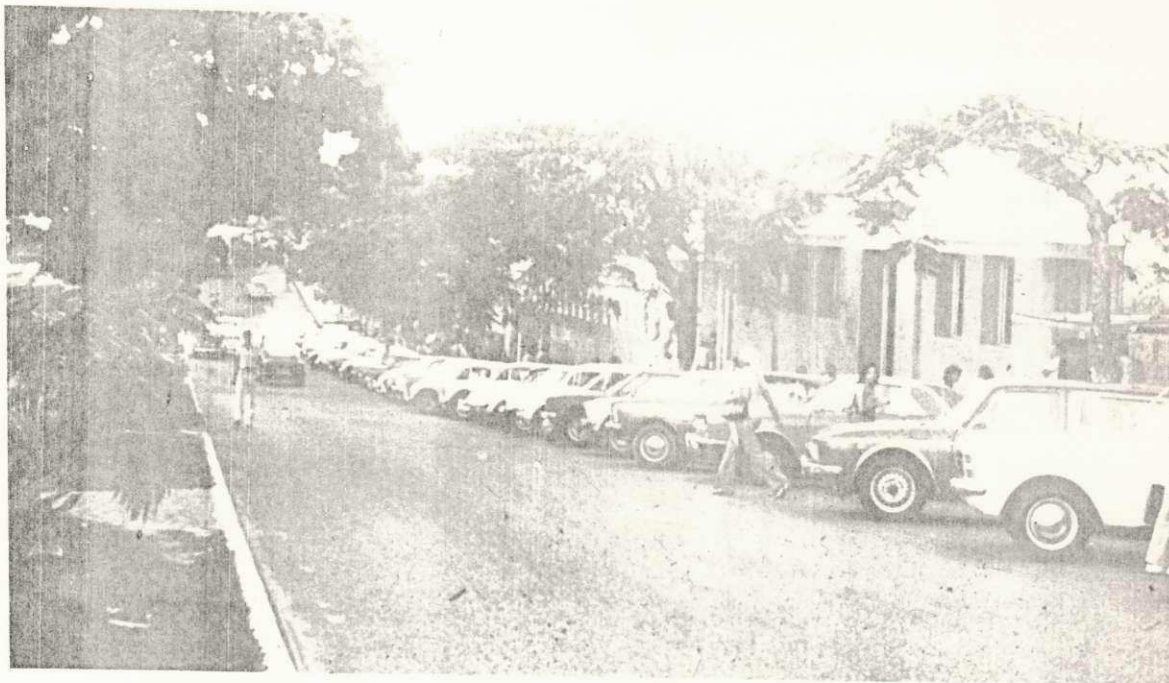


ILUSTRAÇÃO 3: Vista do estacionamento a 45º existente na chegada II.A



ILUSTRAÇÃO 4: Vista parcial da chegada III.B.

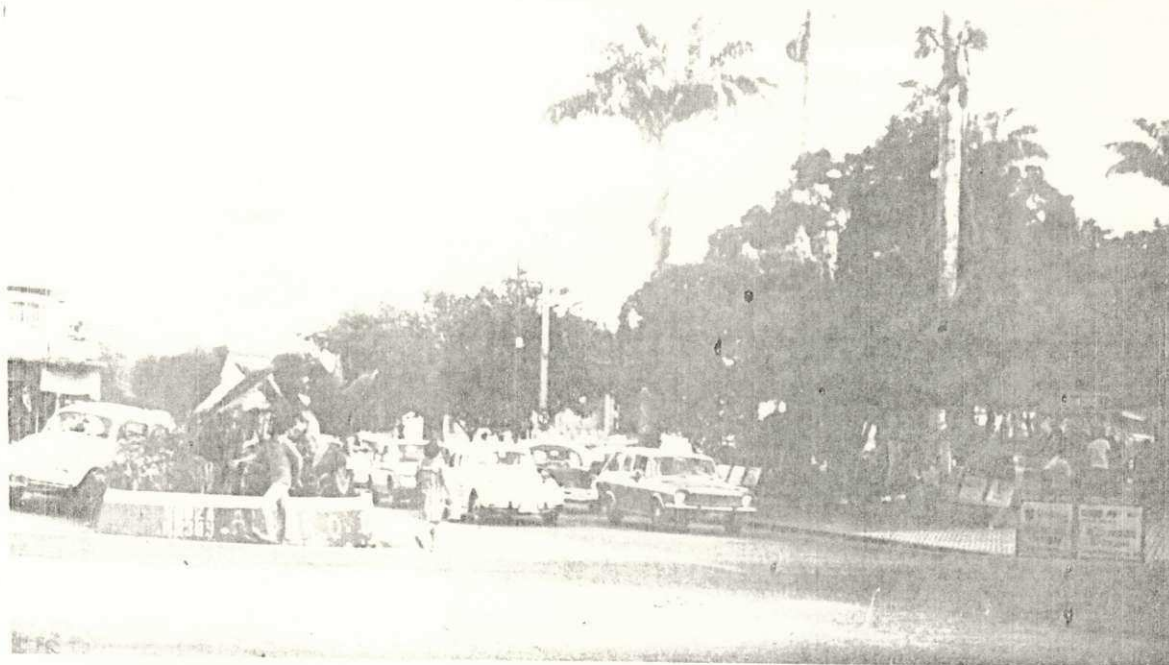


ILUSTRAÇÃO 5: Vista parcial da chegada II.B.



ILUSTRAÇÃO 6: Vista parcial do relógio e do terminal urbano existente na chegada II.C.



ILUSTRAÇÃO 7: Vista parcial da interseção II



ILUSTRAÇÃO 8: Vista dos terminais urbanos existentes na Praça da Bandeira e na chegada III.C

A P E N D I C E C

Programas de computador para o cálculo do tempo médio de espera em uma interseção com sinal luminoso.

C.1 - Programa para o cálculo do tempo de espera através da fórmula empírica de Webster - Cobbe.

O programa é executado segundo as seguintes fases:

1. Leitura dos volumes máximos de cada fase (em veículos/segundo).
2. Determinação dos períodos de amarelo.
3. Cálculo do tempo perdido para:
 - Colocar a fila em movimento
 - O último veículo atravessar a interseção.
4. Determinação de um intervalo para análise do tempo de ciclo ótimo.
5. Determinação da duração da fase verde.
6. Cálculo do tempo de espera por veículo e tempo de espera total da interseção.
7. Cálculo da fila média na faixa (em número de veículos).

8. Os cálculos de 5 a 7 são repetidos para to dos os tempos de ciclo do intervalo de es tudo.
9. Todos os cálculos de 1 a 8 são execu— dos e impressos para cada uma das interseções em separado.

Principais variáveis utilizadas do programa

- VC - Volume equivalente máximo da interseção
- VC1 - Volume equivalente máximo da fase 1
- VC2 - Volume equivalente máximo da fase 2
- TA1 - Duração do período de amarelo da fase 1
- TA2 - Duração do período de amarelo da fase 2
- K1 - Tempo perdido na interseção para a fase 1
- K2 - Tempo perdido na interseção para a fase 2
- KT - Soma dos parâmetros K1 e K2
- C(I) - Tempo de ciclo
- GE - Tempo de verde efetivo para um ciclo
- G1 - Duração do período verde + amarelo para a fase 1
- G2 - Duração do período verde + amarelo para a fase 2
- D1(J)- Tempo de espera por veículo para a fase 1
- D2(J)- Tempo de espera por veículo para a fase 2
- DH(J)- Tempo total de espera da interseção
- R1 - Duração da luz vermelha para a fase 1
- R2 - Duração da luz vermelha para a fase 2
- NV(J)- Número de veículos na fila.

```

C   PROGRAMA PARA ANALISE DA PERFORMANCE DE UMA INTERSECAO COM SINAL
C   LUMINOSO
      REAL L,K,KT,K1,K2,K11,K12,K21,K22,LAMB1,LAMB2
      DIMENSION U(10),DP(10),W(10),TA(10),VA(10),CC(10),CD(10),C(10),V(1
10),X1(10),X2(10),A1(10),A2(10),B1(10),B2(10),D1(10),D2(10),DF1(10)
2,DF2(10),NV(10),VH(10),DH(10)
      MJ=1
13  IF(MJ.GE.4) GO TO 1000
      WRITE(6,18)MJ
18  FORMAT(///,5X,'INTERSECAO ',I2,///)
      READ(5,10)VC,VC1,VC2
10  FORMAT(3F5.3)
      WRITE(6,12)VC,VC1,VC2
12  FORMAT('1',5X,'VOLUME EQUIVALENTE MAXIMO DA INTERSECAO = ',F5.3,//
1,5X,'VOLUME EQUIVALENTE MAXIMO DA FASE 1 = ',F5.3,//,5X,'VOLUME EQ
2UIVALENTE MAXIMO DA FASE 2 = ',F5.3,//)
C   DETERMINACAO DOS PERIODOS AMARELOS
      P=2.
      TD=1.
      N=P
      READ(5,11)(U(I),I=1,4)
11  FORMAT(4F5.2)
      L=5.
      TAC=3.66
      READ(5,11)(DP(I),I=1,4)
      DO 20 I=1,N
      W(I)=DP(I)+3.66
20  TA(I)=TD+U(I)/(2*TAC)+(W(I)+L)/U(I)
      DO 1 I=1,N
      1 WRITE(6,25)I,TA(I)
25  FORMAT(5X,'TEMPO DE AMARELO DA FASE',I2,' = ',F4.1,/)
C   DETERMINACAO DO TEMPO PERDIDO
      K11=3.9
      K21=K11
      DO 30 I=1,N
      W(I)=DP(I)+3.66

```

C.1

```

30 VA(I)=(W(I)+L)/U(I)
   K12=VA(1)
   K22=VA(2)
   K1=K11+K12
   K2=K21+K22
C   CALCULO DO TEMPO DE CICLO OTIMO PARA DETERMINACAO DO INTERVALO DE
C   ESTUDO
   KT=K1+K2
   H=2.1
   S=1/H
   Y=(VC1+VC2)*1./S
   CO=(1.5*KT+5.)/(1-Y)
   WRITE(6,33)CO
33 FORMAT(//,5X,'CO = ',F6.1,//)
   JC=CO/5.
   RESTO=CO-JC*5
   CPO=CO-RESTO
   II=0
   DO 50 I=1,6
   CC(I)=CPO+5*II
   IF(II.GT.5) GO TO 5
   II=II+1
   DO 50 J=1,4
   CD(J)=CPO-5*J
50 CONTINUE
   5 J=4
   DO 101 I=1,4
   C(I)=CD(J)
   J=J-1
101 CONTINUE
   J=1
   DO 105 I=5,10
   C(I)=CC(J)
   J=J+1
105 CONTINUE
   WRITE(6,55)(C(I),I=1,10)

```

```

55 FORMAT(/,5X,'TEMPOS DE CICLO QUE SERAO ESTUDADOS (SEG.)',/,5X,10F
35.0,/)
C DETERMINACAO DA DURACAO DA FASE VERDE
NF=6
READ(5,40)(V(J),J=1,NF)
40 FORMAT(6F5.3)
READ(5,22)(VH(J),J=1,NF)
22 FORMAT(6F5.0)
DO 200 I=1,10
WRITE(6,300)C(I)
GE=C(I)-KT
G1=(VC1/VC)*GE+K1
G2=(VC2/VC)*GE+K2
WRITE(6,60)G1,G2
60 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE VERDE + AMARELO DA FASE 1 = ',F5.1,/,5X,'T
4EMPO DE VERDE + AMARELO DA FASE 2 = ',F5.1,/)
C CALCULO DO TEMPO DE ESPERA POR VEICULO
LAMB1=(G1-K1)/C(I)
LAMB2=(G2-K2)/C(I)
WRITE(6,35)LAMB1,LAMB2
35 FORMAT(/,5X,'LAMB1 = ',F7.3,/,5X,'LAMB2 = ',F7.3,/)
J=1
42 X1(J)=V(J)/(LAMB1*S)
A1(J)=((1.-LAMB1)**2)/(2.*(1.-LAMB1*X1(J)))
B1(J)=((X1(J))**2)/(2.*(1.-X1(J)))
OF1(J)=(0.65*((C(I)/(V(J)**2))**(1./3.))*(X1(J)**(2.+5.*LAMB1)))
D1(J)=C(I)*A1(J)+(B1(J)/V(J))-OF1(J)
IF(J.GE.3) GO TO 45
J=J+1
GO TO 42
45 J=J+1
X2(J)=V(J)/(LAMB2*S)
A2(J)=((1.-LAMB2)**2)/(2.*(1.-LAMB2*X2(J)))
B2(J)=((X2(J))**2)/(2.*(1.-X2(J)))
OF2(J)=(0.65*((C(I)/(V(J)**2))**(1./3.))*(X2(J)**(2.+5.*LAMB2)))
D2(J)=C(I)*A2(J)+(B2(J)/V(J))-OF2(J)

```



```

IF(J.LT.6) GO TO 45
DO 36 J=1,3
36 WRITE(6,37)J,X1(J)
37 FORMAT(/,5X,'X1(',I2,') = ',3F7.3,/)
DO 38 J=4,6
38 WRITE(6,39)J,X2(J)
39 FORMAT(/,5X,'X2(',I2,') = ',3F7.3,/)
DO 80 J=1,3
80 WRITE(6,70)J,D1(J)
DO 83 J=4,6
83 WRITE(6,72)J,D2(J)
70 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR VEICULO DA FASE 1 PARA A FAIXA',
1I2,'=',3F10.5,/)
72 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR VEICULO DA FASE 2 PARA A FAIXA',
2I2,'=',3F10.5,/)
DO 77 J=1,3
DH(J)=(VH(J)*D1(J))/3600.
77 WRITE(6,78)J,DH(J)
78 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR HORA DA FASE 1 PARA A FAIXA',I2,
1'=',3F10.5,/)
DO 86 J=4,6
DH(J)=(VH(J)*D2(J))/3600.
86 WRITE(6,87)J,DH(J)
87 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR HORA DA FASE 2 PARA A FAIXA',I2,
2'=',3F6.2,/)
C DETERMINAÇÃO DA FILA MEDIA NA FAIXA(NUMERO DE VEICULOS)
WRITE(6,66)
66 FORMAT(/,5X,'FILA MEDIA NA FAIXA',/)
R1=G2
R2=G1
DO 90 J=1,3
90 NV(J)=(V(J)*R1)/2.+V(J)*D1(J)
DO 91 J=4,6
91 NV(J)=(V(J)*R2)/2.+V(J)*D2(J)
DO 95 J=1,3
IF((V(J)*R1).LE.NV(J)) GO TO 98

```

```

      NV(J)=V(J)*R1
  98  WRITE(6,201)J,NV(J)
 201  FORMAT(5X,'NUMERO DE VEICULOS NA FAIXA',I2,'=',I3,/)
  95  CONTINUE
      DO 99 J=4,6
      IF((V(J)*R2).LE.NV(J)) GO TO 96
      NV(J)=V(J)*R2
  96  WRITE(6,201)J,NV(J)
  99  CONTINUE
 200  CONTINUE
 300  FORMAT(//,5X,'CALCULOS PARA O TEMPO DE CICLO DE ',10F5.0,'SEGUNDOS
 1',/)
      MJ=MJ+1
      GO TO 13
1000  STOP
      END
```

C. 2 - Programa para a simulação da operação do semáforo com controle automático

O programa é análogo ao utilizado para o cálculo do tempo de espera através da fórmula de Webster, apenas não se considera o período de amarelo e os cálculos são processados para um só tempo de ciclo para cada fase.

As variáveis mais importantes que não foram definidas são as seguintes:

V(J) - Volume equivalente por faixa (em veículos/segundos)

VH(J) - Volume real por faixa (em veículos/hora)

C1 - Tempo de ciclo da fase 1

C2 - Tempo de ciclo da fase 2

```

C   PROGRAMA PARA DETERMINACAO DO TEMPO DE ESPERA E FILA DA SITUACAO
C   ATUAL DA INTERSECAO 1
REAL K1,K2,LAMB1,LAMB2
DIMENSION V(20),VH(20),X1(20),X2(20),A1(20),A2(20),B1(20),B2(20)
DIMENSION OF1(20),OF2(20),D1(20),D2(20),DH(20),NV(20),H(20)
NF=7
N=20
READ(5,40)(V(J),J=1,NF)
40 FORMAT(7F5.3)
READ(5,22)(VH(J),J=1,NF)
22 FORMAT(7F5.0)
READ(5,10)G1,G2,R1,R2
10 FORMAT(4F3.0)
WRITE(6,15)G1,G2,R1,R2
15 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE VERDE DA FASE 1 = ',F5.0,/,5X,'TEMPO DE VERD
IE DA FASE 2 = ',F5.0,/,5X,'TEMPO DE VERMELHO DA FASE 1 = ',F5.0,/,5
2X,'TEMPO DE VERMELHO DA FASE 2 = ',F5.0)
READ(5,20)K1,K2
20 FORMAT(2F3.1)
READ(5,33)(H(I),I=1,20)
33 FORMAT(20F3.1)
C   CALCULO DO TEMPO DE ESPERA POR VEICULO
C1=G1+R1
C2=G2+R2
LAMB1=(G1-K1)/C1
LAMB2=(G2-K2)/C2
DO 1 I=1,N
WRITE(6,31)H(I)
31 FORMAT(/,5X,'RESULTADOS PARA O INTERVALO DE',F3.1,' SEGUNDOS',/)
S=1./H(I)
J=1
42 X1(J)=V(J)/(LAMB1*S)
A1(J)=((1.-LAMB1)**2)/(2.*(1.-LAMB1*X1(J)))
B1(J)=((X1(J))**2)/(2.*(1.-X1(J)))
OF1(J)=(0.65*((C1/(V(J)**2))**{1./3.})*(X1(J)**(2.+5.*LAMB1)))
D1(J)=C1*A1(J)+(B1(J)/V(J))-OF1(J)

```

```

IF(J.GE.4) GO TO 45
J=J+1
GO TO 42
45 J=J+1
X2(J)=V(J)/(LAMB2*S)
A2(J)=((1.-LAMB2)**2)/(2.*(1.-LAMB2*X2(J)))
B2(J)=((X2(J))**2)/(2.*(1.-X2(J)))
OF2(J)=(0.65*((C2/(V(J)**2))**{1./3.})*(X2(J)**(2.+5.*LAMB2)))
D2(J)=C2*A2(J)+(B2(J)/V(J))-OF2(J)
IF(J.LT.7) GO TO 45
DO 80 J=1,4
80 WRITE(6,70)J,D1(J)
DO 83 J=5,7
83 WRITE(6,72)J,D2(J)
70 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR VEICULO DA FASE 1 PARA A FAIXA',
1I2,'=',3F10.5,/)
72 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR VEICULO DA FASE 2 PARA A FAIXA',
2I2,'=',3F10.5,/)
DO 77 J=1,4
DH(J)=(VH(J)*D1(J))/3600.
77 WRITE(6,78)J,DH(J)
78 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR HORA DA FASE 1 PARA A FAIXA',I2,
1'=',3F10.5,/)
DO 86 J=5,7
DH(J)=(VH(J)*D2(J))/3600.
86 WRITE(6,87)J,DH(J)
87 FORMAT(/,5X,'TEMPO DE ESPERA POR HORA DA FASE 2 PARA A FAIXA',I2,
2'=',3F6.2,/)
C DETERMINACAO DA FILA MEDIA NA FAIXA(NUMERO DE VEICULOS)
WRITE(6,66)
66 FORMAT(/,5X,'FILA MEDIA NA FAIXA',/)
DO 90 J=1,4
90 NV(J)=(V(J)*R1)/2.+V(J)*D1(J)
DO 91 J=5,7
91 NV(J)=(V(J)*R2)/2.+V(J)*D2(J)
DO 95 J=1,4

```

```
      IF((V(J)*R1).LE.NV(J)) GO TO 98
      NV(J)=V(J)*R1
98  WRITE(6,201)J,NV(J)
201 FORMAT(5X,'NUMERO DE VEICULOS NA FAIXA',I2,'=',I3,/)
95  CONTINUE
      DO 99 J=5,7
      IF((V(J)*R2).LE.NV(J)) GO TO 96
      NV(J)=V(J)*R2
96  WRITE(6,201)J,NV(J)
99  CONTINUE
1   CONTINUE
      STOP
      END
```

C.3 - Programa para a simulação da operação dos semáforos com controle manual

Para o cálculo do tempo de espera, no programa principal as seguintes etapas são executadas:

1. Leitura dos volumes equivalentes de cada faixa.
2. Leitura do tempo de simulação.
3. Leitura dos valores dos parâmetros das distribuições de POISSON e de GAUSS.
4. Chamada das subrotinas TRANS e GAUSS para geração de chegadas de veículos e tempos de ciclo respectivamente.
5. Cálculo do tempo de verde efetivo.
6. Cálculo da duração do tempo de verde de cada fase.
7. Cálculo do tempo de espera.
8. Determinação dos instantes de passagem de cada veículo.
9. Cálculo do comprimento de fila em cada faixa.
10. Impressão dos resultados.
11. As etapas de 4 a 10 são repetidas até que o tempo de relógio se iguale ao tempo de simulação.

A subrotina TRANS procede a geração das chegadas dos veículos na fila, sendo que os intervalos entre chegadas obedece uma distribuição exponencial e é alimentada pela subrotina ALETO geradora de números aleatórios ou randômicos de valores entre 0 e 1. A subrotina GAUSS gera tempos de ciclo segundo uma distribuição normal e é alimentada pela subrotina RANDO geradora de números randômicos.

Hipóteses

- a) A simulação inicia exatamente, no momento em que se abre uma fase verde da Rua Floriano Peixoto na interseção II.
- b) Quando a simulação inicia não há filas restantes nas faixas em que o sinal está verde.
- c) O tráfego é todo convertido em unidades de carro de passageiros.
- d) Os movimentos para esquerda e para direita são convertidos em movimentos em linha reta através dos equivalentes em carro de passageiros.
- e) Os incrementos de tempo de simulação é previsto $T_I = 1$ segundo.

Principais variáveis usadas no programa

- TF - Tempo de simulação
- TI - Incremento de tempo
- VM(J) - Volume equivalente por faixa
- TH(I) - Intervalo médio entre veículos consecutivos
- K - Indicador de fase
- KI - Variável auxiliar
- TR - Tempo de relógio
- TC - Tempo de ciclo
- TS(I) - Instante de chegada de um veículo à fila I
- CF(I) - Comprimento de fila na faixa I
- G - Tempo de verde efetivo
- TV(K) - Duração do tempo de verde de cada fase
- TT(I) - Tempo de espera em cada faixa I
- CV - Controle de verde
- CT - Controle de tempo de ciclo.

```

C   PROGRAMA DE SIMULACAO DE UM CONTROLE MANUAL DE SINAL DE TRAFEGO
      INTEGER CV,CT,TEC
      DIMENSION VM(20),TS(1000),CF(20),TV(200),ALAMB(20),SOMA(20),TT(20)
      DIMENSION TEST(20),AC(20),HM(20),TH(20)
      READ(5,110)M,N,L,NA,TF,TI,A
110  FORMAT(4I2,3F8.3)
      READ(5,115)(VM(J),J=1,L)
115  FORMAT(2F5.3)
      WRITE(6,120)M,N,L,NA,TF,TI,A
120  FORMAT('1',5X,'NUMERO DE FAIXAS DA FASE 1,M= ',I2,/,5X,'NUMERO DE
1FAIXAS DA FASE 2,N= ',I2,/,5X,'FAIXAS DOMINANTES,L= ',I2,/,5X,'NUM
2ERO DE APPROACHES, NA= ',I2,/,5X,'TEMPO DE SIMULACAO, TF= ',F5.0,'
3SEGUNDOS',/,5X,'INCREMENTO DE TEMPO, TI= ',F3.0,'SEGUNDOS',/,5X,'T
4EMPO DE INERCIA INICIAL, A= ',F5.1,'SEGUNDOS')
      DO 3 J=1,L
3    WRITE(6,121)J,VM(J)
121  FORMAT(5X,'VOLUME MAXIMO DA FASE',I2,'=' ,F5.3,'VEIC./SEG. ')
      NF=M+N
      READ(5,125)(ALAMB(I),I=1,NF)
      WRITE(6,125)(ALAMB(I),I=1,NF)
      KT=0
      READ(5,140)AMED,DESP,LIX
      READ(5,67)(TH(I),I=1,20)
67  FORMAT(20F3.1)
200  KT=KT+1
      PRODU=0.07
      WRITE(6,105)TH(KT)
105  FORMAT(/,5X,'RESULTADOS PARA O TIME HEADWAY DE ',F3.1,' SEGUNDOS'
1,/)
      KONT=0
      KASTO=0
      K=1
      KI=K
      DO 1 I=1,NF
      AC(I)=0.
1    TT(I)=0.

```

```

TR=0.
TC=0.
DO 501 I=1,NF
TEST(I)=ALAMB(I)*IF+1.
501 MIX=LIX
DO 10 I=1,NF
XLAMB=ALAMB(I)
AC(I)=AC(I)+1.
CALL TRANS(XLAMB,IX,PRODU,LIX,TEC)
TS(I)=TEC
10 CF(I)=0.
140 FORMAT(2F5.0,I3)
125 FORMAT(12F5.3)
20 CALL GAUSS(AMED,DESP,X,MIX)
TC=X
KASTO=KASTO+IC
KONT=KONT+1
G=TC-2.*A
CI=IC
88 IF(K.EQ.1) GO TO 12
TV(K)=(VM(K)*G)/(VM(1)+VM(2))+A
MI=1
NI=M
CV=TV(K)
GO TO 24
12 TV(K)=(VM(K)*G)/(VM(1)+VM(2))+A
MI=M+1
NI=M+N
CV=TV(K)
24 TR=TR+TI
DO 2 I=1,NF
2 SOMA(I)=0.
DO 30 I=MI,NI
SOMA(I)=SOMA(I)+CF(I)*TI
30 TI(I)=TI(I)+SOMA(I)
DO 40 I=1,NF

```

```

    TS(I)=TS(I)-TI
    IF(TS(I))51,52,40
52  CF(I)=CF(I)+1.
51  XLAMB=ALAMB(I)
    AC(I)=AC(I)+1.
    IF(AC(I).GT.TEST(I)) GO TO 40
    CALL TRANS(XLAMB,IX,PRODU,LIX,TEC)
    TS(I)=TEC
40  CONTINUE
    CV=CV-TI
    CT=CT-TI
    IF(CV)27,27,80
27  IF(K.EQ.1) GO TO 16
    MI=M+1
    NI=M+N
    KI=K
    K=K-1
    GO TO 18
16  MI=1
    NI=M
    KI=K
    K=K+1
18  DO 50 I=MI,NI
    CF(I)=CF(I)-(TV(KI)-3.9)/TH(KT)
    IF(CF(I))36,50,50
36  CF(I)=0.
50  CONTINUE
    IF(KONT.LE.39) GO TO 80
    WRITE(6,130)KI,TC,TR,TV(KI)
130  FORMAT(5X,'FASE',I2,/,5X,'TEMPO DE CICLO= ',F5.0,/,5X,'TEMPO DE RE
    ILOGIO= ',F10.0,/,5X,'TEMPO DE VERDE= ',F10.0,/)
    DO 22 I=1,NF
    22  WRITE(6,135)I,CF(I)
135  FORMAT(5X,'FILA NA FAIXA',I2,'=',F10.0,'VEICULOS',/)
    DO 600 I=1,NF
600  WRITE(6,606)I,TT(I)

```

```

606 FORMAT(5X,'TEMPO DE ESPERA NA FAIXA',I3,' = ',F12.2,'SEGUNDOS',/)
80 IF(TR.GE.TF) GO TO 111
   IF(CT.LE.0.) GO TO 20
   IF(CV.LE.0.) GO TO 88
   GO TO 24
111 IF(KT.LT.20) GO TO 200
   WRITE(6,203)TR,KONT,KASTO
203 FORMAT(//,5X,'TR = ',F6.0,//,5X,'CONTADOR = ',I5,//,5X,'TEMPO GAST
10 = ',I6)
   STOP
   END
   SUBROUTINE TRANS(XLAMB,IX,PRODU,LIX,TEC)
   INTEGER CV,CT,TEC
   V=1./XLAMB
   CALL ALETO(PRODU)
   TEC=-V*ALOG(PRODU)
   RETURN
   END
   SUBROUTINE ALETO(PRODU)
   PI=3.141592654
   AX=(PI+PRODU)**5
   IAX=AX
   PRODU=AX-IAX
   RETURN
   END
   SUBROUTINE GAUSS(AMED,DESP,X,MIX)
   Z=-6.
   DO 1 I=1,12
   CALL RANDO(MIX,IY,UI)
   MIX=IY
1  Z=Z+UI
   X=AMED+Z*DESP
   RETURN
   END
   SUBROUTINE RANDO(MIX,IY,UI)
   IY=MIX*65539

```

```
5 IY=IY+2147483647+1
  IF(IY)5,6,6
6 UI=IY
  UI=UI*.4656613E-9
  RETURN
  END
```

B I B L I O G R A F I A

- 1 - Louis J. Pignataro, Traffic Engineering: Theory and Practice (Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1973).
- 2 - Martin Wohl and Brian V. Martin, Traffic System Analysis for Engineer and Planner (McGraw - Hill Book Company, New York, 1967).
- 3 - Highway Capacity Manual, Highway Research Board Special Report 87 (Washington, D.C., 1965).
- 4 - Antonio G. N. Novaes, Pesquisa Operacional e Transportes: Modelos Probabilísticos, (Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1975).
- 5 - Marco Antonio Brinati, Estudo do Escoamento do Tráfego em uma interseção com sinal luminoso, Dissertação de Mestrado (Escola Politécnica da U.S.P., São Paulo 1970).
- 6 - L. C. Eddie, Traffic Delays at Toll Booths (J. Operations Research, Vol. 2, pp 107-138, 1954).
- 7 - D. R. Drew and C. Pinnel, A Study Characteristics of Signalized Urban Intersections as Related to Capacity and Design (Highway Res. Board Bull, nº 352, 1962).
- 8 - Donald R. Drew, Traffic Flow Theory and Control (McGraw-Hill Book Company, New York, 1968).
- 9 - A. J. Bone, B V. Martin and T. N. Harvey, Elementary

- Sampling for Traffic Engineers (Joint Highway Research Project, Massachusetts Institute of Tecnology, Cambridge, 1964).
- 10- F.V. Webster and B.M. Cobbe, Traffic Signals, Road Research Technical Paper 56 (Road Research Laboratory, London, 1966).
 - 11- P. L. Olson and R. W. Rothery, Driver Response to the Amber Phase of Traffic Signals (Traffic Engineering, 1962).
 - 12- Traffic Engineering Handbook, Institute of Traffic Engineers (Washington, D.C., 1965).
 - 13- Research on Road Traffic, Transport and Road Research Laboratory (H.M. Stationery Office, London, 1975).
 - 14- Thomas H. Naylor, Joseph L. Balintfy, Donald S. Burdick e Kong Chu, Técnicas de Simulação em Computadores (Editora Vozes Limitada, Rio de Janeiro, 1971).