



COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO
boletim técnico



sistema de controle de tráfego

aplicação do programa TRANSYT

10

sistema de controle de tráfico
aplicação do programa TRANSYT

Ficha Catalográfica

Munhoz, E.A.M. — 1950

Sistemas de Controle de Tráfego: aplicação do programa TRANSYT.
São Paulo, Companhia de Engenharia de Tráfego. 1978.
92 p. il. (Série: Boletim Técnico da CET n.º 10)

1. Controle de Tráfego. 2. Coordenação de Semáforos.

I. Título. II. Série

Colaboraram na
execução deste trabalho:
Eng.º DALMAR V. FARIA NETTO
Eng.º MAURO V. V. MAZZAMATI

Boletim Técnico da CET n.º 10

sistema de controle de tráfego
aplicação do programa TRANSYT

Eduardo Antonio Moraes Munhoz

Companhia de Engenharia de Tráfego 

Este trabalho foi elaborado e publicado pela
Companhia de Engenharia de Tráfego — CET,
por solicitação e autorização do Departamento
de Operações do Sistema Viário do Município
de São Paulo — DSV.

**Publicação da
Companhia de Engenharia de Tráfego — CET**

Presidente

Eng.º ROBERTO SALVADOR SCARINGELLA

Diretor Técnico

Eng.º ELMIR GERMANI

Diretor Administrativo e Financeiro

Eng.º NEANDER DE CAMPOS KERR

Superintendente de Engenharia de Tráfego

Eng.º CARLOS EDUARDO FEGYVERES

Av. Nações Unidas, 7163

05477 — São Paulo — SP

A série Boletim Técnico objetiva a divulgação de estudos e projetos relativos ao binômio Tráfego-Transporte, realizados pela Equipe Técnica da Companhia de Engenharia de Tráfego e, eventualmente, por outras entidades, quando considerados relevantes.

Acreditamos na sua importância, não apenas por se tratar de um eficiente meio de divulgação, mas, principalmente, por se constituir em fonte de subsídios a todos que atuam ou necessitam de informações nesta área, tão carente de bibliografia especializada em língua portuguesa.

Eng.º Roberto Salvador Scaringella.

índice

- 1 introdução
 - 2 sistema de controle de tráfego
 - 3 necessidade de coordenação
 - 4 considerações sobre atraso de veículos
 - 5 considerações sobre número de paradas
 - 6 esquemas de sincronismo e coordenação
 - 7 aplicações do programa TRANSYT em S. Paulo
 - 8 apêndice
-

Nas duas últimas décadas, a rápida expansão da indústria automobilística tem causado um profundo impacto em nossa sociedade. Os efeitos do constante crescimento da frota de veículos motorizados não mais se restringem apenas ao setor de transporte viário, mas atingem praticamente todas as atividades da vida nacional.

Paralelamente, os grandes centros urbanos foram profundamente alterados em suas estruturas físicas e sociais para se adaptar às necessidades determinadas pelos novos padrões de comportamento de tráfego e deslocamentos de pessoas e mercadorias.

O aumento na demanda de viagens trouxe como consequência direta uma utilização cada vez mais intensa do sistema viário. Atualmente, apesar de toda a infra-estrutura existente, a capacidade oferecida pelas ruas e avenidas encontra-se bastante próxima de seu nível máximo de saturação (em termos de volume de veículos), ocorrendo freqüentes congestionamentos principalmente nas proximidades da área central.

Os congestionamentos de tráfego em áreas urbanas representam um elevado ônus para a comunidade, tanto em termos econômicos como sociais. Os acréscimos desnecessários no tempo de percurso,

a redução da velocidade média e o aumento do número de paradas contribuem de forma significativa para elevar o consumo de combustível e desconforto nas viagens, irritando motoristas e passageiros, além de causar um precoce desgaste mecânico dos veículos. Socialmente, as filas de veículos, além de serem uma intrusão visual, comprometem a qualidade do ar com a emissão de partículas poluentes e aumentam o nível de ruído com as sucessivas paradas. Todos esses fatores atuam de forma direta para deteriorização do meio ambiente, resultando na degradação física da região.

Na abordagem dos problemas de tráfego, deve-se considerar que a habilidade de movimentação de pessoas e mercadorias é parte vital na estrutura de nossa sociedade e a ela confere muitas vantagens. Com o intuito de manter o nível de mobilidade adequado às atividades sócio-econômicas das cidades, procura-se atingir meios para se balancear os benefícios e penalidades inerentes ao atendimento da demanda de viagens.

Devido às presentes contingências econômico-financeiras dos municípios e do país, o comprometimento na alocação de recursos para atendimento das diversas solicitações faz com que os investimentos no setor de transporte sejam orientados no sentido de desenvolver medidas que resultem no máximo aproveitamento possível das disponibilidades já existentes, reduzindo ao mínimo indispensável os investimentos em novas obras para ampliação do atual sistema viário.

As estimativas do custo dos atrasos nas interseções sinalizadas em São Paulo atingem a ordem de 2,4 bilhões de cruzeiros por ano (vide Apêndice 1).

Conseqüentemente, quaisquer medidas que efetivamente proporcionem uma redução no tempo de viagem e/ou atraso nos semáforos trarão um benefício imediato de vários milhões de cruzeiros, além de contribuir de forma positiva para a economia de combustível. Apenas como exemplo ilustrativo, o desenvolvimento do projeto SEMCO (Semáforos Controlados por Computador) resultará, segundo dados conservadores, numa redução de 10% do atraso nas vias, o que significa uma economia de aproximadamente 240 milhões de cruzeiros anuais.

Nesse sentido, a CET estabeleceu como um dos pontos básicos de seu programa de atividades: a implantação e utilização de novas técnicas de Engenharia de Tráfego, desenvolvidas, testadas e recomendadas por centros internacionais de estudos de tráfego.

Assim, dentro do contexto de busca de novas metodologias, a CET constituiu uma equipe de técnicos com o objetivo de estudar e familiarizar-se com os mais recentes métodos de controle de tráfego desenvolvidos pelo TRRL (Transport and Road Research Laboratory — Órgão de pesquisa do Ministério de Transportes da Inglaterra), pois este campo tem apresentado inúmeras vantagens em sua aplicação, tais como:

- a. aumento da capacidade das ruas e avenidas sinalizadas;
- b. redução dos tempos de viagem para um dado nível de carregamento da rede viária, aumentando a acessibilidade da região;
- c. possibilidade de prioridade de tráfego para transportes coletivos, veículos especiais, pedestres etc; e
- d. prover restrições seletivas de circulação de veículos.

Além disso, a instalação dos equipamentos de controle não acarretam perturbações nas condições de tráfego, os custos de implantação e manutenção são relativamente baixos e a taxa de retorno do capital aplicado elevada.

Um dos importantes produtos resultantes dessa iniciativa foi o aprendizado e posterior implantação em São Paulo do Programa TRANSYT/6 — (Traffic Network Study Tool) para cálculo de programações ótimas dos semáforos. Este programa, desenvolvido pelo Professor D. I. Robertson, chefe da Divisão de Redes Urbanas do Laboratório de Pesquisas Rodoviárias da Inglaterra (TRRL) é considerado, presentemente, pelos especialistas mundiais no assunto como sendo a mais eficiente ferramenta computacional para o controle de tráfego em interseções sinalizadas.

Genericamente, o programa TRANSYT é um método para determinar planos de tráfego de tempo fixo, com o objetivo de minimizar o atraso e o número de paradas dos veículos que percorrem a rede viária. O programa simula o comportamento do fluxo veicular em trechos de vias e, através de uma função de otimização, define a defasagem e os tempos ótimos de verde para cada fase ou aproximação dos cruzamentos. O TRANSYT consiste essencialmente de dois elementos: um modelo comportamental do fluxo de tráfego e um modelo matemático de otimização.

Em São Paulo, a utilização do Programa TRANSYT/6 no desenvolvimento de um estudo de programação semaforica para a região da Av. Paulista (39 interseções sinalizadas), com o intuito principal de favorecer o transporte coletivo, resultou nos seguintes benefícios:

- a. a faixa de ônibus cujo fluxo é de 140 ônibus/hora de pico e 130 ônibus/hora fora de pico apresentou um incremento de 16,5% na velocidade média diária, em ambos os sentidos, além de uma redução de 44% no tempo total de espera nos semáforos;
- b. a velocidade média diária dos demais veículos na Av. Paulista aumentou em 26% e, nas vias secundárias, 30,6%;
- c. a duração dos picos da manhã e da tarde foi reduzida em 1 (uma) hora nos dois períodos;
- d. o benefício global nas três principais vias do sistema foi de aproximadamente 2,9 milhões de cruzeiros/mês, sendo que a estimativa de custo para implantação do projeto situa-se em torno de 500 mil cruzeiros; e
- e. economia anual de aproximadamente 1,6 milhões de litros de gasolina e 106 mil de óleo diesel.

Dentro desse quadro geral, este boletim tem como finalidade primeira discutir, à luz dos modernos conceitos de Engenharia de Tráfego, os benefícios decorrentes da aplicação de procedimentos racionais para controle de tráfego. Em particular, propõe-se informar e divulgar a experiência de utilização do programa TRANSYT para coordenação e sincronismo das principais interseções sinalizadas da cidade de São Paulo.

APLICAÇÃO EM CIDADES DE MÉDIO PORTE

Deve-se enfatizar que, apesar da CET contar com um adequado suporte computacional para aplicação do programa TRANSYT, há uma constante preocupação na fixação da tecnologia, através da adaptação dos modelos trazidos do exterior, aos recursos e condições locais. Nesse sentido, está sendo atualmente desenvolvido um método manual para ajuste e calibração de semáforos em sistemas de poucas interseções. Esta abordagem tem como finalidade principal prover os responsáveis pela coordenação de tráfego em cidades de médio porte de uma técnica simples, porém eficiente e rápida, para utilização na solução de seus problemas quotidianos. O método em estudo dispensa o uso de recursos computacionais, apesar de basear-se nos mesmos fundamentos teóricos do programa TRANSYT. Cabe aqui um agradecimento especial ao TRRL, por ter gentilmente cedido o programa TRANSYT à Municipalidade de São Paulo, representada pela Companhia de Engenharia de Tráfego. Especificamente, a CET sente-se em débito com o Professor Robertson por sua valiosa contribuição na explanação e discussão do programa.

2

sistema de controle de tráfico

Os sinais de tráfego são comumente definidos como mecanismos de controle para regular os fluxos de veículos e pedestres em interseções de duas ou mais vias. Além disso, em áreas urbanas com alto grau de ocupação viária, a maior parcela do atraso dos veículos é decorrente do tempo de espera nos cruzamentos sinalizados, o que torna bastante evidente a necessidade de se efetuar eficientemente esse controle, com o objetivo de aumentar as condições gerais de segurança e fluidez, bem como proporcionar maior conforto e conveniência aos motoristas e passageiros.

Nesse sentido, muito se tem pesquisado sobre o problema de controle ótimo dos semáforos e quais critérios devem ser utilizados para avaliação da performance na operação dos sistemas.

Sem dúvida, existe uma forte interação entre os parâmetros temporais dos planos de tráfego e a estrutura dinâmica dos fluxos de veículos. Conseqüentemente, o sucesso de uma determinada política de controle está diretamente relacionado ao grau de entendimento deste interação. A abordagem do assunto envolve a consideração de um conjunto de variáveis estáticas e dinâmicas as quais podem ser genericamente identificadas como:

1. Variáveis estáticas

- a. localização das origens e/ou destinos dos veículos;
- b. características físicas da rede viária; e
- c. características dos motoristas.

2. Variáveis dinâmicas

- a. variações na demanda de viagens em função do espaço e tempo;
- b. flutuações estocásticas do fluxo de tráfego;
- c. interações veículo-veículo e veículo-pedestre;
- d. variações das taxas de escoamento de fluxo; e
- e. operações de ônibus e caminhões.

A eficácia de uma solução ótima depende essencialmente do tratamento dado a essas variáveis. Teoricamente, pode-se situar o controle de tráfego como sendo um problema de otimização de sistemas, para o qual se define uma função objetivo e se busca, através de métodos específicos, obter um valor ótimo (máximo ou mínimo) dessa função.

A fim de avaliar o desempenho de um dado método, vários critérios de performance têm sido utilizados, dentre os quais se destacam:

1. atraso médio por veículo;
2. máximo atraso individual;
3. percentagem de veículos que sofrem paradas ao longo do seu percurso;
4. número médio de paradas na faixa de retenção de um cruzamento;
5. fluidez do sistema; e
6. máximo tempo médio de percurso.

O critério 1 é o mais utilizado, embora nem sempre seja compatível com o critério 2. Um bom procedimento é adotar o critério 1 como função objetivo principal enquanto o critério 2 atua como condição restritiva ao atraso individual. Tal combinação é feita não apenas por razões sociais como também por motivos de ordem técnica, pois

qualquer projeto que penalize demasiadamente poucos motoristas, provavelmente os induzirá a mudarem seus hábitos de circulação, comprometendo a concepção do projeto. Os critérios 3 e 4 são resultantes da aversão que os motoristas têm em parar, pois as paradas geram incômodo e aumentam o consumo de combustível e desgaste do veículo, além de contribuírem para a poluição do ar.

O critério 5 é particularmente útil nas horas de pico, onde se procura utilizar ao máximo a capacidade do sistema viário. Finalmente, o critério 6 está diretamente relacionado ao critério 1, sendo que em muitos casos o substitui. Algumas vezes, uma função objetivo não está explicitamente vinculada a qualquer um dos critérios citados. Por exemplo, a obtenção de "ondas-verdes" de sincronismo entre semáforos, visa maximizar a oportunidade de se percorrer uma via sem que se tenha que parar, o que indiretamente contribui para a redução do atraso e número de paradas.

3

necessidade de coordenação

A instalação de semáforos em interseções urbanas tem como propósito básico a racionalização da distribuição dos elementos de espaço e tempo, com o intuito de aumentar a capacidade e segurança no escoamento de veículos, além de fornecer uma indicação inequívoca de sinalização.

Inúmeras combinações desses dois elementos são possíveis, em virtude de diferentes configurações geométricas dos cruzamentos, comportamento não uniforme dos motoristas e distribuição aleatória dos tempos de chegadas dos fluxos.

Basicamente a operação dos semáforos pode ser feita de dois modos:

1. modo isolado: o controle das correntes de tráfego processa-se de maneira independente; e
2. modo coordenado: o controle do fluxo entre interseções adjacentes é feito de forma conjugada e dependente.

Surge então a questão fundamental sobre a conveniência dos semáforos atuarem em grupos ou isoladamente. A grosso modo, a forma de operação pode ser decidida através de simples observação local:

recomenda-se que os semáforos sejam coordenados sempre que se puder observar a chegada de pelotões de veículos provenientes da interseção precedente. Caso contrário, a coordenação é dispensável, principalmente se ocorrerem entradas e saídas de volumes irregulares de veículos no fluxo principal ao longo do trecho compreendido entre os dois semáforos.

4

**considerações sobre atraso de
veículos**



A passagem controlada de fluxos num cruzamento aumenta o tempo de travessia, causando atraso ao tráfego em suas aproximações.

Dado os diferentes tempos de chegada, cada veículo sofre um atraso individual cujo valor médio (atraso médio) é utilizado como uma das medidas de desempenho da interseção.

A Fig. 4.1 representa a chegada de veículos numa interseção sinalizada.

4.1. CRUZAMENTOS ISOLADOS

Em cruzamentos isolados, a magnitude do atraso é função somente da distribuição de chegada das correntes de tráfego. Para distribuições uniformes (espaçamento constante) o atraso médio é menor do que para as distribuições randômicas (Fig. 4.2). Nesse caso o atraso médio pode ser calculado pela equação (4.1):

$$d_v = \frac{c (1 - \lambda)^2}{2 (1 - \gamma)} \text{ onde:} \quad (4.1)$$

d_v = atraso médio por veículo (s)

c = tempo de ciclo (s)

λ = fração do tempo de verde ($\frac{g}{c}$)

onde, g = tempo de verde (s)

c = tempo de ciclo (s)

$y = \frac{q}{s} = \text{fluxo médio/fluxo de saturação (veic./h)}$

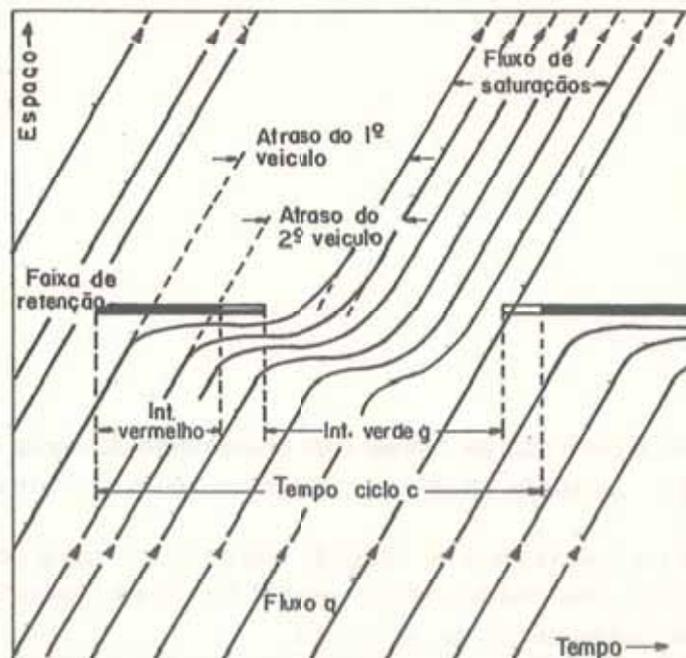


FIG. 4.1 — OCORRÊNCIA DE ATRASOS NUMA INTERSEÇÃO SINALIZADA PARA CHEGADAS ALEATÓRIAS DE VEÍCULOS.

F. V. Webster¹ concluiu que quando o processo de chegadas obedece à distribuição de Poisson, a equação do atraso médio é dada por:

$$\bar{d} = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2}\right) x^{(2+5\lambda)} \quad (4.2)$$

onde:

\bar{d} = atraso médio por veículo (seg)

x = grau de saturação = $\frac{q \cdot c}{s \cdot g}$

Nesta equação, o primeiro termo corresponde à equação (4.1) e representa o valor do atraso para chegadas uniformes. O segundo considera o fato da distribuição ser randômica e o terceiro é um fator de correção da ordem de 0-18%. Para efeitos práticos, são considerados somente os dois primeiros termos da equação (4.2). Para distribuições aleatórias mais genéricas, as equações do atraso médio caracterizam-se pela presença de um coeficiente que relaciona a razão entre a variância (σ) e a média (μ) da distribuição. Segundo A. J. Miller², a equação é dada por:

$$\bar{d} = \frac{c - g}{2c(1 - y)} \left(c - g + \frac{J - 1 + y}{s} \right) \text{ para } x \leq 0,5 \quad (4.3)$$

ou

$$\bar{d} = \frac{c - g}{2c(1 - y)} \left(\frac{2x - 1}{1 - x} J + c - g + \frac{J - 1 + y}{s} \right) \quad (4.4)$$

para $x > 0,5$

sendo:

$$J = \frac{\sum m^2 - 1/n (\sum m)^2}{\sum m} \cdot \frac{n}{n - 1}$$

onde:

x = grau de saturação

J = razão entre a variância e a média da distribuição

m = volume por unidade de tempo

n = número de intervalos de tempo

A Fig. 4.2 representa várias curvas de atraso em função das distribuições de chegada.

O valor de $J = 1$ corresponde a distribuições em que a variância é igual à média, como no caso da de Poisson. Para $J = 2$, ocorrerão maiores atrasos à medida em que o volume de tráfego for mais intenso.

4.2 CRUZAMENTOS COORDENADOS

O atraso total causado aos veículos em interseções controladas por semáforos coordenados pode ser decomposto em duas parcelas. A primeira delas refere-se à chegada aleatória de veículos não retidos no cruzamento anterior e neste caso o atraso é calculado de forma idêntica às distribuições randômicas em interseções isoladas, ou seja, são utilizadas as equações (4.1) a (4.4). A segunda parcela corresponde ao atraso causado aos veículos que após terem sido

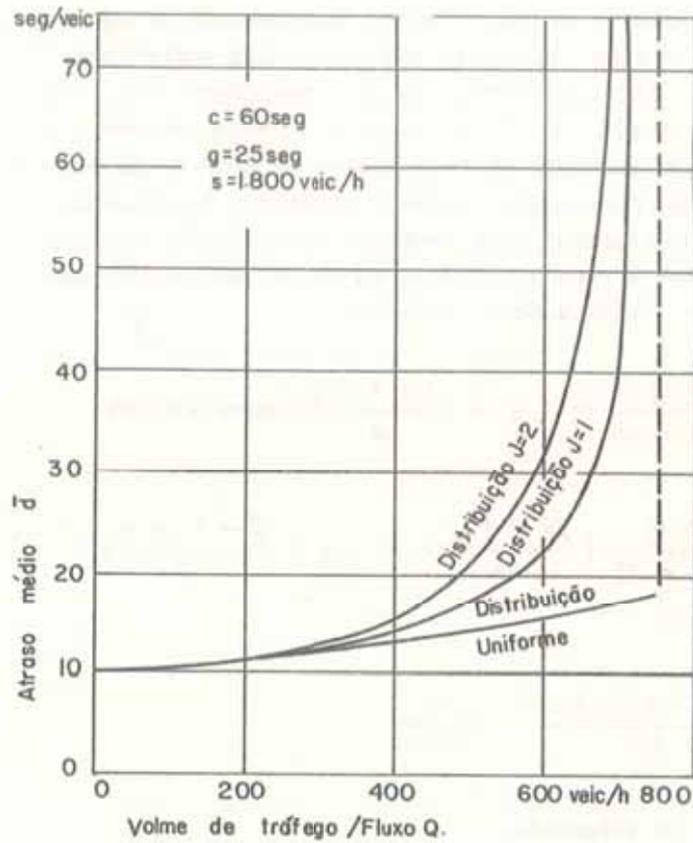


FIG. 4.2 — ATRASO MÉDIO POR VEÍCULO PARA VÁRIAS DISTRIBUIÇÕES DE CHEGADA.

retidos no período de vermelho das interseções adjacentes são liberados na taxa máxima de escoamento (fluxo de saturação), originando a formação de pelotões de veículos.

A medida que esses pelotões percorrem a via, o espaçamento médio entre seus veículos aumenta devido às diferentes velocidades individuais. Em alguns casos, a dispersão dos pelotões resulta numa distribuição aleatória de chegada no cruzamento.

Volumes mais leves de tráfego, como por exemplo nos movimentos de conversão, chegam à interseção com praticamente a mesma distribuição de escoamento (saída) verificada no semáforo precedente. Os pelotões e os movimentos de conversão formam conjuntamente uma nova corrente de tráfego, a qual sofrerá um atraso ao atravessar o cruzamento sinalizado.

Para maior clareza, analisar-se-á o atraso causado aos pelotões em função do tempo de chegada no cruzamento do primeiro veículo do grupo (líder do pelotão).

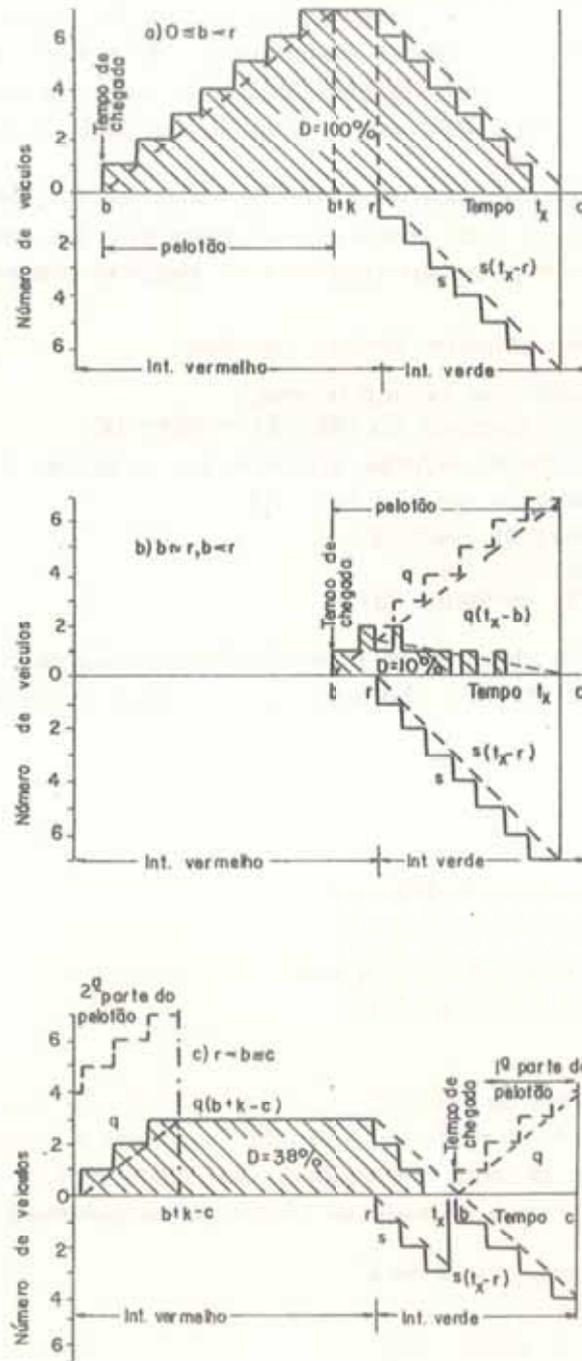


FIG. 4.3 — ATRASO DE UM PELOTÃO DE VEÍCULOS PARA DIFERENTES INSTANTES DE CHEGADA DE SEU LÍDER, SEM CONSIDERAR OS MOVIMENTOS DE CONVERSÃO.

Preliminarmente, não serão considerados os movimentos de conversão e, a distribuição de volume ao longo do pelotão será admitida como uma constante. A dispersão dos veículos é determinada pelo comprimento do pelotão e o número de veículos por unidade de tempo. Uma condição básica assumida é a de que os veículos que chegam durante um ciclo são atendidos no primeiro período de verde, ou seja, não ocorre acúmulo de filas de um ciclo para outro.

A Fig. 4.3 ilustra três possíveis configurações de chegada de pelotão no cruzamento. A área sombreada corresponde, em cada caso, ao atraso no ciclo e pode ser calculada da seguinte maneira:

D = atraso dos veículos durante um ciclo;

\bar{d} = atraso médio por veículo (s/veíc.);

b_k = instante de chegada do líder do pelotão (s);

k = comprimento do pelotão, expresso em unidades de tempo (s);

q_k = fluxo médio do pelotão (veíc./s);

s = fluxo saturação (veíc./s);

c = tempo de ciclo (s); e

r = período de vermelho (s).

(a) Instante de chegada do líder do pelotão durante o período de vermelho, só ocorrendo chegadas durante esse intervalo, ou seja:

$$0 \leq b_k < r$$

$$b_k + k < r$$

Neste caso, o atraso é dado por:

$$D = \int_{b_k}^{b_k+k} q_k (t - b_k) dt + \int_{b_k+k}^{t_x} q_k k dt - \int_r^{t_x} s (t - r) dt \quad (4.5)$$

O primeiro termo da equação (4.5) representa a parcela de atraso devido à chegada de veículos, o segundo refere-se ao tempo de espera na fila e o terceiro corresponde ao escoamento dos veículos. O intervalo $(t_x - r)$ é a duração do tempo de escoamento.

A solução da equação (4.5) é:

$$D = \frac{1}{2} q_k k^2 + q_k k (t_x - b_k - k) - \frac{1}{2} s (t_x - r)^2 \quad (4.6)$$

De acordo com a condição básica, tem-se:

$$s (t_x - r) = q_k \cdot k$$

Logo:

$$D = q_k k \left[r - b_k - \frac{1}{2} k \left(1 - \frac{q_k}{s} \right) \right] \quad (4.7)$$

Conseqüentemente, o atraso médio por veículo é:

$$\bar{d} = r - b_k - \frac{1}{2} k \left(1 - \frac{q_k}{s} \right) \quad (4.8)$$

(b) Instante de chegada do líder do pelotão durante o período de vermelho, sendo que as chegadas se prolongam pelo período de verde (escoamento de veículos), ou seja:

$$0 \leq b_k < r$$

$$r < b_k + k < c$$

$$D = \int_{b_k}^{t_x} q_k (t - b_k) dt - \int_r^{t_x} s (t - r) dt \quad (4.9)$$

O atraso total é:

$$D = \frac{1}{2} q_k (t_x - b_k)^2 - \frac{1}{2} s (t_x - r)^2 \quad (4.10)$$

Pela condição básica:

$$s (t_x - r) = q_k (t_x - b_k)$$

Logo:

$$D = \frac{1}{2} q_k \frac{(r - b_k)^2}{\left(1 - \frac{q_k}{s} \right)} \quad (4.11)$$

Conseqüentemente o atraso médio por veículo é:

$$\bar{d} = \frac{1}{2k} \frac{(r - b_k)^2}{\left(1 - \frac{q_k}{s} \right)} \quad (4.12)$$

(c) Instante de chegada do líder do pelotão durante o período de verde, sendo que ocorrem chegadas durante os períodos de verde e vermelho, ou seja:

$$\begin{aligned} r &< b_k < c \\ b_k + k &> c \end{aligned}$$

Neste caso, o cálculo do atraso é feito em duas etapas. A primeira delas, D_1 , refere-se às chegadas ocorridas durante o período de verde, enquanto que a segunda, D_2 corresponde às chegadas restantes (intervalo de vermelho).

Utilizando-se a equação (4.12), D_1 é dado por:

$$D_1 = \frac{1}{2} q_k \frac{(r' - b_k)^2}{q_k \left(1 - \frac{q_k}{s}\right)} \quad (4.13)$$

onde:

$$r' = r + (b_k + k - c) \frac{q_k}{s}$$

Assim:

$$D_1 = \frac{1}{2} q_k \frac{\left[r + (b_k + k - c) \frac{q_k}{s} - b_k\right]^2}{q_k \left(1 - \frac{q_k}{s}\right)} \quad (4.14)$$

O atraso D_2 pode ser calculado pela equação (4.7) considerando o comprimento do pelotão igual a $b_k + k - c$ e o tempo de chegada do líder do pelotão $b_k = 0$. Logo:

$$D_2 = q_k (b_k + k - c) \left[r - \frac{1}{2} (b_k + k - c) \left(1 - \frac{q_k}{s}\right)\right] \quad (4.15)$$

O atraso total é dado por:

$$D = D_1 + D_2$$

Conseqüentemente, o atraso médio por veículo é:

$$\bar{d} = \frac{D_1 + D_2}{q_k k} \quad (4.16)$$

Combinando-se as equações deduzidas para os casos (a), (b) e (c), pode-se calcular o atraso médio dos veículos para qualquer distribuição de chegada de pelotões com diferentes características.

Pelo exposto acima, seguem-se as seguintes considerações:

1. a pior condição de chegada do pelotão é aproximadamente no início do período de vermelho;
2. os menores atrasos ocorrem quando o pelotão chega um pouco antes do início do intervalo de verde; e
3. quando o pelotão chega durante o período de verde, ocorre uma divisão, ou seja, parte dele é escoado sem sofrer atraso enquanto a parcela restante tem de esperar durante todo o intervalo de vermelho.

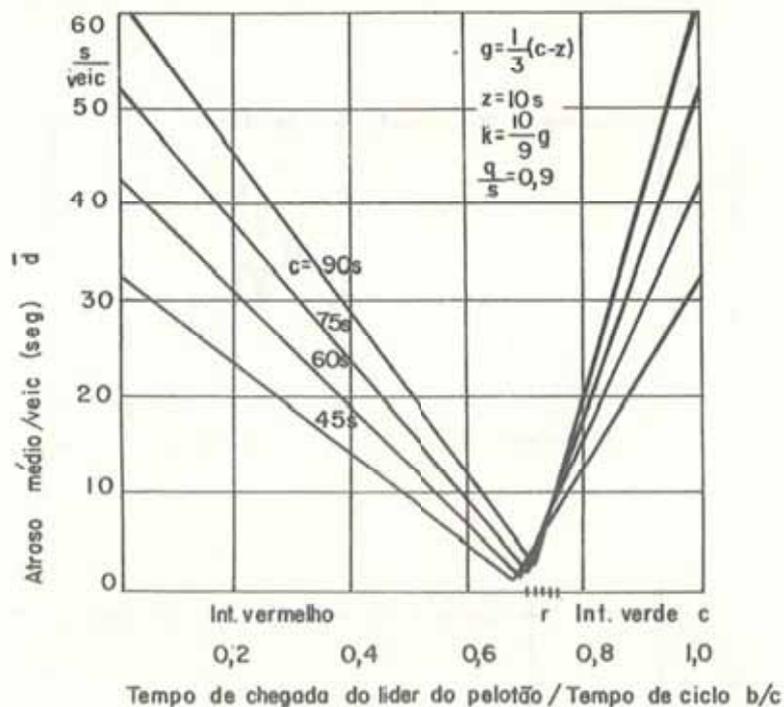


FIG. 4.4 — VARIÇÃO DO ATRASO DE UM PELOTÃO DE VEÍCULOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA DE SEU LÍDER, PARA DIFERENTES TEMPOS DE CICLO E PROPORÇÃO DE VERDE CONSTANTE. NÃO SÃO CONSIDERADOS OS MOVIMENTOS DE CONVERSÃO.

De maneira geral, o atraso médio varia em função do tempo de distribuição de chegada do pelotão no cruzamento, desde que as demais condições permaneçam constantes (Fig. 4.4).

Além disso, verifica-se que para tempos de ciclo mais longos o atraso médio é maior.

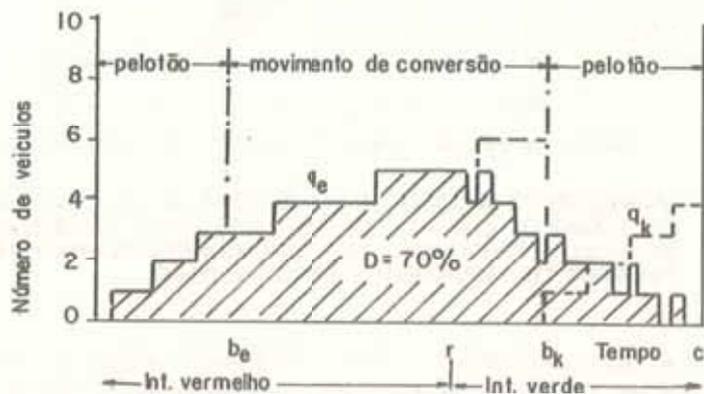
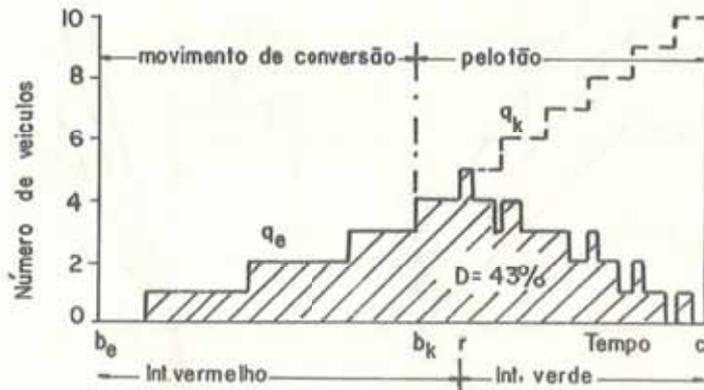
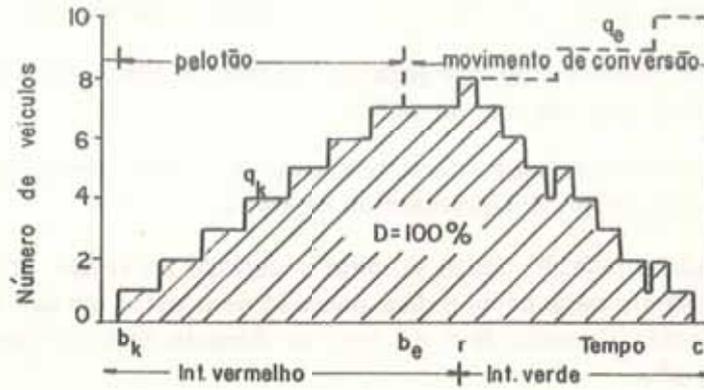


FIG. 4.5 — ATRASO / CICLO DE UM PELOTÃO, INCLUINDO MOVIMENTO DE CONVERSÃO, PARA DIFERENTES TEMPOS DE CHEGADA DE LÍDER DO PELOTÃO.

A análise acima desenvolvida considerou apenas o atraso causado ao tráfego de pelotão de veículos. No entanto, no caso de existir movimentos de conversão, estes deverão ser computados no cálculo do atraso total (Fig. 4.5).

O atraso parcial relativo a cada uma das correntes de tráfego é calculado separadamente, porém de forma análoga, isto é, são utilizadas as equações (4.5) a (4.16) com os intervalos de vermelho devidamente ajustados. Por exemplo, para o primeiro caso da Fig. 4.6, o atraso é calculado pelas equações (4.6) e (4.10), a saber:

$$D = q_k \cdot k \left[r - b_k - \frac{1}{2} k \left(1 - \frac{q_k}{s} \right) \right] + \frac{1}{2} q_e \frac{\left(r - k \frac{q_k}{s} - b_e \right)^2}{q_e \left(1 - \frac{q_e}{s} \right)} \quad (4.17)$$

ou ainda:

$$\bar{d} = \frac{D}{q_k k + q_e e} \quad (4.18)$$

onde:

k = comprimento do pelotão, expresso em unidades de tempo;

e = comprimento do movimento de conversão, expresso em unidades de tempo;

q_k = volume médio do fluxo de pelotão;

q_e = volume médio do movimento de conversão;

b_k = instante de chegada do líder do pelotão; e

b_e = instante de chegada do líder do movimento de conversão.

Para se obter a curva de atraso para o ciclo completo, devem-se formular várias equações para composição dos tempos de chegada do pelotão e movimento de conversão. Como exemplo, a Fig. 4.6 mostra o atraso médio para várias porcentagens de volume de conversão, calculado para a condição de que a chegada dos veículos desse movimento ocorre somente no intervalo de ciclo não utilizado pelo pelotão.

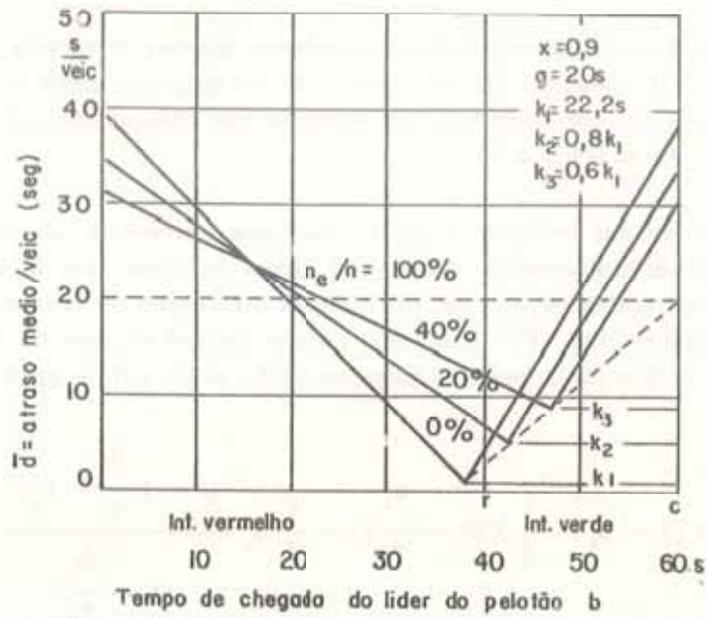


FIG. 4.6 — ATRASO MEDIO PARA PELOTÕES COM DIFERENTES COMPRIMENTOS, EM FUNÇÃO DO INSTANTE DE CHEGADA DO LÍDER DO PELOTÃO E DIFERENTES VALORES DE MOVIMENTOS DE CONVERSÃO.

5

**considerações sobre número de
paradas**

Além do atraso, a relação entre o número de veículos que são forçados a parar ou desacelerar ao se aproximarem da interseção e o número total de veículos que atravessam o cruzamento, denominada número relativo de paradas, é de grande utilidade para avaliação da performance de operação dos semáforos coordenados.

Se a distribuição de chegada do pelotão ocorrer entre os instantes de início e fim do intervalo de vermelho, o número relativo de paradas é determinado de maneira similar ao item (b) do cálculo do atraso de pelotão sem movimento de conversão, ou seja:

$$w = \frac{(t_x - r) s}{k \cdot q_k} \quad 0 \leq b_k < r \quad (5.1)$$

Dado que:

$$t_x = \frac{s r - q_k b_k}{s - q_k}$$

tem-se:

$$w = \frac{1 (r - b_k)}{k (1 - \frac{qk}{s})} \quad (5.2)$$

Quando o líder do pelotão chega no começo ou durante o intervalo de verde, o número relativo de paradas, não se considerando o movimento de conversão, é dado por:

$$w = \frac{(b_k + k - c) q_k}{k q_k} \quad r \cong b_k \cong c$$

ou

$$w = \frac{1}{k} (b_k + k - c). \quad (5.3)$$

As equações (5.1) a (5.3) são ainda válidas quando se consideram os movimentos de conversão; porém, é necessário que se ajuste convenientemente o parâmetro r .

O novo valor é definido pelo intervalo de vermelho e o tempo necessário para escoamento do fluxo de conversão na taxa de saturação. Se, o intervalo de verde for suficiente apenas para escoar, na taxa de saturação, o tráfego de pelotão e conversão (verde mínimo), nenhum veículo atravessará livremente o cruzamento, e o número relativo de paradas será sempre 1 (valor máximo possível).

Para intervalos maiores que o verde mínimo, esse valor decrescerá à medida que o término da chegada do pelotão coincidir com o fim do período de verde. No caso limite, quando o comprimento do pelotão (em tempo) for menor ou igual ao tempo de verde e o instante de chegada do líder ocorrer no início dessa fase, o número relativo de paradas será zero. A Fig. 5.1 representa a variação do número relativo de paradas em função do tempo de chegada do líder do pelotão e a duração do intervalo de verde.

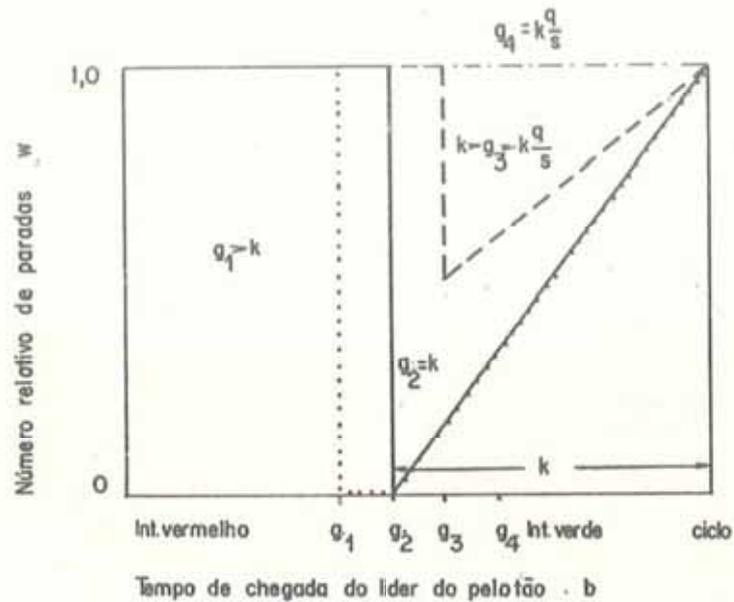


FIG. 5.1 — GRÁFICO DO NÚMERO RELATIVO DE PARADAS EM FUNÇÃO DO INSTANTE DE CHEGADA DO LÍDER DO PELOTÃO, PARA CHEGADAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS E DIFERENTES INTERVALOS DE VERDE, SEM CONSIDERAR OS MOVIMENTOS DE CONVERSÃO.

Em se considerando fluxo de conversão, o tempo de verde disponível ao pelotão será definido pela fase de verde reduzida de um período igual ao tempo necessário para escoamento, na taxa de saturação, desse movimento.

6

**esquemas de sincronismo e
coordenação**

Muitos exemplos de aplicação da teoria de otimização de sistemas já foram propostos para efetuar o controle de tráfego. Porém, a maioria deles não pode ser utilizada na prática. Segundo Schlaefli³, quase 90% dos engenheiros de tráfego responsáveis pela operação dos sistemas viários nos grandes centros urbanos se utilizam de técnicas manuais elementares para determinação dos parâmetros de tráfego (ciclo, tempos de fase e defasagem).

Atualmente, o desenvolvimento de novas políticas de controle além de refletir as recentes evoluções conceituais no campo da Engenharia de Tráfego deve, necessariamente, representar soluções cuja implementação prática seja exeqüível. Nesse sentido, as propostas baseadas em técnicas de simulação, devidamente amparadas por métodos analíticos tradicionais e pesquisas de campo, têm apresentado resultados considerados bastante satisfatórios.

Além disso, a crescente disponibilidade de computadores permite que programas computacionais do tipo TRANSYT, SIGOP, COMBINATION etc, possam ser utilizados com uma freqüência cada vez maior no cálculo dos tempos e defasagens adequados para coordenação e sincronismo dos semáforos.

6.1 SISTEMAS TRADICIONAIS

A tendência inicial do tráfego foi concentrar-se em determinadas vias, as quais normalmente serviam de ligação entre o centro comercial e os diversos bairros da cidade. Assim, os primeiros esquemas de controle, denominados sistemas arteriais, foram desenvolvidos com o objetivo de coordenar os semáforos de maneira a favorecer o fluxo de veículos nesses corredores (artérias).

Dentre os diversos métodos propostos, destacam-se três tipos:

- a. Sistema Simultâneo — todos os sinais ao longo da via apresentam o mesmo aspecto para o tráfego, ou seja, eles abrem e fecham simultaneamente. Uma desvantagem desse sistema é que os motoristas tendem a aumentar a velocidade a valores excessivos, pois, como vêm todos os semáforos verdes, tentam atravessar o maior número possível deles até a chegada do vermelho. Quando o movimento de conversões for leve e a distância entre as interseções pequena, este sistema poderá apresentar vantagens na travessia de pedestres;
- b. Sistema Alternado — os semáforos adjacentes mostram sempre indicações contrárias. Isto significa que, se o veículo percorrer a distância entre duas interseções na metade do tempo de ciclo, ele não terá necessidade de parar ao longo do seu trajeto. A utilização desse método em vias que não têm distâncias constantes entre seus semáforos poderá trazer algumas inconveniências;
- c. Sistema Progressivo — os tempos de verde entre interseções adjacentes são ajustados de maneira a se obter uma progressão ao longo da via, numa determinada velocidade. Em vias de mão dupla a progressão em ambos os sentidos é desejável e isso geralmente resulta num compromisso entre os fluxos das duas direções e o fluxo das interseções secundárias (vias transversais). Sob condições de tráfego baixas o sistema progressivo provavelmente acarretará maiores atrasos do que os produzidos por sistemas não coordenados, porque ele determinará uma regra de prioridade para a via principal, em detrimento da via secundária. Em vias de mão dupla, este sistema apresenta aspectos positivos quando existe a ocorrência de tráfego direcional, ou seja, quando por um determinado período o volume veicular num certo sentido de movimento é predominante.

A eficiência de qualquer um desses sistemas de controle depende das distâncias entre as interseções, da velocidade do tráfego, do

tempo de ciclo (constante para todos os semáforos), da capacidade da via e da quantidade de atrito (impedância) gerada por fatores tais como movimentos de conversão, estacionamento, carga/descarga e travessia de pedestres.

Sob certas condições, os sistemas simultâneo e alternado se mostraram deficientes e inseguros, sendo gradativamente substituídos pela sinalização progressiva.

A obtenção de sistemas progressivos, comumente denominados "ondas verdes", é feita através do ajuste adequado dos instantes de início do período de verde nas interseções sinalizadas da via principal (corredor). Para tanto, os engenheiros de tráfego normalmente se utilizam de técnicas manuais tais como nomogramas, representações gráficas e método do tipo tentativa e erro. Dentre estes procedimentos, o mais comum e, provavelmente, o mais prático é a construção dos diagramas de espaço x tempo.

O diagrama espaço x tempo é um gráfico onde o tempo t , por conseguinte, os intervalos de duração das fases dos movimentos é plotado na vertical, e as distâncias entre os cruzamentos na horizontal. A inclinação de qualquer reta deste diagrama representa a velocidade de progressão que os veículos deverão imprimir ao longo do percurso da via principal (Fig. 6.1).

Para a preparação do diagrama é necessário que se calcule inicialmente o ciclo ótimo e tempos de fase para a interseção crítica do sistema, utilizando-se qualquer uma das técnicas existentes⁴.

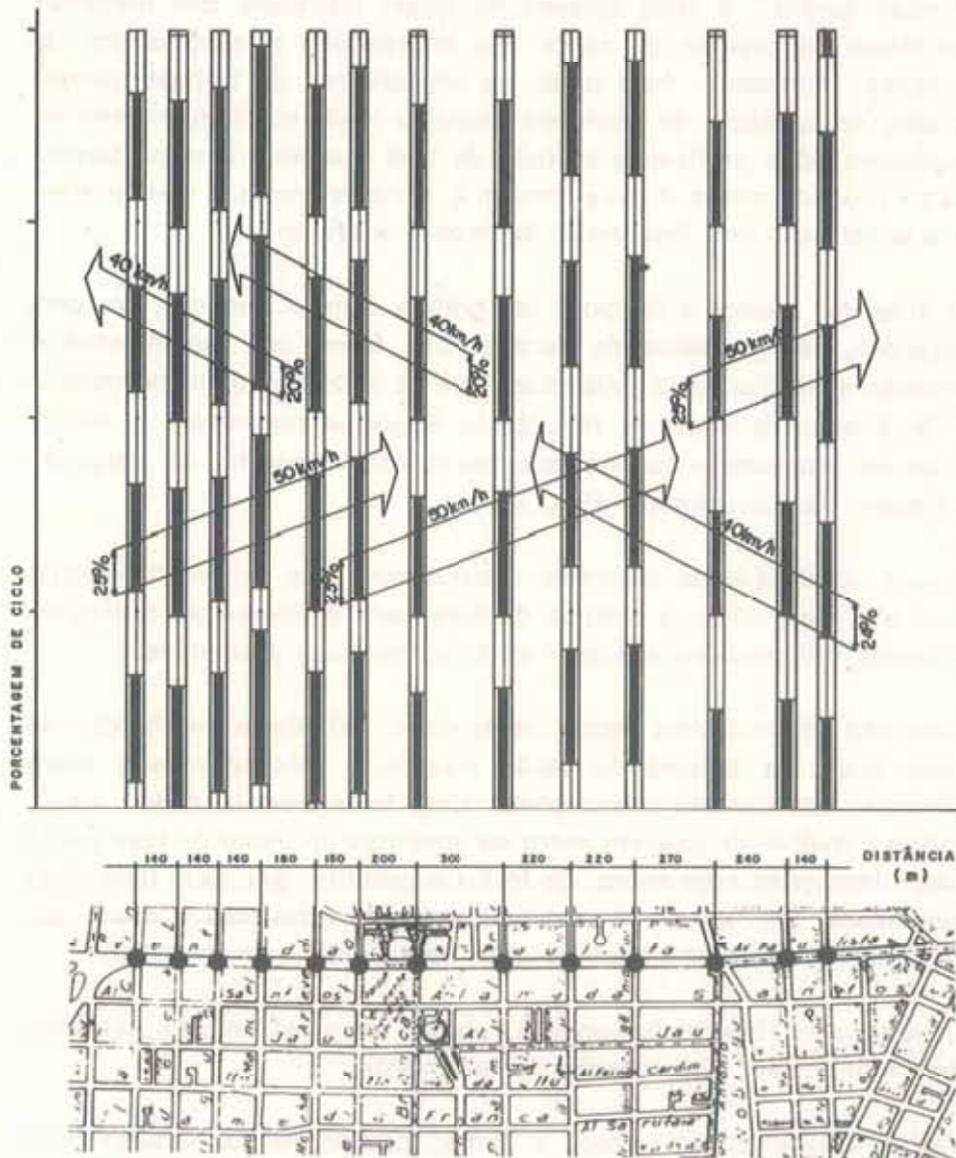
Uma vez determinados esses parâmetros, calcula-se em função do ciclo ótimo os tempos de verde máximo e mínimo para o fluxo principal das demais interseções. Com base nesses dados, escolhe-se a melhor defasagem entre os instantes de início da fase verde das interseções adjacentes, de forma a permitir que, para uma dada velocidade, um número máximo de veículos atravesse o maior número possível de cruzamentos sem ficar retido nos mesmos.

Denomina-se largura de banda a relação temporal entre a extensão da "onda verde" e a duração da fase verde.

Vários diagramas de espaço x tempo podem ser elaborados para um mesmo sistema, de acordo com a flutuação horária do volume de tráfego ao longo do dia.

FIGURA-6.1

DIAGRAMA ESPAÇO - TEMPO
LOCAL - AV. PAULISTA
PERIODO - 6:30-17:00 e 20:00-23:00
CICLO - 110 seg



6.2 SISTEMAS COMPUTACIONAIS

Com a crescente disponibilidade das facilidades computacionais, foram criados vários modelos para cálculo da sinalização progressiva em sistemas arteriais. Por exemplo, Brooks e Chamberlain⁵ desenvolveram um programa para construção de diagramas bidirecionais de espaço e tempo, tomando como origem a interseção de largura de banda mínima e, para uma dada velocidade, as defasagens são escolhidas de forma a minimizar as interferências na banda escolhida. Yardeni⁶ formulou um modelo que, teoricamente, maximiza o número de veículos que atravessa o cruzamento durante o intervalo da banda verde. Entretanto, os resultados da implementação prática desses modelos são quase os mesmos que os obtidos pelos métodos convencionais.

Little e Morgan⁷ desenvolveram um método para estabelecer as defasagens ótimas entre os semáforos, de forma a maximizar a largura da banda de progressão ("onda verde") de um sistema arterial. O método baseia-se num eficiente algoritmo matemático, o qual procura determinar uma largura de banda tal que os pelotões de veículos que percorrem a via em ambos os sentidos se ajustem o melhor possível, em suas bandas de progressão. Contudo, o modelo de maximização otimiza apenas a largura e progressão da banda ("onda verde"), o que representa tão somente um fator geométrico do diagrama espaço x tempo, não existindo qualquer obrigatoriedade de relacionamento com alguma característica real do tráfego. Assim, o modelo não necessariamente minimiza uma função objetivo (tempo de percurso, atraso, número de paradas etc.) e, conseqüentemente, sua eficiência depende apenas das condições de fluxo existentes no sistema e do comportamento dos pelotões no intervalo da largura de banda. Este método resulta numa eficiente operação quando:

- a. a dispersão do pelotão de veículos é baixa e o espaçamento entre as interseções é pequeno; e
- b. o volume de tráfego é leve e a largura de banda permite a dispersão de veículos.

Por outro lado, se a largura de banda for apenas suficiente para acomodar o pelotão no início da progressão, as interrupções ao longo do percurso, juntamente com a dispersão, farão com que os veículos do fim do pelotão fiquem retidos nas interseções críticas, causando o truncamento da progressão veicular.

Apesar de algumas inconsistências, o método de Little e Morgan tem produzido resultados bastante satisfatórios na operação de se-

máforos em sistemas arteriais, desde que se tomem pequenos cuidados em sua aplicação, tais como o grau de confiabilidade dos parâmetros de entrada para o modelo. Nas pesquisas feitas por Wagner⁴, este método mostrou ser um dos mais eficazes dentre os vários procedimentos testados para aumento do rendimento de operação de um sistema arterial.

Todos os métodos de sincronismo do tipo "onda verde" apresentam uma deficiência básica, pois assumem que as ruas estarão desimpedidas para a progressão do tráfego, o que na realidade nem sempre é verdade devido à ocorrência de filas nos cruzamentos. Dessa forma, é de fundamental importância que, no cálculo das defasagens entre os semáforos, seja levado em conta os efeitos que a formação de filas possa acarretar. Isto tem sido realizado, direta ou indiretamente, nos mais recentes esquemas de sincronismo, os quais efetivamente simulam o movimento de veículos na rede viária, avaliam uma função objetivo e através de um algoritmo matemático determinam o melhor conjunto de defasagens para uma dada situação de tráfego.

6.3 SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM ÁREA

Com o aumento da demanda de viagens, os principais corredores de tráfego vieram a sofrer maior solicitação, tornando-se cada vez mais carregados e congestionados. Em decorrência, os motoristas passaram a procurar novos caminhos alternativos para seus destinos, utilizando-se de vias secundárias e residenciais.

Conseqüentemente, os semáforos que até então eram instalados quase que exclusivamente nas interseções das grandes avenidas (sistemas arteriais), passaram a ser necessários em vários cruzamentos da malha viária urbana. Assim, gradativamente, os sistemas arteriais típicos foram se descaracterizando, surgindo em seu lugar uma extensa rede de semáforos, dando origem ao controle de tráfego em área ou região.

A principal variável de um esquema de controle é a defasagem e, no caso de uma rede de semáforos, ela deve ser determinada em função da interdependência entre os cruzamentos. Para uma rede complexa, o número de variáveis endógenas do sistema é muito maior que o número de variáveis independentes e a solução das equações de vínculos entre os semáforos por meio de técnicas manuais é bastante longa e enfadonha, tornando-se quase sempre inviáveis na prática. Por exemplo, numa rede quadrada de $(n \times n)$ links sinalizados tem-se n^2 semáforos e portanto $(n^2 - 1)$ defasagens devem ser determinadas em função dos atrasos que ocorrem nos links. Dependendo da mão

de direção das vias, o número de cálculos necessários varia entre $2n^2$ a $4n^2$. Por outro lado, a obtenção de "ondas verdes" para n corredores (sistemas arteriais) exige de (n^2-1) a $2(n^2-1)$ cálculos de atraso e, conseqüentemente, os esquemas de rede têm de 2 a 4 vezes mais variáveis a serem otimizadas.

Inicialmente, os planos de tráfego para controle de uma rede de cruzamentos sinalizados foram desenvolvidos de forma convencional, ou seja, eram elaborados esquemas de progressão ("ondas verdes") para as principais vias do sistema e as demais interseções tinham seus tempos ajustados em conformidade com esses esquemas pre-estabelecidos. Porém este tipo de abordagem simplesmente reduzia o problema de controle em área em vários sistemas arteriais (corredores) interligados entre si pelas vias transversais da região. Com a disponibilidade das facilidades computacionais, foram propostos novos processos de solução que resultaram no desenvolvimento de vários modelos baseados em algoritmos matemáticos e técnicas de otimização. Basicamente, as várias técnicas para coordenação e sincronismo de semáforos numa área de tráfego dividem-se em três categorias:

- a. sistemas que utilizam planos de tempo fixo, baseados em dados históricos do comportamento do tráfego na região. Esses planos são calculados previamente através de programas computacionais tais como TRANSYT, COMBINATION e SIGOP. Nestes sistemas, a detecção de veículos não atua sobre os tempos das fases nas interseções;
- b. sistemas em que cada interseção da rede é atuada localmente por um controlador que efetua as mudanças de fase em função da detecção de veículos. Contudo, a flexibilidade de atuação está vinculada a um plano básico de coordenação calculado previamente, como descrito no item a; e
- c. sistemas totalmente atuados, nos quais os períodos de verde de cada fase do cruzamento são continuamente calculados em função da detecção de veículos e com base numa política de controle definida. Tais sistemas denominam-se **on-line** ou tempo real.

Com o propósito de avaliar os benefícios decorrentes das várias técnicas propostas para Controle de Tráfego em Área, o TRRL da Inglaterra (Transport and Road Research Laboratory) desenvolveu um amplo e detalhado programa de testes comparativos nas cidades de Glasgow e Londres. De maneira geral, os resultados obtidos mostraram que os sistemas que empregam planos de tempo fixo baseados em dados históricos (item a), obtiveram um desempenho no

mínimo tão bom quanto as técnicas de controle atuado avaliadas, com a vantagem de que para a instalação desses sistemas os custos são bem menores⁸. O critério utilizado para julgamento da performance dos programas foi o tempo total de viagem gasto pelos veículos na rede. Além disso, dentre os programas de tempo fixo, o que apresentou melhor rendimento foi o TRANSYT com opção de ciclo duplo, no qual as interseções menos saturadas têm a metade do tempo de ciclo das demais. A Tabela 6.3.1 resume os resultados da comparação entre os programas TRANSYT e SIGOP.

Tabela 6.3.1 — COMPARAÇÃO TRANSYT-SIGOP

	PROGRAMA	P E R Í O D O		
		PICO MANHÃ	PICO TARDE	FORA DE PICO
Aumento percentual no tempo médio de viagem, em relação ao obtido para o TRANSYT de ciclo duplo	SIGOP	0	4	5
	TRANSYT ciclo simples	0	5	4*
Idem em relação ao TRANSYT com ciclo simples	SIGOP	0	0	0

* Não significativo ao nível de 5% Fonte: RRL Report LR 430
P. D. Whiting

A Tabela 6.3.2 resume os resultados das comparações dos programas, tendo como base o método COMBINATION.

Tabela 6.3.2 — DADOS COMPARATIVOS

	PROGRAMA	P E R Í O D O		
		PICO MANHÃ	PICO TARDE	FORA DE PICO
Aumento percentual no tempo médio de viagem, em relação ao obtido para o método COMBINATION	Sinalização progressiva ("onda verde")	12	18	9
	TRANSYT com ciclo duplo	-5	-5	-3*
	FLEXIPROG	0	0	0
	EQUISAT	0	0	0
	PLIDENT	18	50	16

* Não significativo ao nível de 5% Fonte: RRL Report LR 430
P. D. Whiting

Pelas Tabelas 6.3.1 e 6.3.2 constata-se que os métodos SIGOP e COMBINATION resultaram em tempos médios de viagem cerca de 4 a 5% mais longos que os obtidos pelo TRANSYT com ciclo duplo. Dessa forma é plausível supor-se que ambos os programas sejam equivalentes em performance.

A Tabela 6.3.3 fornece uma breve descrição dos sistemas testados, enquanto a Tabela 6.3.4 resume os principais resultados obtidos pelo TRRL.

Em síntese, as principais conclusões do estudo foram:

1. sistemas de planos de tempo fixo (TRANSYT, COMBINATION E SIGOP) são atualmente tão eficientes quanto os demais sistemas testados;
2. os métodos SIGOP e TRANSYT são os mais adequados para cálculo de planos de tempo fixo;
3. o programa TRANSYT com ciclo duplo produziu os melhores tempos médios de viagens atuais;
4. os sistemas de atuação de tráfego não se mostraram suficientemente eficientes para serem utilizados; e
5. devem-se continuar as pesquisas para o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de controle atuado.

6.4 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA TRANSYT (Traffic Network Tool)

O programa TRANSYT é um método para determinar planos de tráfego de tempo fixo, com o objetivo de permitir que fluxos conhecidos de veículos atravessem a rede viária com o mínimo de interrupção e atraso em seu percurso. Basicamente, o programa simula o comportamento dos veículos nos trechos de vias da rede (ramos ou **links**) e através de uma função de otimização define os tempos ótimos de verde para cada fase dos cruzamentos, bem como suas defasagens. Assim, o TRANSYT consiste essencialmente de dois elementos: um modelo comportamental do fluxo de tráfego e um modelo matemático de otimização.

Boletim Técnico da CET

Tabela 6.3.4* SUMARIO DOS TESTES DO TRRL

SISTEMA	PRINCIPAIS TESTES	PRINCIPAIS RESULTADOS	OUTRAS EVIDÊNCIAS
1. Tempo fixo			
1.1. COMBINATION	A comparação foi feita com um sistema de progressão atuado (onda-verde), implementado em Glasgow em 1967, com um único plano para o dia todo. Foram testados 3 planos COMBINATION: pico da manhã, fora de pico e pico da tarde	Os menores tempos de percurso foram obtidos através dos 3 planos do método COMBINATION (12% de redução em média)	Resultados idênticos foram obtidos na área oeste de Londres
1.2. TRANSYT	A comparação foi feita com o método COMBINATION (pico da manhã, tarde e fora de pico)	Os menores tempos de percurso foram obtidos através dos 3 planos do método TRANSYT (4% de redução em média)	Resultados idênticos foram obtidos na área oeste de Londres
1.3. SIGOP	1. A comparação foi feita com o método TRANSYT, usando 3 planos (pico manhã, tarde e fora pico) com opção de ciclo duplo em algumas interseções (1971) 2. Similar ao descrito acima com o tempo único de ciclo comum a todas as interseções	1. Para o pico da manhã não houve diferença. Para os outros dois períodos, os tempos de percurso no SIGOP foram mais longos (4% em média) 2. Não se obteve nenhuma diferença nos tempos de percurso para qualquer um dos 3 planos	2. Teste idêntico foi feito em San Jose (USA), obtendo-se os mesmos resultados
2. Sistemas atuados localmente	1. Método COMBINATION para coordenação básica, comparado com o mesmo método COMBINATION, usando 3 planos (pico manhã, tarde e fora de pico)	1. Nenhuma diferença nos tempos de percurso em qualquer plano	1. Uma versão diferente do FLEXIPROG utilizada em Londres obteve uma melhora de 2%, que não foi estatisticamente significante
2.1. FLEXIPROG	2. TRANSYT para coordenação básica comparado com o mesmo método TRANSYT, usando um plano para fora de pico, mas testado no período das 19:30 às 21:30	2. Tempos de percurso maiores foram obtidos pelo método FLEXIPROG (cerca de 13% em média)	
2.2. ATUAÇÃO ISOLADA DE VEICULOS	Comparado com o TRANSYT sob condições de fluxo pouco intenso entre 1:00 e 3:00 da manhã (1971)	Nenhuma diferença obtida nos tempos de percurso entre os sistemas	
2.3. EQUISAT	Método COMBINATION para coordenação básica, comparando com o mesmo método COMBINATION, usando três planos (pico da manhã, tarde e fora pico) (1969)	Em qualquer plano não se obteve diferença alguma nos tempos de percurso	Utilizando uma outra versão mais recente do EQUISAT o teste resultou em tempos de percurso maiores p/ o pico da manhã (5%). Para os outros planos nenhuma diferença foi notada
3. Sistemas totalmente atuados	Comparado com um sistema de planos de tempo fixo com técnicas de otimização similares ao TRANSYT, em Madrid em 1970	O sistema de geração dinâmica de planos obteve tempos de percurso razoavelmente maiores (média 9%)	
3.1. GERAÇÃO DINÂMICA DE PLANOS	Três planos de tempo fixo foram comparados durante 4 períodos num dia útil, incluindo os horários de pico		
3.2. PLIDENT	Comparado com o método COMBINATION em 1969. Três planos diferentes do COMBINATION foram comparados durante o pico da manhã, tarde e fora de pico	PLIDENT obteve tempos de percurso bem maiores (em média 29%)	

TRANSCRITA DO TRRL — REPORT N.º 569 — (REFERENCIA 8)

Tabela 6.3.3* DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS TESTADOS PELO TRRL

1. Sistemas de planos de tempo fixo baseados em dados históricos do tráfego e calculados previamente (off-line) por programas computacionais.

As três técnicas testadas têm por objetivo determinar as defasagens entre os semáforos de uma área, de forma a minimizar uma função denominada índice de performance que é definida por uma combinação qualquer do número de paradas e atraso na rede.

 - 1.1. O método COMBINATION assume para todos os semáforos da rede um ciclo comum, embora admita valores que sejam submúltiplos desse ciclo. Os tempos de verde de cada fase são também conhecidos. Este método leva em consideração os volumes de conversão. Assume-se que o atraso num link dependa única e exclusivamente dos semáforos que controlam o fluxo de entrada e saída de veículos no link, não existindo a influência dos outros semáforos adjacentes. Usa-se um princípio de programação dinâmica para encontrar um ótimo global sujeito a algumas restrições sobre a configuração da rede.
 - 1.2. No método TRANSYT o tempo de ciclo é constante para todos os semáforos da rede, sendo que em algumas interseções o ciclo pode ser metade do valor assumido. Este método consiste num modelo simples, mas efetivo, que inclui movimentos de conversão, dispersão de pelotão e a interação de fluxos entre os links da rede. A técnica de otimização Hillclimbing é utilizada pelo TRANSYT para minimizar o índice de performance. A divisão do ciclo em fases semaforicas pode ser otimizada como parte deste processo.
 - 1.3. O método SIGOP é um modelo mais simples que o COMBINATION. O cálculo das defasagens é feito com base no processo Hillclimbing. Os tempos de cada fase são calculados independentemente da otimização das defasagens. Este método assume um tempo de ciclo constante para toda rede, embora vários valores sejam testados durante seu processamento. A previsão de atrasos é feita através de um modelo simples de simulação.
2. Sistemas coordenados com atuação local de tráfego em cada interseção.

Os métodos COMBINATION e TRANSYT são utilizados para estabelecer uma coordenação básica, a qual é adaptada localmente em função das informações dos detetores de veículos.

 - 2.1. FLEXIPROG (Flexible Progressive System): em caso de detecção de fluxos contínuos de tráfego, a mudança de fase processa-se de acordo com o estabelecido nos planos de tempo fixo.

Para tráfego pouco intenso, as mudanças ocorrem após se constatar uma perda de continuidade na intensidade do fluxo de veículos. Fases podem ser omitidas caso não haja demanda para elas.
 - 2.2. EQUISAT (Equal Degree of Saturation System): neste sistema, o tempo de ciclo e a seqüência das fases semaforicas são fixas. Modifica-se a distribuição dos tempos de verde (split) de forma a igualar o grau de saturação para cada fase de interseção.
3. Sistemas totalmente atuados.

Nestes sistemas, os planos de tráfego (ciclo, tempos de verde e defasagens) são calculados com os dados obtidos das informações de tráfego provenientes dos detetores.

 - 3.1. Geração dinâmica de planos

Os tempos de ciclo e duração das fases são calculados pelos princípios de Webster e Cobbe que utilizam os dados de fluxos obtidos através dos detetores. As defasagens são determinadas de forma a minimizar os atrasos e/ou paradas. Para tanto, define-se um modelo comportamental do tráfego no link e medem-se ou estimam-se as velocidades nos mesmos. No período de teste, esses valores foram calculados com uma freqüência de três ciclos.
 - 3.2. PLIDENT (Platoon Identification): o tempo de ciclo deste sistema não está restrito a condições de inter-relacionamento entre os cruzamentos. As rotas prioritárias dos pelotões de tráfego dentro da rede, bem como as estimativas dos seus tempos de percurso, atuam nas mudanças de fase, de modo a permitir a passagem dos pelotões com um menor tempo de espera no semáforo. Os tempos de verde são reajustados de acordo com as características de cada pelotão individual.

6.4.1 MODELO DE TRÁFEGO

Neste modelo são assumidas as seguintes hipóteses:

- a. todas as interseções importantes da rede são sinalizadas;
- b. todos os semáforos operam com um tempo de ciclo comum ou metade deste valor;
- c. a distribuição do tráfego nos links de fronteira da área de controle é uniforme, ou seja, os veículos entram na rede a uma taxa constante de chegada;
- d. as porcentagens de fluxo de conversão nos cruzamentos são constantes ao longo do tempo; e
- e. as filas que se formam numa dada aproximação são sempre escoadas (destruídas) no primeiro período de verde desta aproximação, ou seja, não existem ciclos saturados.

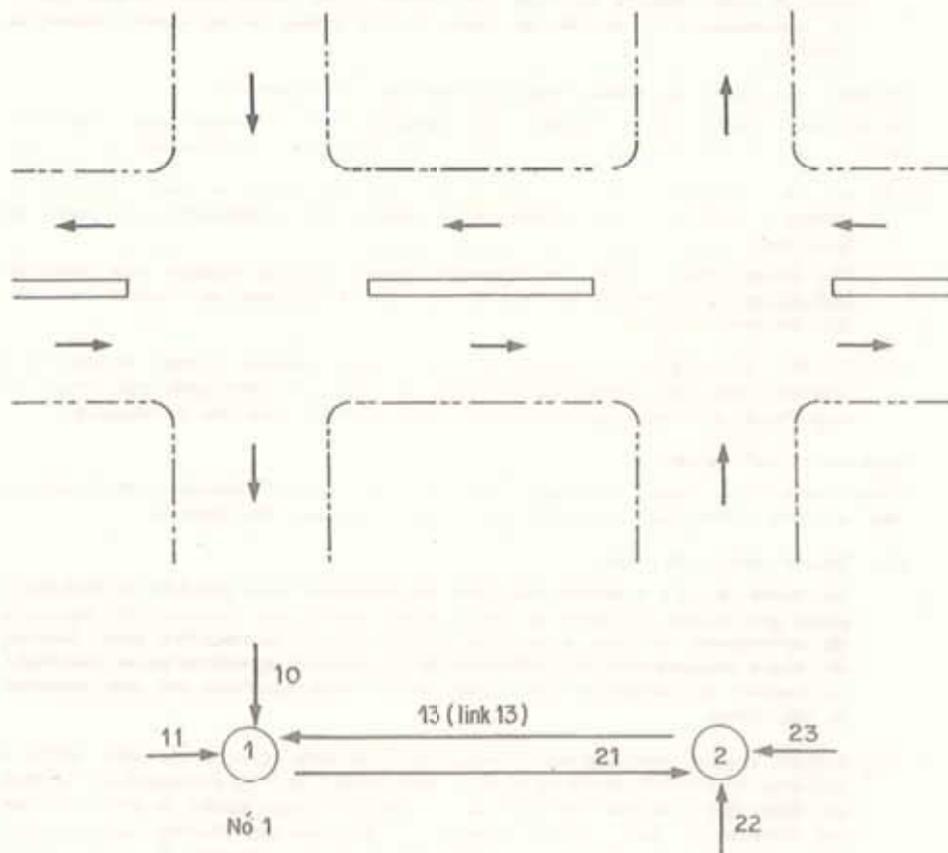


FIG. 6.4.1 — REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA NO TRANSYT DE UM TRECHO DE UMA REDE VIÁRIA.

No TRANSYT, a rede viária é apresentada por um conjunto de nós conectados por **links**. Um nó representa uma interseção sinalizada e um **link** uma corrente de tráfego unidirecional entre dois nós consecutivos. A Fig. 6.4.1 ilustra tal esquematização.

O ciclo é subdividido em unidades de tempo iguais e todos os cálculos do programa são feitos com base nos valores médios de fluxo e filas de veículos presumíveis de ocorrerem em cada uma dessas unidades.

A simulação do comportamento de tráfego em cada **link** da rede é feita através de manipulação, para cada unidade de tempo, de três tipos de padrões de tráfego:

1. padrão de chegada (Padrão IN) — fluxo que chegaria na faixa de retenção no fim do **link** se os veículos não fossem retidos pelo semáforo que controla o escoamento do **link**;
2. padrão de saída (Padrão OUT) — fluxo de escoamento de tráfego de um **link**; e
3. padrão de saturação (Padrão GO) — fluxo de escoamento se durante todo o intervalo de verde o tráfego saísse na capacidade máxima (fluxo de saturação).

O perfil de volume de entrada de veículos no início de um **link** é dado pela fração apropriada do padrão de saída dos **links** a ele afluentes. Porém, ao percorrer o **link** esse perfil se alterará devido às diferentes velocidades individuais de cada veículo. Conseqüentemente, o perfil de chegada na faixa de retenção (Padrão IN) será dado pelo perfil de entrada deslocado no tempo e devidamente modificado pela dispersão dos veículos.

Matematicamente tem-se:

$$IN_i = \sum_j (p_{ij} \cdot OUT_j) \cdot F_{ij}$$

onde:

P_{ij} = porcentagem do padrão OUT_j que entra no **link** i

OUT_j = padrão OUT do **link** j

F_{ij} = fator de dispersão dos veículos provenientes do **link** j ao percorrer o **link** i

Na faixa de retenção, o fluxo de chegada é liberado no intervalo de verde com uma taxa de escoamento igual ao fluxo de saturação, se

houver fila no **link**. Caso contrário, o fluxo de saída (Padrão OUT) é igual ao fluxo de chegada (Padrão IN).

Durante o período de vermelho, não há escoamento e os veículos que chegam são obrigados a parar, formando uma fila. O número de veículos na fila num dado instante t é dado por:

$$Q_t = \max \{Q_{t-1} + q_t - S_t, 0\}$$

onde:

Q_t = número de veículos na fila no instante t .

q_t = fluxo de chegada no instante t

S_t = fluxo de escoamento no instante t

O modelo de previsão de dispersão de pelotão utilizado no TRANSYT é um modelo empírico desenvolvido por Robertson⁹ e consiste da seguinte equação de recorrência:

$$q'_{t+T} = Fq_t + (1 - F)q_{t+T-1}$$

sendo:

q_t = fluxo inicial do pelotão na entrada do **link**, no instante t

q'_t = fluxo previsto do pelotão no instante t

$T = \beta t_p$ = fração do tempo médio de percurso (t_p) relativo ao veículo mais rápido

F = Fator de alisamento

O valor de F é dado por:

$$F = \frac{1}{1 + \alpha T}$$

Os parâmetros α e β são valores empíricos determinados a partir de pesquisas com dispersão de pelotões reais de veículos. Robertson sugeriu que fossem adotados $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,8$.

Relacionando os fluxos de chegada num **link** com os fluxos de saída de **links** precedentes, o programa traça o movimento dos veículos na rede, simulando o comportamento do tráfego.

6.4.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

De acordo com o modelo de tráfego, os fluxos unidirecionais, após terem sido liberados por um semáforo, percorrerão um trecho da via até atingir uma próxima interseção sinalizada onde serão escoados no período de verde do semáforo que controla esse cruzamento. Se a função de demanda acumulada, ou número de veículos que chegam na interseção, e a função de serviço acumulado (atendimento), ou número de veículos escoados, forem conhecidas então a área entre essas duas curvas representa o atraso no cruzamento (Fig. 6.4.2 — 1).

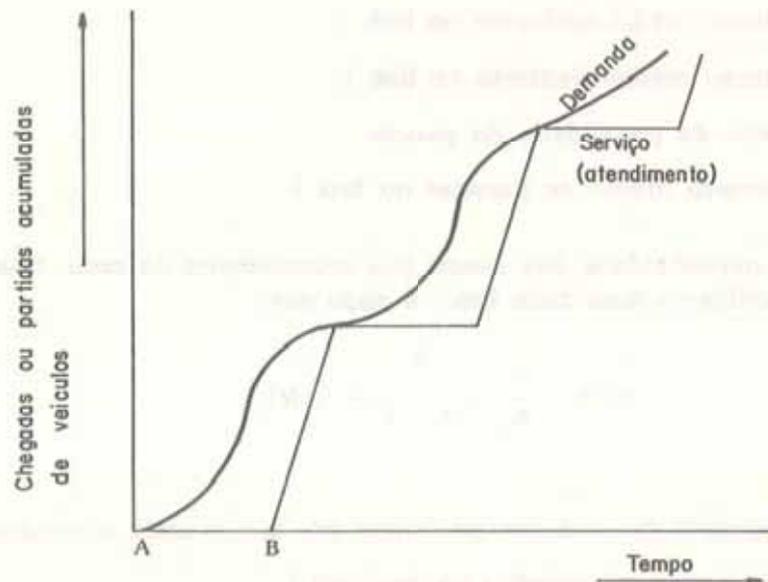


FIG. 6.4.2 — 1 VOLUMES ACUMULADOS DE DEMANDA E SERVIÇO NUMA INTERSEÇÃO SINALIZADA.

Neste gráfico, a distância vertical entre as curvas representa o número de veículos retidos (parados) na faixa de retenção do link, enquanto que a distância horizontal representa a duração do atraso. Alterando-se o intervalo de tempo entre a chegada (A) e a partida (B) do primeiro veículo da faixa de retenção, a área entre as curvas e, conseqüentemente o atraso, irá variar também. Assim, ajustando-se convenientemente o intervalo A-B poder-se-á minimizar o atraso. Em termos gerais, o modelo de otimização do TRANSYT procura determinar para cada interseção da rede qual o intervalo A-B que melhor desempenho apresenta em relação a uma função objetivo, denominada **Índice de Performance (IP)**. Para tanto, o programa utiliza como funções de demanda e serviço os padrões de tráfego

de chegada (IN) e escoamento (OUT), respectivamente, gerados pelo modelo de simulação de tráfego.

O Índice de Performance é definido por:

$$IP = \sum_{i=1}^n (d_i + d'_i + K S_i)$$

onde:

IP = Índice de Performance

n = número de links da rede

d_i = atraso médio uniforme no link i

d'_i = atraso médio aleatório no link i

K = fator de penalidade de parada

S_i = número médio de paradas no link i

Dada a periodicidade dos fluxos nos cruzamentos da rede, o atraso médio uniforme num dado link i é dado por:

$$d_i = \frac{\Delta t}{A_c} \left[\sum_{t=1}^n (A - D)_t \right]$$

onde:

n = número de unidades de tempo em que o ciclo é subdividido

A_t = chegadas acumuladas no intervalo t

D_t = partidas (escoamento) acumuladas no intervalo t

A_c = total de chegadas durante o ciclo

Δt = comprimento do intervalo de tempo (ciclo/n)

Na realidade, os volumes de tráfego sofrem flutuações ao longo dos ciclos devido ao comportamento estocástico dos fluxos de chegada. A fim de considerar esse efeito, o TRANSYT define um componente aleatório do atraso, dado por:

$$d'_i = \frac{x_i^2}{4(1-x_i)}$$

onde:

x_i = grau de saturação do link i

Além disso o número médio de paradas num link i é dado por:

$$S_i = \frac{1}{c} \sum_{t=t_r}^{t_0} a_t$$

onde:

a_t = chegadas de veículos no intervalo t ($t_r \leq t \leq t_0$)

c = tempo de ciclo

t_r = instante de início do período vermelho do link i

t_0 = instante no período verde do link i no qual a fila se torna nula

A lógica do modelo de otimização do TRANSYT se utiliza de um processo matemático iterativo denominado Hillclimbing para determinação das configurações ótimas dos semáforos. O algoritmo de otimização consiste dos seguintes passos:

1. calcula-se o Índice de Performance para uma configuração inicial dos tempos e defasagens dos semáforos. Os tempos iniciais de verde das fases dos cruzamentos ou são fornecidos como dados de entrada ou são calculados pelo programa (método de Webster);
2. fixa-se uma interseção (nó) e varia-se a defasagem de um valor predeterminado de unidades de tempo, recalculando-se um novo Índice de Performance. Este procedimento é repetido até que se encontre um mínimo local do índice;
3. repete-se o procedimento (2) para as demais interseções da rede; e
4. repetem-se os procedimentos (2) e (3) para um novo valor de incremento de defasagens, até que a seqüência de incrementos seja completada.

Além de otimizar as defasagens, o programa TRANSYT pode, opcionalmente, otimizar a duração dos intervalos de verde das fases dos cruzamentos.

Para cada estágio do processo de otimização o programa fornece um relatório com os valores de atraso e parada em cada link, bem como os valores totais para a rede.

Este relatório é de extrema valia para a identificação de problemas nos links, tais como super-saturação e/ou má distribuição dos intervalos de verde. Opcionalmente, pode-se solicitar a impressão de gráficos de chegadas (Padrão IN) e saídas (Padrão OUT) de veículos em links específicos.

As Figs. 6.4.2 — 2 e 3, ilustram um resultado do processamento do programa TRANSYT.

6.5 PRECISÃO DO TRANSYT

Com o intuito de certificar-se até que ponto os planos de tráfego produzidos pelo TRANSYT são realmente válidos na prática, o TRRL conduziu uma série de experimentos a fim de aferir a validade do programa⁹. Os resultados dos testes mostraram que:

1. as previsões fornecidas pelo modelo de comportamento de tráfego do TRANSYT são bastante acuradas; e
2. o Índice de Performance obtido para uma rede é muito pouco afetado pela configuração inicial assumida.

A partir das conclusões acima, é razoável supor que se os planos de tráfego produzidos pelo TRANSYT não forem os ótimos, pelo menos estarão bem próximos do seu valor.

6.6 TRANSYT COM PRIORIDADE PARA ONIBUS (TRANSYT/5)

Os benefícios resultantes da coordenação e sincronismo de semáforos através de planos de tráfego de tempo fixo (TRANSYT) distribuem-se sobre todos os veículos da rede, uma vez que o critério principal para otimização é o atraso veicular, definido em unidades de veículo-hora/hora. Neste caso, não ocorre distinção entre as classes diferentes de veículos (automóveis, ônibus, caminhões etc.). Contudo a engenharia de tráfego tem dado uma ênfase cada vez maior à mobilidade de pessoas ao invés da de veículos.

Nesse sentido, um ônibus carregado de passageiros deve ter prioridade sobre os veículos particulares.

Dessa maneira, o TRRL desenvolveu uma outra versão do programa (TRANSYT/5)¹⁰, que determina planos de tráfego com o objetivo de minimizar o tempo total de viagem dos passageiros na rede, favorecendo dessa forma os veículos com maior índice de ocupação. Além disso, as vantagens proporcionadas ao transporte coletivo superam amplamente as eventuais restrições impostas ao tráfego dos demais veículos.

A principal característica do TRANSYT/5, que é uma extensão do método básico, é a simulação em separado do comportamento de diferentes tipos de veículos numa corrente de tráfego mista.

Os testes de validação do programa, efetuados na cidade de Glasgow, mostraram que os planos de tráfego produzidos pelo

TRANSYT/5 aumentaram a velocidade média de percurso dos ônibus em cerca de 8% em comparação com a obtida pelo TRANSYT normal. Paralelamente, constatou-se que não houve mudanças significativas nas velocidades dos demais veículos. Esse acréscimo na velocidade gerou um benefício para a comunidade de Glasgow estimado em mais de US\$ 180.000 por ano, com a vantagem de não implicar em custos extras de equipamentos.

Parte desse benefício é atribuído ao melhoramento do modelo de tráfego do programa, conquanto o restante corresponde ao tratamento preferencial de minimização do atraso dos ônibus.

Provavelmente, os benefícios de correntes da utilização do TRANSYT/5 serão bem maiores se comparados a planos de tráfego calculados por métodos menos eficientes que o TRANSYT.

7

**aplicações do programa TRANSYT
em São Paulo**

7.1 PLANOS DE TRÁFEGO

Normalmente, a avaliação do benefício decorrente da implantação de uma programação semafórica adequada é apenas qualitativa, sendo indiscutível que o rendimento do sistema viário aumenta quando os semáforos estão ajustados. Porém, considerando-se que num semáforo padrão da cidade de São Paulo passam em média 16.000 veículos/dia e que cada veículo gasta um tempo médio de 30 s em cada interseção sinalizada, conclui-se que são gastos diariamente por semáforo 134 horas, ou ainda 33.500 horas/ano. Assumindo um valor de Cr\$ 49,90 a hora do veículo e ocupante (vide Apêndice 2), resulta um custo total de Cr\$ 1,67 milhões/ano/semáforo.

Na hipótese de que a implantação de uma programação adequada resulte numa redução de 1% (insignificante) do tempo gasto, isto representará um benefício diário de Cr\$ 6.700,00/semáforo ou ainda Cr\$ 16.700,00/semáforo/ano. Como atualmente em São Paulo existem cerca de 1.600 interseções sinalizadas, o benefício total anual seria da ordem de Cr\$ 26,7 milhões. Estes números mostram de maneira insofismável a relevância das medidas de regulação e coordenação

de semáforos e justificam amplamente os investimentos que venham a ser feitos no setor.

Conseqüentemente, dentro do conjunto de atividades de atuação da CET para melhoria do tráfego urbano, situa-se um programa especial para dimensionamento dos semáforos existentes na cidade. Em particular, especial atenção está sendo dada à aplicação do programa TRANSYT nas regiões críticas da cidade.

Como resultado desse trabalho, durante o ano de 1977 foi revista e atualizada a programação em cerca de 800 interseções, além de se ter utilizado o programa TRANSYT em aproximadamente 150 semáforos, distribuídos em 3 áreas e 4 corredores principais do sistema viário de São Paulo.

No presente exercício, esta tarefa deverá ter sua continuidade e ampliação.

Dentre os locais onde foi utilizado o programa TRANSYT, o corredor Rebouças (9 interseções, 2,8 km de extensão e 3 planos de tráfego com ciclo duplo) e a área Paulista (37 interseções, 0,99 km² e 3 planos de tráfego com prioridade de ônibus) merecem especial destaque. Nestes locais, a implantação do programa não foi acompanhada de alterações de circulação e/ou projetos geométricos e, por esta razão, as melhorias ocorridas nas condições de fluidez e acessibilidade são conseqüências direta e única do bom desempenho da nova programação. Os resultados obtidos nas avaliações dos estudos comparativos das situações antes e depois da implantação do TRANSYT estão abaixo resumidos.

7.1.1 APLICAÇÃO DO PROGRAMA TRANSYT NO CORREDOR REBOUÇAS

A Tabela 7.1.1 sintetiza os principais resultados decorrentes da nova programação. De maneira geral, houve um acréscimo de 22,6% na velocidade média diária, juntamente com uma redução de 19,2% no tempo médio de percurso. Além disso, a duração do período de pico da tarde passou das 16:30 — 19:30 para as 17:00 — 19:00. Estes dados representam um benefício global de aproximadamente Cr\$ 1,2 milhões por mês ou Cr\$ 14,4 milhões/ano.

Tabela 7.1.1 RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES ANTES E DEPOIS DO TRANSYT NO CORREDOR REBOUÇAS
(MÉDIA DE AMBOS OS SENTIDOS)

HORARIO	TEMPO MÉDIO		TEMPO TOTAL		VELOCIDADE MÉDIA		CUSTO		BENEFÍCIO POR PERÍODO (Cr\$)
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
Pico manhã	7'12"	7'00"	-2,8	378,0 367,5	-2,8	23,2 23,9	3,0	18.862 13.339	1.048
Pico tarde	9'00"	6'10"	-31,5	472,5 324,5	-31,3	18,6 27,0	31,1	23.577 16.192	38.347
Fora pico	6'21"	5'17"	-16,8	212,0 176,0	-17,0	26,3 31,6	16,7	10.578 8.782	5.586
Diário	7'02"	5'41"	-19,2	291,5 229,9	-21,1	24,2 29,7	22,6	— —	44.981

Fonte: Pesquisa CET, maio/77.

7.1.2 APLICAÇÃO DO PROGRAMA TRANSYT NA ÁREA PAULISTA

As Tabelas 7.1.2 — 1 a 5 resumem os principais resultados obtidos com a implantação do programa na área Paulista. Nesta aplicação foi utilizado o TRANSYT/6 com prioridade para transporte coletivo nas faixas exclusivas na Av. Paulista.

Embora, normalmente, a prioridade dada aos ônibus influa de maneira negativa sobre a fluidez dos demais veículos, neste caso os dados coletados mostraram que houve um aumento geral na performance do sistema.

Apesar do TRANSYT ter sido implementado numa área, as pesquisas de avaliação da performance antes e depois foram efetuadas nas três principais vias do sistema, a saber: Av. Paulista, Alameda Santos e Rua São Carlos do Pinhal/Cincinato Braga.

Da análise dos resultados chega-se às seguintes conclusões:

1. os ônibus tiveram um incremento de 16,5% na velocidade média diária, em ambos os sentidos, além de uma redução de 44% no tempo total de espera nos semáforos. Os valores diários foram obtidos através da ponderação dos valores para os três períodos da pesquisa (pico da manhã, pico da tarde e fora de pico);
2. a velocidade média diária dos demais veículos na Av. Paulista aumentou em 26% e nas vias secundárias 30,6%;
3. a duração do pico da manhã foi reduzida em 1 hora, enquanto que o da tarde em 30 minutos; e
4. o benefício global nas três principais vias do Sistema foi de aproximadamente Cr\$ 34,8 milhões/ano.

Paralelamente aos benefícios decorrentes da redução dos tempos de viagens e atrasos nos cruzamentos, o aumento da velocidade dos veículos (autos e ônibus) proporcionou um maior rendimento dos motores, resultando numa redução do consumo de combustível. Considerando-se o período diário compreendido entre 6:00 — 22:00 h, chega-se a uma estimativa de economia anual da ordem de 1,6 milhões de litros de gasolina e 106 mil litros de óleo diesel, conforme detalhado nas Tabelas 7.1.2 — 6 e 7 (vide Apêndice 3).

As Tabelas 7.1.2 — 8 a 10 comparam os valores previstos pelo TRANSYT e os obtidos na pesquisa após a implantação.

Esta avaliação mostrou uma boa concordância com os dados fornecidos pelo programa.

As disparidades ocorrem, principalmente, no período da tarde para as vias secundárias (Alameda Santos e São Carlos do Pinhal/Cincinnati Braga). Observações das condições nesses locais, revelaram que:

1. esta região, apesar de ter uma densidade residencial alta, possui também características comerciais definidas (lojas e escritórios);
2. as más condições de pavimento junto ao meio-fio fazem com que os motoristas evitem esta faixa;
3. foram constatadas várias violações de estacionamento proibido, principalmente no período da tarde, o que restringia a capacidade da via; e
4. dadas as características comerciais, no período da tarde ocorre um grande movimento de saída dos veículos dos estacionamentos.

Em síntese, o efeito conjunto dessas interferências impediu a regularidade dos pelotões de veículos, além de não permitir que os motoristas desenvolvessem uma velocidade constante.

7.2 OUTRAS APLICAÇÕES

Além de sua aplicação normal para determinação de planos de sincronismo de semáforos, o programa TRANSYT é também utilizado como simulador para estudos de Engenharia de Tráfego.

Nesse sentido, a CET está desenvolvendo um estudo para elaborar um modelo de avaliação da necessidade de sincronismo entre semáforos numa região.

O resultado desse trabalho permitirá ao engenheiro de tráfego avaliar os eventuais benefícios decorrentes da sincronização entre interseções sinalizadas.

Paralelamente, servirá para determinar o balanceamento adequado entre a solicitação e a disponibilidade de equipamentos controladores.

Tabela 7.1.2 — 1 AVALIAÇÕES ANTES E DEPOIS DO DESEMPENHO DOS ÔNIBUS NA AV. PAULISTA
(EM CADA SENTIDO)

PERÍODO	TEMPO MÉDIO TOTAL DE PERCURSO (seg)		ATRASO MÉDIO TOTAL NOS SEMÁFOROS (seg)		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veic.-hora/hora)		VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		CUSTO HORÁRIO (Cr\$/hora)						
	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Antes	Depois					
PM	P → C	593	589	-0,70	130	81	-37,69	46,12	45,81	-0,77	16,17	16,27	0,62	19.601,00	19.465,00
	C → P	542	455	-16,05	141	90	-36,17	42,15	35,38	-16,06	17,69	21,07	19,10	17.913,00	15.036,00
PT	P → C	637	591	-7,22	180	83	-53,89	49,54	45,96	-7,23	15,05	16,22	7,77	21.054,00	19.533,00
	C → P	877	739	-15,73	239	123	-48,53	68,21	57,48	-15,73	10,93	12,97	18,66	28.989,00	24.429,00
FP	P → C	536	430	-19,77	—	—	—	38,71	31,05	-19,73	17,88	22,29	24,66	11.225,00	9.004,00
	C → P	528	412	-21,97	—	—	—	38,13	29,75	-21,93	18,15	23,27	28,21	11.057,00	8.627,00

P → C PARAISO → CONSOLAÇÃO

Tabela 7.1.2 — 2 AVALIAÇÕES ANTES E DEPOIS PARA AUTOS NA AV. PAULISTA

PERÍODO	TEMPO MÉDIO TOTAL DE PERCURSO (seg)		DISTÂNCIA MÉDIA TOTAL PERCORRIDA (veic.-km/h)		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veic.-hora/hora)		VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		CUSTO HORÁRIO (Cr\$/h)						
	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois				
PM	P → C	538	310	-42,38	6.843,9	8.255,3	20,62	384,1	266,9	-30,51	17,81	30,93	73,66	19.166,00	13.318,00
	C → P	351	349	-0,57	6.604,2	6.790,6	2,82	241,8	247,2	2,23	27,31	27,47	0,58	12.065,00	12.335,00
PT	P → C	804	578	-28,11	6.071,6	7.323,2	20,61	509,2	441,5	-13,29	11,92	16,58	39,09	25.409,00	22.030,00
	C → P	439	423	-3,60	6.697,4	7.056,9	5,36	306,7	311,4	1,53	21,83	22,66	3,80	15.304,00	15.538,00
FP	P → C	425	356	-16,23	4.527,1	5.459,1	20,58	200,7	202,7	0,99	22,55	26,93	19,12	10.014,00	10.115,00
	C → P	443	371	-16,25	4.660,2	5.858,6	25,71	215,3	226,7	5,29	21,64	25,84	19,40	10.745,00	11.313,00

Tabela 7.1.2 — 3 AVALIAÇÕES ANTES E DEPOIS PARA AUTOS NA AL. SANTOS (ÁREA PAULISTA)

PERÍODO	TEMPO MÉDIO TOTAL DE PERCURSO (seg)		DISTÂNCIA MÉDIA TOTAL PERCORRIDA (veic.-km/h)		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veic.-h/h)		VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		CUSTO HORÁRIO (Cr\$/h)					
	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois			
PM	452	363	-19,69	2.311,2	2.548,8	10,28	134,3	119,0	-11,39	17,20	21,42	24,53	6.703,00	5.937,00
PT	688	598	-13,08	2.505,6	2.829,6	12,93	221,7	217,6	-1,85	11,30	13,00	15,04	11.062,00	10.858,00
FP	615	485	-21,14	2.268,0	2.268,0	—	179,4	141,4	-21,18	12,64	16,03	26,82	8.950,00	7.058,00

Tabela 7.1.2 — 4 AVALIAÇÕES ANTES E DEPOIS PARA AUTOS NA RUA S. CARLOS DO PINHAL/CINCINATO BRAGA

PERÍODO	TEMPO MÉDIO TOTAL DE PERCURSO (seg)		DISTÂNCIA MÉDIA TOTAL PERCORRIDA (veic.-km/h)		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veic.-h/h)		VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		CUSTO HORÁRIO (Cr\$/h)					
	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois	Δ%	Antes	Depois			
PM	255	185	-27,45	885,6	1.170,0	32,11	69,70	66,80	-4,16	12,70	17,51	37,87	3.478,00	3.333,00
PT	427	280	-34,44	777,6	900,0	15,74	102,48	77,77	-24,11	7,58	11,57	52,64	5.113,00	3.880,00
FP	266	210	-21,05	540,0	630,0	16,67	44,33	40,83	-7,89	12,18	15,43	26,68	2.212,00	2.037,00

Tabela 7.1.2 — 5 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DIÁRIOS ANTES E DEPOIS DA IMPLANTAÇÃO DO TRANSYT NA AV. PAULISTA

LOCAL	CUSTO DIÁRIO (Cr\$)		ECONOMIA (Cr\$)
	ANTES	DEPOIS	
PAULISTA	ÔNIBUS	303.204,00	94.730,00
	AUTOS	351.478,00	328.427,00
AL. SANTOS		103.391,00	21.639,00
São Carlos do Pinhal/ Cincinnati Braga		32.578,00	6.724,00
TOTAL	913.744,00	767.600,00	146.144,00

LOCAL	PERÍODO	VELOCIDADE (km/h)		CONSUMO (l/100 km)		VOLUME ECONOMIA (veic./h)	
		ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	DEPOIS	(l/h)
PM	P → C	17,81	30,93	19,24	14,68	3.100	325,13
	C → P	27,31	27,47	15,50	15,46	2.550	2,35
AVENIDA	P → C	11,92	16,58	24,55	20,04	2.750	285,26
PAULISTA	C → P	21,83	22,66	17,26	16,94	2.650	19,50
	P → C	22,55	26,93	16,98	15,60	2.050	65,07
FP	C → P	21,64	25,84	17,34	15,90	2.200	72,86
	P → C	17,20	21,42	19,62	17,43	1.180	59,44
ALAMEDA	PICO MANHÃ	11,30	13,00	25,43	23,22	1.310	66,59
SANTOS	FORA PICO	12,64	16,03	23,63	20,43	1.050	77,28
	PICO MANHÃ	12,70	17,51	23,56	19,43	1.300	123,49
SÃO CARLOS	PICO TARDE	7,58	11,57	33,74	25,03	1.000	200,33
	FORA PICO	12,18	15,43	24,21	20,90	700	53,29

Tabela 7.1.2 — 7 CONSUMO DE COMBUSTIVEL PARA ÔNIBUS NA FAIXA EXCLUSIVA DA AV. PAULISTA

LOCAL	PERÍODO	VELOCIDADE (km/h)		CONSUMO (l/100 km)		VOLUME ECONOMIA (pcu/h)		
		ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS			
		Δ		Δ				
PM	P → C	16,17	16,27	47,61	47,55	0,06	280	0,39
	C → P	17,69	21,07	46,72	45,21	1,51	280	9,72
PT	P → C	15,05	16,22	48,38	47,58	0,80	280	5,15
	C → P	10,93	12,97	52,56	50,16	2,40	280	15,46
FP	P → C	17,88	22,29	46,62	44,78	1,84	260	11,00
	C → P	18,15	23,27	46,49	44,46	2,03	260	12,14

Tabela 7.1.2 — 8 COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS PELO TRANSYT E OS PESQUISADOS NA AV. PAULISTA

		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veíc.-h/h)			VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		
		Real	Previsto	(P/R)%	Real	Previsto	(P/R)%
		BUS	PM	81,19	74,41	- 8,35	14,59
	PT	103,44	78,38	- 24,22	18,67	15,45	- 17,24
AUTO	PM	514,10	765,54	48,71	29,20	21,63	- 25,92
	PT	752,90	708,63	- 5,88	19,62	20,60	4,99

Tabela 7.1.2 — 9 COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS PELO TRANSYT E OS PESQUISADOS NA AL. SANTOS

		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veíc.-h/h)			VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		
		Real	Previsto	(P/R)%	Real	Previsto	(P/R)%
		AUTOS	PM	115,34	119,00	3,17	21,42
	PT	217,60	125,12	- 42,50	13,00	21,63	66,38

Tabela 7.1.2 — 10 COMPARAÇÃO DOS VALORES PREVISTOS PELO TRANSYT E OS PESQUISADOS NA RUA S. CARLOS DO PINHAL/CINCINATO BRAGA

		TEMPO TOTAL GASTO NA REDE (veíc.-h/h)			VELOCIDADE MÉDIA DE PERCURSO (km/h)		
		Real	Previsto	(P/R)%	Real	Previsto	(P/R)%
		AUTOS	PM	69,70	57,22	- 17,90	17,51
	PT	77,77	57,79	- 25,77	11,57	20,53	77,44

8

apêndice

1 — ESTIMATIVA DO CUSTO DOS ATRASOS

Analisando-se a maioria das interseções sinalizadas da cidade de São Paulo, estabeleceu-se uma interseção média padrão a qual foi definida como sendo um cruzamento entre uma via de mão dupla (via principal) e uma via de mão única (via secundária), ambas com duas faixas de tráfego por sentido de direção, conforme é mostrado na Fig. A.1.

Além disso, foram estimados os seguintes parâmetros:

1. tempo médio de ciclo: 70 segundos
2. capacidade média: 1.500 veículos/hora/faixa
3. volume médio — via principal: 500 veíc./hora/faixa
4. volume médio via secundária: 300 veíc./hora/faixa
5. tempos de fase 1 = 40 s e fase 2 = 24 s

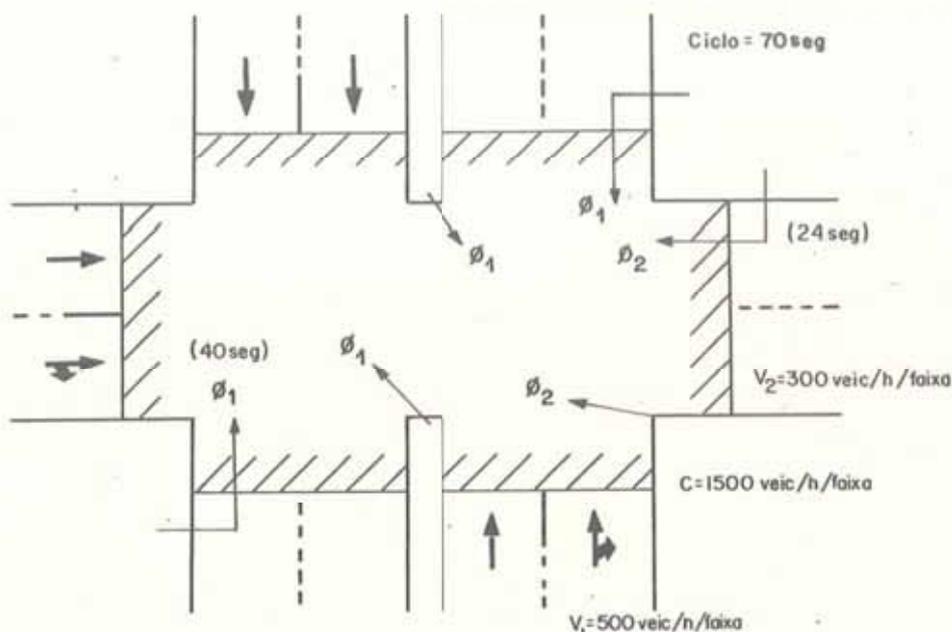


FIG. A.1 — INTERSEÇÃO MÉDIA PADRÃO

Utilizando-se a fórmula de Webster para cálculo de atraso médio por veículo para cada aproximação da interseção, tem-se:

$$d_i = \frac{9}{10} \left\{ \frac{c(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - \lambda_i x_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1 - x_i)} \right\}$$

onde:

d_i = atraso médio por veículo na fase i da interseção (s)

c = tempo de ciclo do cruzamento (s)

λ_i = porcentagem de verde da fase i ($\frac{\text{verde fase i}}{\text{ciclo}}$)

x_i = grau de saturação da fase i

Os valores obtidos foram:

$d_1 = 11,32$ s/veículo na aproximação 1

$d_2 = 21,41$ s/veículo na aproximação 2

Dessa forma, o atraso total no cruzamento é de:

$$A_T = 4 \cdot \frac{500}{3.600} \times 11,32 + 2 \cdot \frac{300}{3.600} \times 21,41 = 9,86 \text{ veíc. hora/hora}$$

Considerando que um semáforo opera em média 12 horas/dia e que existem 1.600 semáforos em São Paulo, o custo total diário será:

$$C_{TD} = 1.600 \times 12 \times 9,86 \times C_H$$

onde:

C_{TD} = custo total diário

C_H = custo horário do veículo parado

O valor de C_H foi estimado em $C_H = 49,90$ (vide Apêndice 2).

Assim:

$C_{TD} = 9,45$ milhões cruzeiros/dia

Considerando-se 250 dias úteis tem-se um custo total anual de 2,36 bilhões de cruzeiros.

2 — ESTIMATIVA DO CUSTO DA HORA DE ATRASO

Em trânsito lento, um veículo consome em média cerca de 3 litros de gasolina, o que representa aproximadamente Cr\$ 19,00 (Cr\$ 6,30/litro).

Estimando-se o salário médio do motorista em Cr\$ 12,8 mil e do acompanhante em Cr\$ 6 mil, chega-se aos valores horários de Cr\$ 80,00 e Cr\$ 32,50, respectivamente.

Admitindo-se que o índice médio de ocupação do veículo seja 1,4 e o custo da hora parada corresponda a 1/3 da hora trabalhada, resulta que o custo da hora de atraso é:

$$\begin{aligned} C_{HA} &= 26,60 + 0,4 \times 10,83 + 19,00 = 49,93 \\ C_{HA} &\simeq 49,90 \end{aligned}$$

3 — ESTIMATIVA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Após detalhados experimentos, Everall¹¹ propôs a seguinte relação entre consumo e velocidade para um carro médio trafegando em área central urbana:

$$C = 8,50 + \frac{191,3}{V}$$

onde:

C = consumo de combustível (l/100 km)

v = velocidade ((km/h) $10 \leq v \leq 58$)

Assim, para uma via com extensão de X km, a economia de combustível, em litros/hora, é dada por:

$$E = \frac{C_A - C_D}{100} \cdot x \cdot q_D$$

onde:

C_A = consumo de combustível "antes" (l/100 km)

C_D = consumo de combustível "depois" (l/100 km)

x = extensão da via (km)

q_D = fluxo horário "depois" (veíc./h)

A economia diária é calculada por:

$$E_D = E_C^{PM} \cdot h^{PM} + E_C^{PT} \cdot h^{PT} + E_C^{FP} \cdot h^{FP}$$

onde:

E_D = economia diária (l/dia)

E_C^{PM} = economia no pico da manhã (l/h)

h^{PM} = duração do pico da manhã (h)

PT = pico da tarde

FP = fora de pico

GLOSSÁRIO

- ATRASO MÉDIO POR VEÍCULO** — diferença entre o tempo de percurso real para travessia de um cruzamento e o tempo necessário, caso não houvesse paradas ou redução de velocidade dos veículos.
- CAPACIDADE DE UMA VIA** — número máximo de veículos que podem passar na via durante um período de tempo.
- COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS** — o pulso de avanço da unidade de tempo é comum a todos os semáforos pertencentes a um sistema.
- DEFASAGEM** — diferença de tempo entre os instantes de início de um estágio (ou fase) numa interseção e o correspondente estágio na interseção mestre.
- DIAGRAMA ESPAÇO x TEMPO** — técnica manual para obtenção de sistemas progressivos.
- DISPERSÃO DE PELOTÃO** — espalhamento do pelotão devido às diferentes velocidades individuais dos veículos.
- ESTÁGIO** — situação dos sinais luminosos de uma interseção durante um intervalo de tempo que dá direito de passagem a uma ou mais correntes de tráfego, e no qual não há mudança de ou para verde.
- FASE** — seqüência de condições dos sinais luminosos que se aplicam a uma ou mais correntes de tráfego, os quais durante o ciclo recebem as mesmas indicações.
- FLUXO VEICULAR** — quantidade média de veículos (carros, ônibus, caminhão etc) que passam por um determinado local, na mesma direção, num intervalo de tempo.
- GRAU DE SATURAÇÃO** — relação entre o fluxo que passa e a capacidade de uma via.
- LARGURA DE BANDA** — relação temporal entre a extensão de "onda verde" e a duração da fase verde correspondente.
- LINK DE TRÁFEGO** — trecho da via unidirecional compreendido entre dois semáforos adjacentes.
- ONDA VERDE** — vide sistema progressivo.
- PELOTÃO DE VEÍCULOS** — grupo de veículos que se movimenta na via como um bloco homogêneo.

PLANOS ATUADOS — a duração do tempo de ciclo é função da atuação dos veículos.

PLANOS DE TEMPO FIXO — a duração de ciclo é constante ao longo do tempo.

PLANOS DE TRÁFEGO — conjunto de dados para controle do fluxo de veículos num semáforo. Estes dados incluem: duração do tempo de ciclo da interseção associada, instantes de início de estágios (ou fases) em relação ao início do ciclo e defasagem em relação a uma interseção predeterminada (mestre).

SEMÁFOROS — mecanismos de controle para regular os fluxos de veículos e pedestres.

SINCRONISMO DE SEMÁFOROS — diz-se de semáforos que, além de estarem coordenados, têm seus instantes de início de ciclo ($t = 0$) coincidentes, ou seja, existe apenas um referencial de tempo.

SISTEMA ALTERNADO — os semáforos adjacentes mostram sempre indicações contrárias.

SISTEMA PROGRESSIVO — os tempos de verde entre interseções adjacentes são ajustados de maneira a se obter uma progressão ao longo da via, numa determinada velocidade.

SISTEMA SIMULTÂNEO — todos os semáforos ao longo da via apresentam o mesmo aspecto para o tráfego.

SISTEMA VIÁRIO — conjunto de vias destinadas à circulação de veículos.

REFERÊNCIAS

- (1) Webster, F.V. — Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper n.º 39 — London, H.M. Stationary Office, 1958.
- (2) Miller, A.J. — Settings for fixed-cycle traffic signals, Operat. Res. Quart. Vol. 14, n.º 4, 1973 pág. 373.
- (3) Schlaefli J.L. — Optimization and Evaluation Techniques for Street Traffic Control, paper presented to IFAC Workshop on Optimization Applied to Transportation Systems. February/1976 Viena, Austria.
- (4) Wagner, et al. — Improved Criteria for Traffic Signal Systems on Urban Arterials, NCHRP Report 73, 1969.
- (5) Brooks, W.D. — Designing Arterial Progressions Using a Digital Computer, IBM — Corp. Chamberlain, R.N. — Traffic Progression Program, IBM — Corp.
- (6) Yardeni, L.A. — Algorithms for Traffic Signal Control, IBM Systems Journal, Vol. 4 — n.º 2 1965.
- (7) Morgan & Little — Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth, Operation Research, Vol. 12 n.º 6 pp. 896.912.1964.
- (8) Halroyd, J.E., Robertson, D.I. — Strategies for Area Traffic Control Systems, present and future, TRRL Report LR 569, 1973.
- (9) Robertson, D.I. — Transit — a Traffic Network Study Tool, RRL Report LR 253, 1969.
- (10) Robertson, D.I. & Vincent, R.A. — Bus priority in a network of fixed-time signals, TRRL Laboratory Report n.º 666, 1975.
- (11) Overall, P.F. — The Effect of Road and Traffic Conditions on Fuel Consumption.

Ficha Técnica

Eng.º JOSÉ SEISHUN HANASHIRO
Assessor de Projetos Especiais

Eng.º GILBERTO MONTEIRO LEHFELD
Assistência da Assessoria de Projetos Especiais
Revisão Técnica

PAULO ERNESTO CONDINI
Editor

LUIZ MANSOUR MAKLOUF F.º
Programação Visual/Produção

ZILDA ABUJAMRA DAEIR
Copy-Desk/Revisão

LINOTIPADORA SILVESS LTDA.
Composição

FOTOLITOS GRAFA LTDA.
Fotolitos

GRÁFICA VANER BICEGO
Impressão

JOSÉ DOMINGOS BRITO
Distribuição

Série BOLETIM TÉCNICO DA GET

Redução do Consumo de Combustível: Ações na Circulação e no Transporte	— publicado
Redução dos Acidentes de Tráfego: Proposta de Medidas para um Plano de Ação	— publicado
São Paulo e a Racionalização do Uso do Combustível	— publicado
Pesquisa Aerofotográfica da Circulação Urbana: Análise de um Projeto Piloto	— publicado
Noções Básicas de Engenharia de Tráfego	— publicado
Engenharia de Campo	— publicado
Projeto SEMCO: Sistema de Controle de Tráfego em Área de São Paulo	— publicado
Ação Centro	— publicado
Comonar: Conselho de Ônibus Ordenados	— publicado
Sistema de Controle de Tráfego Aplicação do Programa TRANSYT	— publicado
POT Programa de Orientação de Tráfego	— No prelo
Controlador Atuado IMPRESSÃO	— No prelo