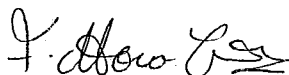


CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO: UM GERADOR DE PLANOS  
EM UM MICROCOMPUTADOR

Luis Fernando Chávez Peñaherrera

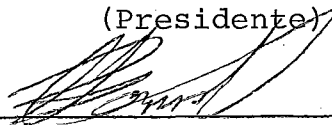
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



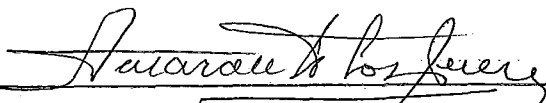
---

Prof. Félix Mora-Camino  
(Presidente)



---

Prof. Cláudio T. Bornstein



---

Prof. Amaranto Lopes Pereira



---

Prof. João Bosco da Mota Alves

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
MARÇO DE 1984

CHÁVEZ PEÑAHERRERA, LUIS FERNANDO

Controle de Tráfego Urbano: um Gerador de Planos em um Microcomputador (Rio de Janeiro) 1984. xviii, 140 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas, 1984).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Controle de Tráfego I. COPPE/UFRJ II. Título(série).

Aos meus pais Oswaldo e Martha,  
a minha noiva Mônica,  
aos meus irmãos:

Xavier,  
Sonia,  
Jaime,  
Mônica,  
Roberto,  
Diego,  
Martha e  
Andrés.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Félix Mora-Camino pela sua qualidade humana de amigo e mestre, meu reconhecimento permanente pela certa orientação e incentivo constantes.

À COPPE / UFRJ pela oportunidade concedida ao desenvolvimento de meu Mestrado.

Ao CNPq, IECE e ao Banco Central del Ecuador pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais, minha noiva e minha família em especial a meus tios Luciano e Dalia pela motivação e apoio constantes.

Aos meus amigos Fábio, Fausto, Marcelo e Carlos pela sua preocupação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Lucio Correia, Jean Michel Nayrac e Oscar Palma pela colaboração na elaboração do presente documento.

À Suzana pelo excelente trabalho datilográfico.

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

CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO: UM GERADOR DE PLANOS  
EM UM MICROCOMPUTADOR

Luis Fernando Chávez Peñaherrera

Março de 1984

Orientador: Prof. Félix Mora-Camino

Programa : Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho apresenta-se um gerador de planos de sinalização baseado num microcomputador. Este sistema visa o cálculo e a otimização desses planos (ciclo, defasagem e tempo de verde) para áreas urbanas sinalizadas e acompanha os princípios básicos (representação de pelotão) do programa TRANSYT, sendo compatíveis com sistemas de controle off-line. A otimização dos planos é realizada através de um processo interativo entre o sistema instalado num microcomputador e o Engenheiro de Tráfego. Finalmente, parece que este sistema é adequado às condições sócio-econômicas e ao nível técnico de muitos países em via de desenvolvimento.

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

URBAN TRAFFIC CONTROL: A PLAN GENERATOR ON  
A MICROCOMPUTER

Luis Fernando Chávez Peñaherrera

March of 1984

Chairman: Prof. Félix Mora-Camino  
Department: Engenharia de Sistemas e Computação

This study shows a Signal Setting Generator based on a microcomputer. This system allows the calculation and optimization of the plans (cycle time, offsets and green times) in urban areas and follows the basic principles (representation of platoon) of the TRANSYT package, compatible with off-line Control Systems. The optimization of the plans is achieved by using an interactive process between the system on a microcomputer and Traffic Engineer.

Finally, this system seems to be adequate for the socio-economical conditions and technical level in developing countries.

Résumé de la Thèse de Mestrado présentée a' la COPPE / UFRJ en vue de l'obtention du titre de Maître en Sciences (M.Sc.)

CONTRÔLE DE TRAFIC URBAIN : UN GÉNÉRATEUR  
DE PLANS SUR MICROORDINATEUR

Luis Fernando Chávez Peñaherrera

Mars 1984

Orientateur: Prof. Félix A. C. Mora-Camino

Programme : Engenharia de Sistemas e Computação

Dans ce travail est réalisé un générateur de plans de feux pour un microordinateur. Ce système vise l'optimization de plans de feux (cycle, déphasages et temps de vert) pour des zones urbaines signalisées et il suit les principes de base (principalement la représentation de pelotons) du Programme TRANSYT. Il est compatible avec des systèmes de contrôle hors ligne. L'optimization des plans est réalisée à l'aide d'un processus interactif entre l'Ingénieur de Trafic et le système. Finalement, ce système nous paraît compatible avec les conditions socio-économiques et le niveau technique de nombre de pays en voie de développement.

ÍNDICE

I	- INTRODUÇÃO GERAL .....	02
II	- FLUXOS DE TRÁFEGO URBANO	
	II.1 - Introdução .....	05
	II.2 - Características dos Fluxos de Tráfego Urbano .....	06
	II.3 - Alguns Modelos de Tráfego Urbano .....	08
	II.3.1 - Formação de Filas .....	09
	II.3.2 - Modelos de Intervalos entre Veículos .....	12
	II.3.3 - Os Modelos de Pelotão .....	15
	II.4 - Custos do Tráfego Urbano .....	25
III	- SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO	
	III.1 - Introdução .....	38
	III.2 - Elementos Básicos para o Controle Semafórico .....	38
	III.3 - As Estratégias de Controle do Tráfego Urbano .....	47
	III.4 - A Estrutura dos Sistemas de Controle de Tráfego em Área Urbana (CTA) .....	53
	III.5 - Os Sistemas de CTA no Brasil .....	54
	III.6 - Conclusão .....	61
IV	- PROCESSOS DE GERAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE SINALIZAÇÃO	
	IV.1 - Introdução .....	63
	IV.2 - Métodos de Busca Sequencial .....	63
	IV.3 - Aplicação da Programação Matemática à Otimização de Planos de Sinalização .....	68
	IV.4 - Um Algoritmo de Geração de um Plano de Sinalização Inicial .....	78
	IV.5 - Nova Proposta Metodológica na Otimização de Planos de Sinalização .....	84
V	- O MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO	
	V.1 - Introdução .....	89
	V.2 - Fundamentos Teóricos do Modelo de Simulação e Hipóteses Básicas .....	89



V.3	- Representação da Rede de Tráfego Urbano, os Histogramas .....	90
V.4	- Cálculo do Índice de Desempenho (Atraso Uniforme, Atraso de Parada, Atraso Alea- tório, Atraso Global da Rede) .....	97
V.5	- Descrição do Programa Desenvolvido .....	104
VI	- EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	
VI.1	- Introdução .....	118
VI.2	- Exemplo I .....	118
VI.3	- Exemplo II .....	125
VII	- CONCLUSÃO .....	134
	BIBLIOGRAFIA .....	135

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL

## I - INTRODUÇÃO GERAL

Neste trabalho considera-se o problema do controle de tráfego urbano, problema esse que tem-se tornado crítico devido ao uso desordenado do automóvel na cidade e ao aumento considerável do preço dos combustíveis, principalmente nos países do terceiro mundo. Isto constitui uma motivação para a pesquisa de medidas de controle de tráfego mais eficientes do que as tradicionais. Devido ao fato de a maior parte dos sistemas de controle terem sido concebidos em países desenvolvidos, sua implantação em cidades de países com características sócio-econômicas conflitantes tem apresentado dificuldades relacionadas não só com o alto custo dos investimentos necessários, como também pela falta de recursos humanos adequados.

Assim, após realizar um estudo intensivo sobre as teorias e modelos de fluxos de tráfego urbano e sobre os sistemas de controle de tráfego, uma nova proposta metodológica é apresentada e desenvolvida. Esta proposta visa harmonizar a prática do controle de tráfego urbano em cidades de médio e grande porte em países em via de desenvolvimento com a realidade sócio-econômica e o nível técnico destes países. Isto tornou-se possível devido à divulgação do uso de microcomputadores cada vez mais potentes.

Apresenta-se neste trabalho um sistema interativo de geração de planos de controle de tráfego urbano baseado num microcomputador nacional. Este sistema, único do gênero no presente momento, segue os fundamentos teóricos utilizados por D.I. Robertson em seu famoso programa TRANSYT. Ele permite calcular, através de uma participação ativa do Engenheiro de Tráfego, planos de sinalização a serem inseridos num sistema de controle de tráfego do tipo off-line, sistema esse que tem sido reconhecido como dos mais adequados para as áreas de aplicação propostas.

No Capítulo II descrevem-se as características dos fluxos de tráfego urbano e expõem-se alguns modelos de fluxo

de tráfego entre os quais se destacam os modelos de pelotão. Finalmente se faz uma análise dos custos do tráfego urbano.

No Capítulo III apresentam-se os elementos básicos no controle semafórico, descreve-se a estrutura dos sistemas de Controle de Tráfego em Área (CTA) e finalmente faz-se uma rápida comparação dos diversos sistemas de CTA no Brasil.

No Capítulo IV são expostos diversos processos de geração e otimização de planos de sinalização, entre eles o método da busca sequencial e o método de Programação Matemática. Na segunda parte deste capítulo é apresentado um algoritmo para a geração de um plano de sinalização inicial. Posteriormente propõe-se um processo iterativo de otimização de planos de sinalização baseado no modelo de simulação que é exposto no Capítulo V.

No Capítulo V se faz uma descrição detalhada do Modelo de Simulação desenvolvido, apresentando seus fundamentos teóricos e hipóteses básicas. São descritos também a representação da rede de tráfego urbano, os histogramas, o detalhamento do cálculo do índice de desempenho baseado no cálculo dos atrasos uniforme e aleatório, e o atraso de parada. Por último descreve-se o programa desenvolvido.

No Capítulo VI apresentam-se dois exemplos de aplicação utilizando o programa desenvolvido com os resultados de cada caso.

No Capítulo VII apresenta-se a conclusão do trabalho e as diversas sugestões que deverão ser levadas em conta em futuras pesquisas.

CAPÍTULO II - FLUXOS DE TRÁFEGO URBANO

## II - FLUXOS DE TRÁFEGO URBANO

### II. 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma breve análise dos fluxos de Tráfego Urbano, tanto no que se refere às suas características principais quanto às teorias existentes para representá-los.

Vários modelos são analisados detalhadamente, entre eles destacam-se as seguintes famílias:

- modelos estocásticos
- modelos de intervalos entre veículos (headway)
- modelos de pelotões de veículos

A seguir, um breve estudo sobre os custos gerados pelos fluxos de tráfego urbano é apresentado, colocando-se em evidência a influência que têm sobre eles os vários parâmetros de um sistema de controle de tráfego. São considerados principalmente os aspectos ligados ao gasto energético e ao nível de serviço apresentado pelo sistema de transporte urbano.

## II. 2 - CARACTERÍSTICAS DOS FLUXOS DE TRÁFEGO URBANO

Os fluxos de tráfego urbano, como todo outro fluxo de tráfego, podem ser descritos por medidas clássicas tais como:

- velocidade média e desvio padrão;
- densidade e composição do fluxo;
- fluxo médio.

Portanto, este fluxo se diferencia fortemente dos fluxos de tráfego em rodovias, autopistas e estradas vicinais devido principalmente aos fatores seguintes:

- Composição do tráfego: geralmente nas áreas urbanas a proporção de ônibus no fluxo de tráfego é bem maior em certos eixos da cidade, nos pontos de parada e a formação de filas de ônibus vão interagir fortemente com a evolução do resto do tráfego; a utilização neste caso de uma medida de equivalência tal como a UCP (unidade de carro de passeio), pode ser bastante ilusória no caso. Com relação a caminhões e outros veículos de carga, sua influência no tráfego urbano é reduzida durante o dia através de medidas legais (horários reservados) ou então é restrita a áreas periféricas da cidade. Outros tipos de veículos, tais como táxis estão presentes dentro do fluxo de tráfego urbano, podendo interferir muito com o resto do tráfego, principalmente nas imediações de terminais de transporte público (estacionamentos reservados a táxis, vias exclusivas para táxis).

- Sinalização e controle de tráfego: esta sinalização é muito mais densa em área urbana e aliada a um tráfego muito mais intenso, requer do motorista uma atenção maior, mudando até a sua maneira de dirigir. Esta sinalização organiza dentro da cidade os fluxos de tráfego em torno dos pontos de conflito (interseções) e gera assim vários fenômenos particulares ao tráfego urbano, tais como paradas e formação de filas repetitivas mesmo quando os fluxos de tráfego são baixos.

- A existência necessária de estacionamentos nas cidades conduz à concentração de fluxos de entrada e de saída de veículos dentro da rede, enquanto que nos outros tipos de sistema de transporte, esta interação com o contorno do sistema se faz de forma distribuída no espaço.

- As variações horárias dos volumes do fluxo de tráfego em áreas urbanas e periurbanas Fig.II.1 são muito marcantes, definindo-se horários de hora pico, quer seja de manhã, ao meio dia ou de tarde. Estas variações dos volumes conduzem a grandes diferenças nas condições de tráfego e nas necessidades de seu controle. Ora os fluxos de tráfego podem ser considerados como geradores de processos estocásticos pontuais independentes, ora como geradores de fluxo cuja estrutura apresenta-se sob forma de lotes (pelotões), ora como geradores de fluxos contínuos cujas características sejam essencialmente de terminísticas.

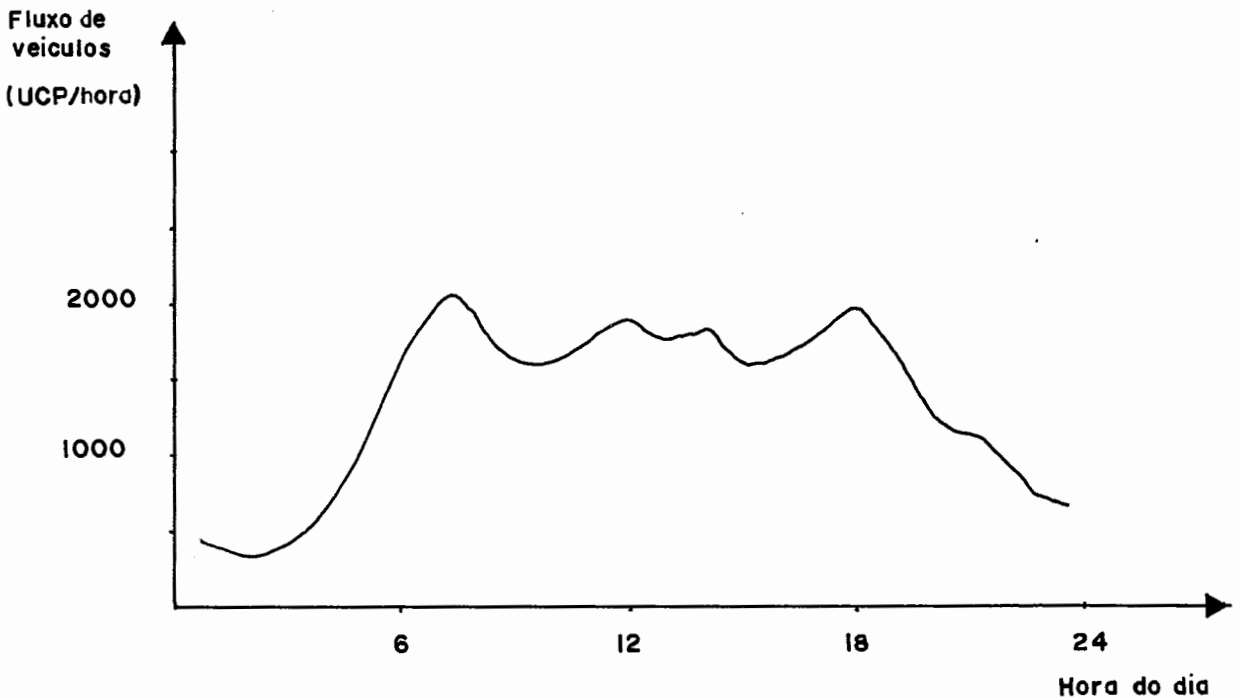


Figura II.1 - Variação Horária do Fluxo de Tráfego numa Via Urbana.



Nota-se também que em função do horário, a composição dos fluxos observados nas vias urbanas poderão variar fortemente, assim como a repartição dos movimentos giratórios ao nível das interseções.

## II. 3 - ALGUNS MODELOS DE FLUXOS DE TRÁFEGO URBANO

Desde os anos 50, várias teorias relacionadas com os fluxos de tráfego têm sido desenvolvidas. Os primeiros estudos feitos nos Estados Unidos concentram-se nos fluxos em vias expressas e autopistas onde estes fluxos apresentaram um caráter contínuo e determinístico. Assim, os primeiros modelos de fluxo de tráfego, assimilando os fenômenos da hidrodinâmica, foram de tipo macroscópico. Logo depois na Inglaterra, o TRRL desenvolveu vários estudos na área urbana, reconhecendo a estrutura por lote dos fluxos de tráfego e analisando os fenômenos suportados por este tipo de fluxo tanto ao nível das interseções como ao percorrer as vias urbanas. Também, vários modelos representando de forma detalhada os movimentos dos veículos têm sido propostos com a finalidade de realizar modelos de simulação digital, permitindo assim evitar custosos ensaios de campo. Recentemente estes modelos têm sido objeto de um maior interesse com o desenvolvimento de sistemas de controle atuado do tráfego.

A seguir serão expostos com maior detalhe modelos dos principais fenômenos encontrados nos fluxos de tráfego:

- formação de filas;
- chegadas sucessivas de veículos;
- evolução dos pelotões de veículos.

Os custos de transporte urbano manifestam-se seja durante o deslocamento dos veículos dentro das vias (em função por exemplo da velocidade média), seja dentro das filas (tempo de espera, número de paradas,...). A modelização adequada da formação de filas permitirá uma avaliação satisfatória dos

custos inerentes e assim ela passa a ter uma grande importância neste tipo de estudo.

### II.3.1 - FORMAÇÃO DE FILAS

O fenômeno de formação de filas tem sido modelizado de forma macroscópica considerando-se as taxas de chegada e de saída ao nível de uma aproximação de uma interseção, conduzindo a equações dinâmicas da forma:

$$X_{k+1} = \max(0, X_k + q_k - \delta_k \cdot S_k) \quad (\text{II.1})$$

onde:  $X_k$  é o tamanho da fila no instante  $K$ ,

$q_k$  é o fluxo incidente durante o período  $K$   
(alguns segundos),

$S_k$  é o fluxo de saída no período  $K$ , e,

$\delta_k = \phi$  ou 1 segundo que o sinal esteja aberto ou não

A essência aleatória do fenômeno da fila aparece nesta relação através das variáveis  $q_k$  e  $S_k$ . Se em relação ao fluxo de saída  $S_k$ , é possível admitir que ele seja constante (sendo então chamado, em Engenharia de Tráfego, de "Fluxo de Saturação"), em relação ao fluxo incidente não é possível admitir geralmente que ele seja constante. Esta hipótese poderá ser aceita quando uma via apresenta um fluxo igual à capacidade e evolue em condições quase determinísticas, ou então quando o fluxo é extremamente pequeno e os veículos se apresentam de forma independente uns dos outros.

É possível obter maiores informações sobre o fluxo incidente utilizando-se captadores colocados na via da aproximação a algumas dezenas de metros da linha de parada (ver Fig.II.2).

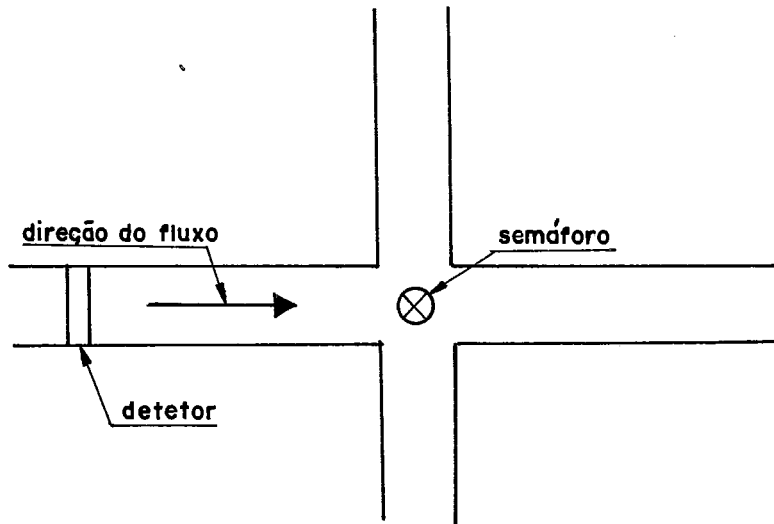


Figura II.2 - Um Sistema Simples de Detecção

O sinal emitido pelo detector,  $r_k$ , indicará a passagem de um veículo acima dele:

$r_k = 1$  se o veículo está acima do detector

$r_k = 0$  senão

Vários autores como SPERRY(46) têm considerado que em condições estacionárias, o tamanho da fila a cada instante e o fluxo de chegada dos veículos acima do detector são dependentes um do outro, podendo-se definir as taxas:

$$\lambda_n^k = P ( r_k = 1 \mid X_k = n ) \quad (II.2)$$

Sendo  $\lambda_n^k$  a taxa de chegada de veículos acima do detector quando o tamanho da fila é  $n$  no instante  $k$ . Por exemplo:

$$\lambda_n^k = \lambda_n^r \quad \text{se o sinal está vermelho no instante } k$$

$$\lambda_n^k = \lambda_n^g \quad \text{se o sinal está verde no instante } k$$

Da mesma forma tem-se assumido uma relação similar para as taxas de saída

$$\mu_n^k = P ( \text{uma saída} \mid X_k = n ) \quad (II.3)$$

Onde  $\mu_n^k$  é a taxa de saída de veículos quando o tamanho da fila é 'n'. Os períodos de discretização do tempo têm sido escolhidos tal que:

$$P(\text{mais de uma saída durante um período}) = 0 \quad (\text{II.4})$$

$$P(\text{mais de uma chegada durante um período}) = 0$$

Definindo:  $\Pi_n^k = P(X_k = n)$

e considerando o tamanho da fila máximo N, obtém-se:

$$\begin{aligned} \Pi_n^{k+1} &= P(1 \text{ chegada, } 0 \text{ saída} \mid X_k = n-1) \cdot P(X_k = n-1) \\ &+ P(0 \text{ chegada, } 1 \text{ saída} \mid X_k = n+1) \cdot P(X_k = n+1) \\ &+ P(0 \text{ chegada, } 0 \text{ saída} \mid X_k = n) \cdot P(X_k = n) \\ &+ P(1 \text{ chegada, } 1 \text{ saída} \mid X_k = n) \cdot P(X_k = n) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

$$n = 1, \dots, N$$

ou ainda

$$\begin{aligned} \Pi_n^{k+1} &= \lambda_{n-1}^k (1 - \mu_{n-1}^k) \cdot \Pi_{n-1}^k + (1 - \lambda_{n+1}^k) \mu_{n+1}^k \cdot \Pi_{n+1}^k \\ &+ (1 - \lambda_n^k) (1 - \mu_n^k) \cdot \Pi_n^k + \lambda_n^k \cdot \mu_n^k \cdot \Pi_n^k \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

$$n = 1, \dots, N$$

ou

$$\underline{\Pi}^{k+1} = Q^k \cdot \underline{\Pi}^k \quad (\text{II.7})$$

onde

$$\underline{\Pi}^k = \left[ \Pi_0^k, \Pi_1^k, \dots, \Pi_n^k \right]^T$$

também

$$P(r_k = 1) = \left[ \lambda^k \right]^T \cdot \underline{\Pi}^k \quad (\text{II.8})$$

Assim, definindo as variáveis  $Z_n$  tais que:

$$Z_n^k = \begin{cases} 0 & \text{se } X_k \neq n \\ 1 & \text{se } X_k = n \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Obtem-se as equações dinâmicas estocásticas (equações de estado e de observação):

$$\left. \begin{aligned} z^{k+1} &= \left[ Q^k \right]^T \cdot z^k + v^k \\ r^k &= \left[ \lambda^k \right]^T \cdot z^k + w^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.10})$$

Onde:  $v^k$  e  $w^k$  são processos de ruído branco tomando valores 0 ou 1. Este tipo de modelo, apesar de apresentar uma forma clássica para a Teoria do Controle, não tem sido utilizado em controle de tráfego a tempo real KENZO(27). Quiça uma das principais dificuldades para a aplicação deste modelo seja a impossibilidade de definir, em termos de tráfego urbano, o que seriam "condições estacionárias" de tráfego (vimos na seção anterior que estes fluxos variam sem cessar ao longo do dia). Daí a dificuldade de estimar as taxas  $\lambda_n^k$ . Os estudos de Engenharia de Tráfego, portanto, reconhecem o caráter repetitivo e estável das taxas de saída de veículos de uma fila. Assim, uma base para a previsão dos fluxos incidentes no fim de uma fila, seria justamente o conhecimento destas taxas de saída (o fluxo de saturação) nos trechos incidentes e dos instantes em que iniciam e terminam os fenômenos de saída. A partir daí, duas abordagens têm sido seguidas:

- uma relacionada com a geração de intervalos (headways) de tempo entre os instantes de chegada dos veículos na fila;

- a outra relacionada com o conceito de pelotão de veículos e a dispersão do mesmo.

### II.3.2 - MODELOS DE INTERVALOS ENTRE VEÍCULOS

Tanto os intervalos de tempo como os intervalos de espaço podem ser medidos facilmente através de detetores de presença de veículos nas vias, facilitando assim o estudo de suas propriedades estatísticas. Bem que existam modelos cibernéticos (os modelos de perseguição ou "car following") que

permitem apontar uma explicação à evolução espaço tempo real destes intervalos, a natureza deles é essencialmente estocástica BUCKLEY(04). Muitos modelos têm sido propostos para representar esta distribuição. Já em 1936, num trabalho pioneiro Adams propôs uma distribuição de Poisson:

$$\text{Pr } (h = k) = \frac{(q)^k}{k!} \cdot e^{-q} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{II.11})$$

onde  $q$  é o fluxo médio por período

assumindo que não tenha interação entre veículos sucessivos e assim limitando a aplicação deste modelo ao caso de um tráfego leve. Evidentemente, a operação dos sistemas de controle do tráfego urbano, submete tais veículos às condições e restrições comuns, aumentando assim sua interferência. Este primeiro modelo tem sido corrigido de várias formas, criando-se por exemplo um intervalo mínimo não nulo (através do uso de uma distribuição exponencial deslocada) ou propondo leis alternativas (a família de funções de densidade de Erlang, por exemplo). Também reconhece-se que existe um nível crítico do tráfego além do qual deve-se utilizar um modelo de distribuição de intervalos diferentes. Propõe-se então um modelo composto tal que:

$$P(h) = \psi \cdot P_1(h) + (1 - \psi) P_2(h) \quad (\text{II.12})$$

onde  $P_1(h)$  é a densidade relativa aos intervalos pequenos

$P_2(h)$  é a densidade relativa aos intervalos maiores

$\psi$  é o grau de interação do fluxo, parâmetro que varia de 0 (se o fluxo é muito baixo) até 1 quando a interação entre os veículos é total.

Os primeiros modelos deste tipo, SCHUHL(42) propuseram uma lei como:

$$P(h) = \psi \cdot e^{-d_1 H} + (1 - \psi) e^{-d_2 H} \quad h > 0 \quad (\text{II.13})$$

com  $H = \max(0, h - h_{\min})$

onde  $h_{\min}$  é o intervalo mínimo admissível e  $d_1$  e  $d_2$  sendo parâmetros positivos.

A seguir, notou-se que no caso de headways reduzidos a distribuição mais adequada para representar os intervalos era a Lei Log-Normal, TOLLE(47), finalmente BRANSTON(03) propôs o modelo seguinte:

$$P(h) = \begin{cases} \psi \cdot g(h) + (1-\psi) \cdot \lambda \exp - \lambda \cdot h \int_0^h g(x) \cdot \exp. (\lambda \cdot x) dx & h \geq 0 \\ 0 & \text{se } h < 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{com } g(h) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \Pi}} e^{-\frac{(\log h - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{II.15})$$

onde  $\mu$  e  $\sigma^2$  são a média e a variância de Log h.

Aqui,  $\psi$  representa a percentagem de veículos que se apresenta em grupo, ou pelotão, enquanto que  $(1/\lambda)$  representa o intervalo médio entre estes grupos. Vários critérios podem ser propostos para definir um pelotão de veículos. O procedimento mais correto seria de examinar a sequência dos intervalos e de detetar quando os intervalos deixam, por exemplo, seguir uma lei relativa a intervalos pequenos, para acompanhar uma lei relativa a intervalos maiores (caso de um fim de pelotão). Este procedimento é pouco prático, e necessita de conhecimentos avançados na área de análise de séries temporais. Em termos práticos EDLE(13) propôs, por exemplo, os critérios seguintes para decidir se dois veículos sucessivos estão no mesmo pelotão:

- 1) se  $h < 60\text{m}$  e  $v(\text{velocidade}) \geq 13\text{m/s}$
- 2) se  $h < 40\text{m}$  e  $13 \geq v \geq 11\text{m/s}$
- 3) se  $h < 30\text{m}$  e  $v < 10\text{m/s}$  (II.16)

Portanto esta definição foi elaborada com vistas a aplicação na análise de fluxos em rodovias. Então outros critérios devem ser propostos no caso do tráfego urbano. Estes poderão modificar simplesmente os níveis das condições (II.16) ou então levar em conta de forma explícita a atuação do sistema de controle de tráfego (por exemplo uma condição suficiente para

que dois veículos num trecho da via estejam no mesmo pelotão seria que eles tenham sido liberados durante o mesmo estágio na interseção anterior).

BRANSTON (03) desenvolveu vários estudos econométricos conduzindo as expressões de  $\psi$  e  $\lambda$  seguintes:

$$\psi = I - \frac{1}{2} (I - 1) \cdot q^{3/2} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{e} \quad \lambda = q - \frac{1}{2} q^{3/2} \quad (\text{II.18})$$

Onde  $q$  é o fluxo médio, e  $I$  a intensidade de tráfego, definida como:

$$I = \frac{\text{intervalo médio dentro do pelotão}}{\text{intermédio médio no fluxo}} \quad (\text{II.19})$$

### II.3.3 - OS MODELOS DE PELOTÃO

Utilizando o conceito de pelotão para representar os fluxos de tráfego urbano, a previsão das taxas de chegada ao nível das interseções (e eventualmente das filas aí existentes) será função de dois elementos:

- o tempo de deslocamento;
- a deformação ou "dispersão" dos pelotões incidentes.

Em relação ao tempo de deslocamento, poucos modelos têm sido desenvolvidos para áreas urbanas e os existentes são relativos a rodovias. Na prática, o Engenheiro de Tráfego deverá efetuar uma série de pesquisas de campo através de diversas técnicas. O segundo elemento tem despertado interesse em várias pesquisas (SEDDON P.A. (43) (44) (45)) sobre o assunto, desenvolvidas na Inglaterra, nos Estados Unidos e na França.

Lightill e Whitham, em 1955, partindo da teoria cinemática das ondas procuraram desenvolver um modelo de dispersão



dos pelotões em diferentes pontos de uma via a partir de pesquisas de campo. Na figura II.3 observa-se que o modelo teórico se comporta adequadamente até a aparição de uma onda de choque interna ao pelotão (na figura, aproximadamente a 183 m da linha de parada), depois disso, o modelo diverge muito com relação ao fenômeno observado.

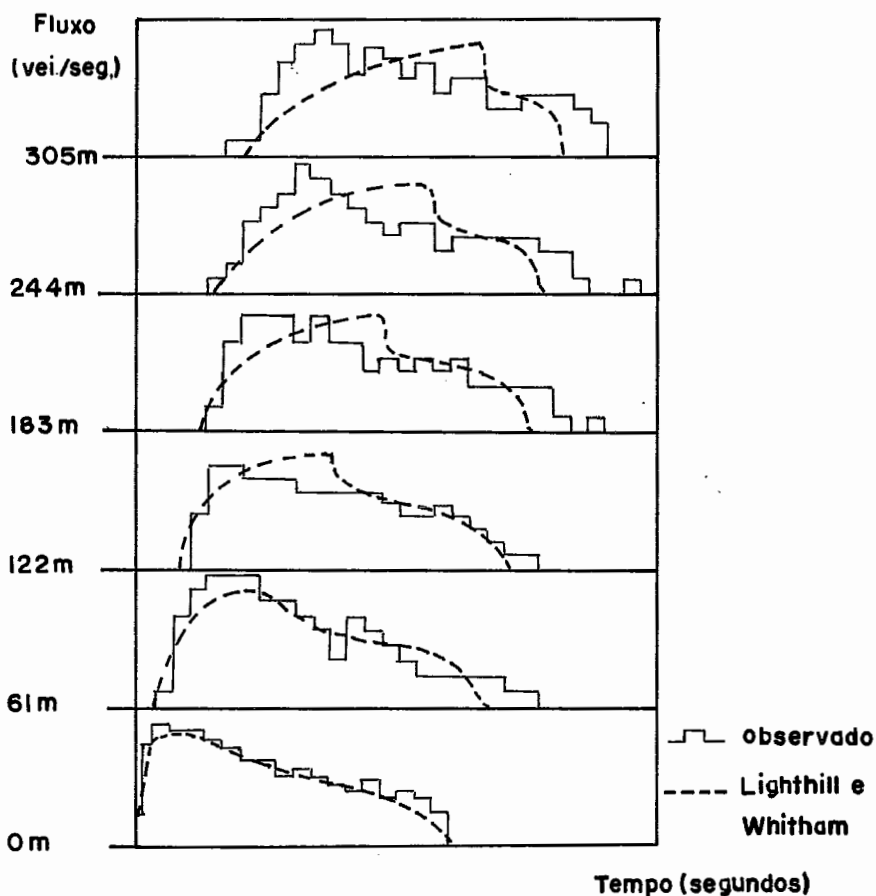


Figura II.3 - Comparação dos fluxos observados com os fluxos esperados, segundo a teoria de Lightill e Whitham.

Esta teoria tem sido criticada em relação a alguns pontos que serão mencionados a seguir. Este modelo não leva em conta o comportamento dos veículos líderes, nem as diferenças de velocidades em torno da média dentro do pelotão; além disso, o tamanho do pelotão permanece constante ao se deslocar ao longo da via, o que não é real, pois como se observa na Figura II.3 o pelotão experimenta uma dispersão. De fato esta teoria não considera o fenômeno de dispersão na sua totalidade, mas sim um

aspecto dele, que é a recomposição (rearranjo) dos fluxos dentro do pelotão.

É importante mencionar que a previsão da composição do pelotão mediante esta teoria é feita manualmente mediante uma representação gráfica muito trabalhosa.

A partir das pesquisas desenvolvidas por Lightill e Whitham, Pacey, em 1956, é introduzido um novo modelo de difusão dos fluxos. Pacey assumiu que a variação da forma de um pelotão incidente é consequência das diferenças de velocidades dos veículos que estão dentro do mesmo. Ele supôs também que não existia interferência notável entre os veículos do pelotão devido a estas diferenças de velocidade. A seguir, apresenta-se o modelo de Pacey.

Assume-se que a distribuição das velocidades dos veículos num pelotão de uma via  $f(v)$  é normal e que se mantém constante num trecho. Nesse sentido, é possível avaliar a distribuição dos tempos de viagem  $g(\theta)$ , até outro ponto da mesma. O fluxo que passa pelo primeiro ponto de observação em torno do instante  $t$ , durante o tempo  $dt$ , é  $q_1(t) \cdot dt$ , então, uma parte

$$q_1(t) g_{12}(T-t) dT dt \quad (\text{II.20})$$

destes veículos (a que corresponde a um tempo de viagem de  $(T-t)$ ) passará pelo segundo ponto em torno do instante  $T$ . O fluxo total que passa pelo segundo ponto será dado por

$$q_2(T) dt = \int_{-\infty}^{\theta_{\min}} q_1(t) \cdot g_{12}(T-t) dT dt \quad (\text{II.21})$$

onde  $\theta_{\min}$  é o tempo mínimo de viagem entre dois pontos.

Discretizando esta relação de forma a poder utilizar histogramas dos fluxos observados obtem-se:

$$q_2(j) = \sum_i q_1(i) g_{12}(j-i) \quad (\text{II.22})$$

onde  $i$  e  $j$  são intervalos discretos de tempo correspondentes ao primeiro e ao segundo ponto da via respectivamente.

A teoria prevê que os veículos líderes tenham uma velocidade maior que a velocidade média, e que os últimos veículos tenham velocidades inferiores à dita média.

Mediante o método de Pacey foram previstos os padrões em cinco pontos ao longo de uma via. Estes resultados foram comparados com dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados para cada intervalo, o que pode se apreciar na Figura II.4, onde se observa uma aproximação satisfatória para os pontos da via afastados de pelo menos 112 metros da linha de parada. A previsão para o ponto que fica a 61 metros não é dada, devido a que a aproximação das funções de probabilidade do tempo de viagem mediante histogramas não foi suficientemente boa para este ponto, mas a partir dos 112 metros, sendo o tempo de viagem maior, a aproximação resulta satisfatória.

O método de Pacey pode dar uma aproximação suficiente da dispersão dos pelotões a partir de uma boa escolha da velocidade média e de seu desvio padrão.

Uma terceira abordagem na previsão da dispersão dos pelotões foi desenvolvida por Robertson, em 1969, através da fórmula recursiva:

$$q_2(i+t) = F \cdot q_1(i) + (1-F) q_2(i+t-1) \quad (\text{II.23})$$

onde:  $q_1(i)$  = fluxo no  $i$  éximo intervalo de tempo para o pelotão inicial (na linha de parada) ponto 1

$q_2(i)$  = fluxo esperado para o pelotão que passa pelo ponto 2 qualquer da via no instante  $i$

$t = 0.8$  vezes o tempo médio de viagem correspondente ao trecho 1-2 da via, onde a dispersão do pelotão é estudada; este tempo pode ser dado em segundos ou em  $t$  intervalos (passos),

sendo o passo PA uma fração do ciclo (alguns segundos)

$$PA = \text{CICLO} / NP \text{ (segundos)}$$

CICLO = tempo de ciclo numa aproximação (segundos)

NP = número de intervalos em que será dividido o ciclo

F = fator de alisamento

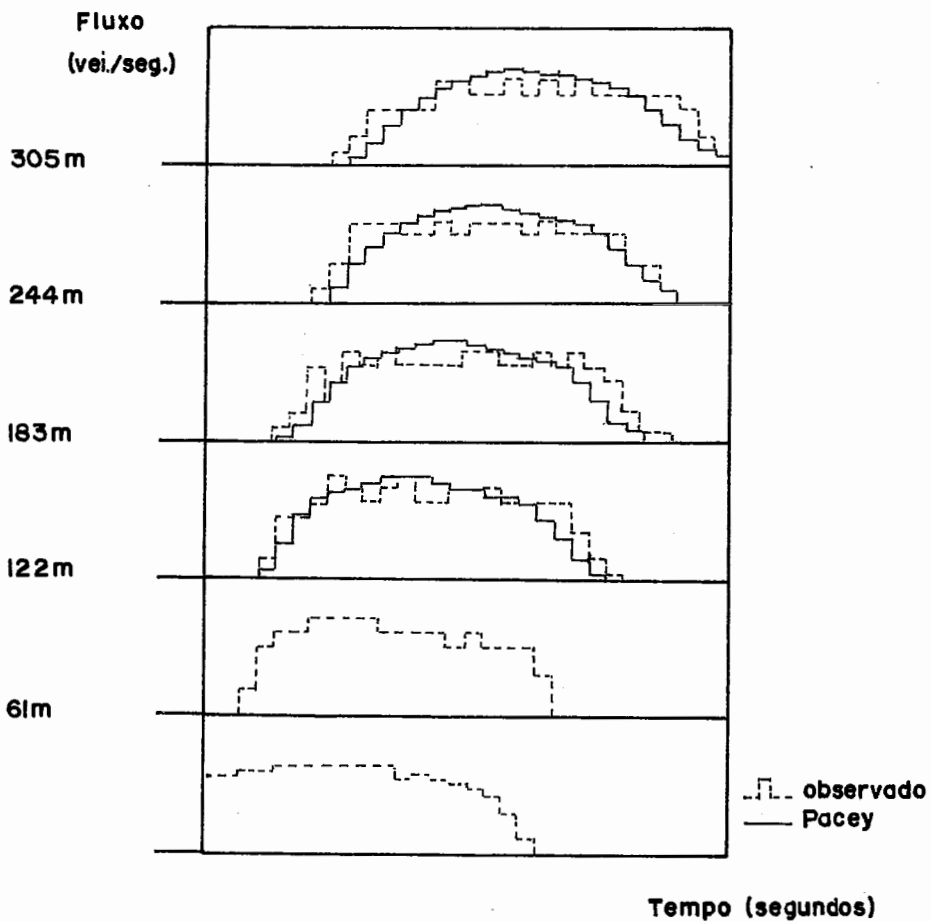
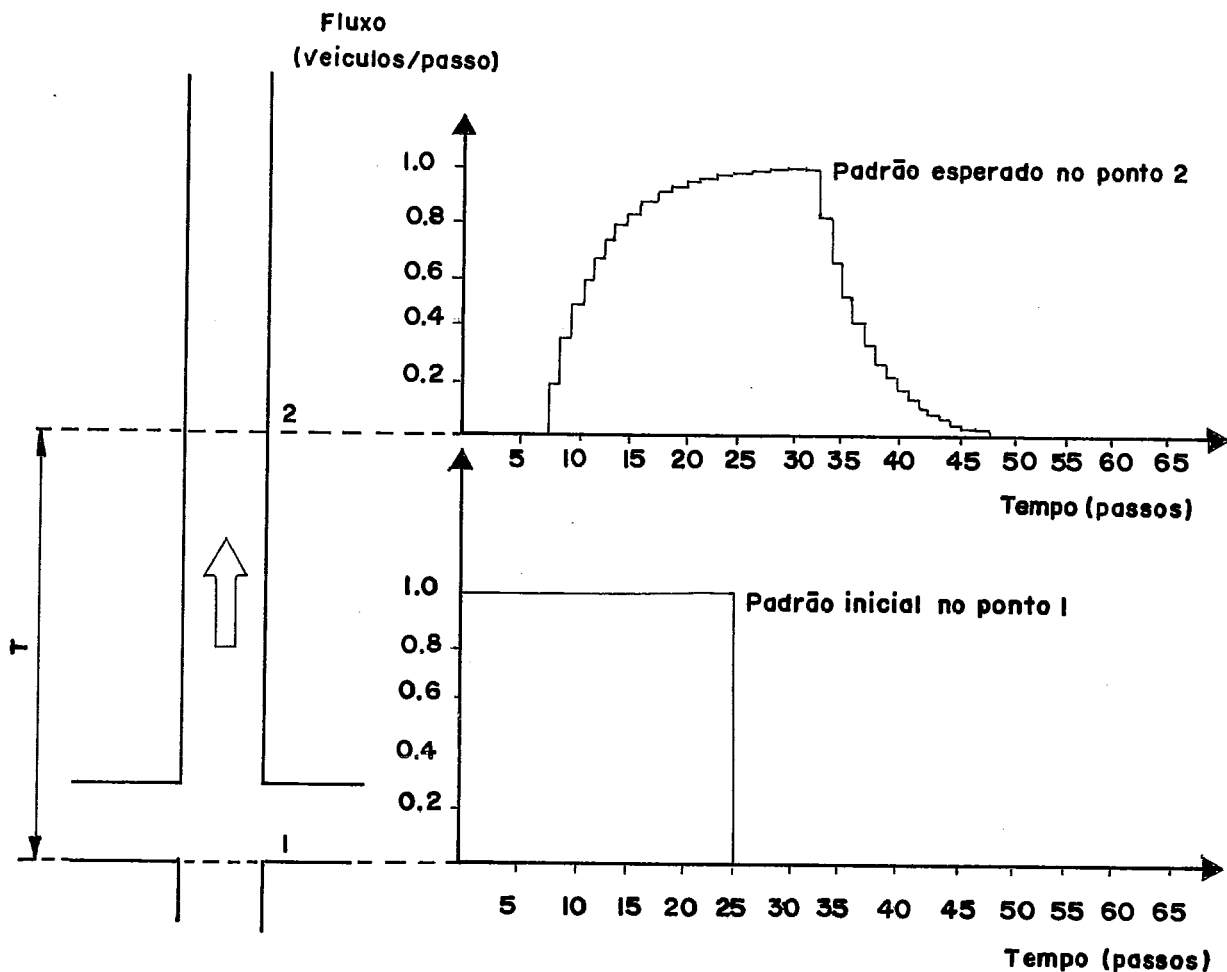


Figura II.4 - Comparação dos fluxos observados com os fluxos esperados, segundo a teoria de Pacey.

A figura II.5 apresenta um exemplo de dispersão de um pelotão retangular



$T$  = tempo médio de viagem = 10 passos

$t$  = tempo de chegada do veículo líder = 8 passos

Ciclo = 50 passos

$F$  = fator de alisamento, neste caso = 0.2

Figura II.5 - Dispersão de um pelotão retangular segundo o método de Robertson.

O tempo mínimo de viagem entre os dois pontos de observação é de 8 intervalos (ou passos) de dois segundos, portanto a relação II.23 será calculada a partir de

$$q_2(9) = F q_1(1)$$

$$q_2(10) = F q_1(2) + F(q_1 - q_2(9)) \quad (\text{II.25})$$

ou seja, o fluxo incidente no ponto 2 durante o intervalo de tempo  $t_0$  será igual à soma de uma parte do fluxo que passou no ponto 1 no instante  $t_0 - \tau$  e do que deixou de passar no instante anterior,  $t_0$ , no ponto 2.

Este processo continuará até que  $q_2(i+t)$  seja zerado. A utilização do tempo  $(i+t)$  é para garantir que o pelotão inicie sua chegada ao ponto 2 depois de  $t$  passos.

Para determinar o fator de alisamento  $F$ , Robertson fez experiências em 4 pontos de Londres, a partir dos quais determinou a seguinte equação para  $F$ :

$$F = 1/(1+0.5 t) \quad (\text{II.26})$$

Robertson considerou que os valores de  $F$  deveriam ser calculados em função de alguns fatores tais como: largura, inclinação, existência de estacionamentos laterais, e composição do fluxo na via. Outro parâmetro cuja introdução está simplificada é o tempo de viagem mínimo  $t$  que deveria depender de fatores locais e não simplesmente ser 0.8 vezes o tempo de viagem médio. Este modelo deu bons resultados em Londres; sua simplicidade faz que seja de fácil aplicabilidade, mas é importante mencionar que os valores de  $F$  e  $t$  precisam de uma pesquisa de campo detalhada.

Os dados requeridos para simular os fluxos com o método de Robertson são os seguintes: a constante 'a' para o cálculo do fator de alisamento  $F = 1/(1+ at)$ , o tempo médio de viagem desde a linha de parada até o ponto em que se espera que chegue o fluxo (em passos), e o volume do fluxo que sai da linha de parada para cada passo. Estes dados de fluxo são obtidos na via e ajustados de forma a eliminar os veículos que não ingressam nela. O valor de 'a' tem variado numa forma sistemática na determinação do melhor ajuste relativo aos dados colhidos em 5 pontos ao longo da via (para cada passo), aplicando-se o método dos mínimos quadrados; 't' tem variado, mas os valores escolhidos por Robertson (0.8 do tempo médio de viagem) tem sempre apresentado bons resultados. Na figura II.6 se apresentam os fluxos

reais e os fluxos esperados, calculados segundo o modelo de dispersão de Robertson.

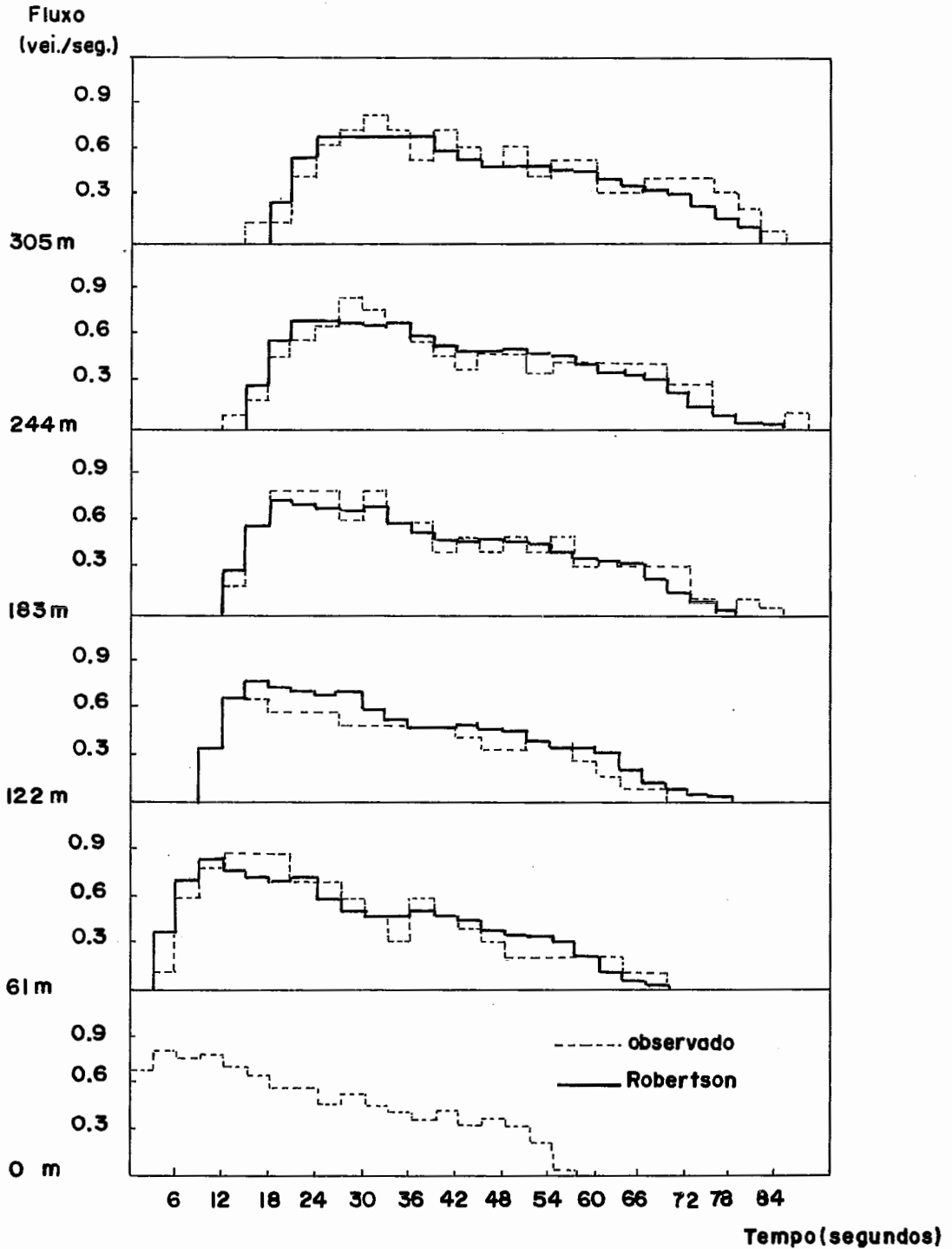


Figura II.6 - Comparação entre os fluxos observados e os obtidos segundo a teoria de dispersão de pelotão de Robertson.

Pode-se notar que o Modelo de Robertson tem também uma interpre

tação teórica. Assim fazendo uma expansão do segundo termo da equação recursiva II.23 , chega-se à seguinte expressão:

$$q_2(j) = \sum_{i=1}^{j-t} q_1(i) F(1-F)^{j-t-i} \quad (\text{II.27})$$

onde  $j$  é o contador dos intervalos de tempo no ponto 2 da via. A equação anterior pode ser comparada com a de Pacey (II.22)

$$q_2(j) = \sum_{i=1}^j q_1(i) g(j-i). \quad (\text{II.28})$$

a fórmula de Robertson é idêntica. Portanto Pacey escolheu uma distribuição normal do tempo de viagem  $g(j-1)$ , enquanto que a fórmula de Robertson corresponde a uma distribuição geométrica.

Em termos de cálculos, os dois métodos apresentam uma baixa complexidade, e são facilmente programáveis, mas o método de Robertson apresentou uma melhor aproximação, e conseguiu simular os pelotões para pontos da via que ficam próximos à linha de parada. Estes são dois pontos fundamentais que favorecem o método de Robertson em relação ao modelo de Pacey.

Em resumo, dos três métodos estudados se observa uma grande semelhança entre os métodos de Pacey e Robertson, além de que apresentam uma melhor aproximação e eficiência em comparação com o método de Lightill e Whitham.

Estudos comparativos têm sido realizados também com relação a modelos de perseguição do tipo microscópico . Por exemplo, na figura II.7 as previsões da dispersão de um pelotão obtidas através do modelo de Robertson e do modelo de simulação microscópica MULTISIM (GIPPS(20)) são apresentados. Nota-se que os dois modelos fornecem uma previsão praticamente idêntica, embora, o modelo de simulação microscópica, para chegar a este resultado, precise de um volume de cálculo muito maior.



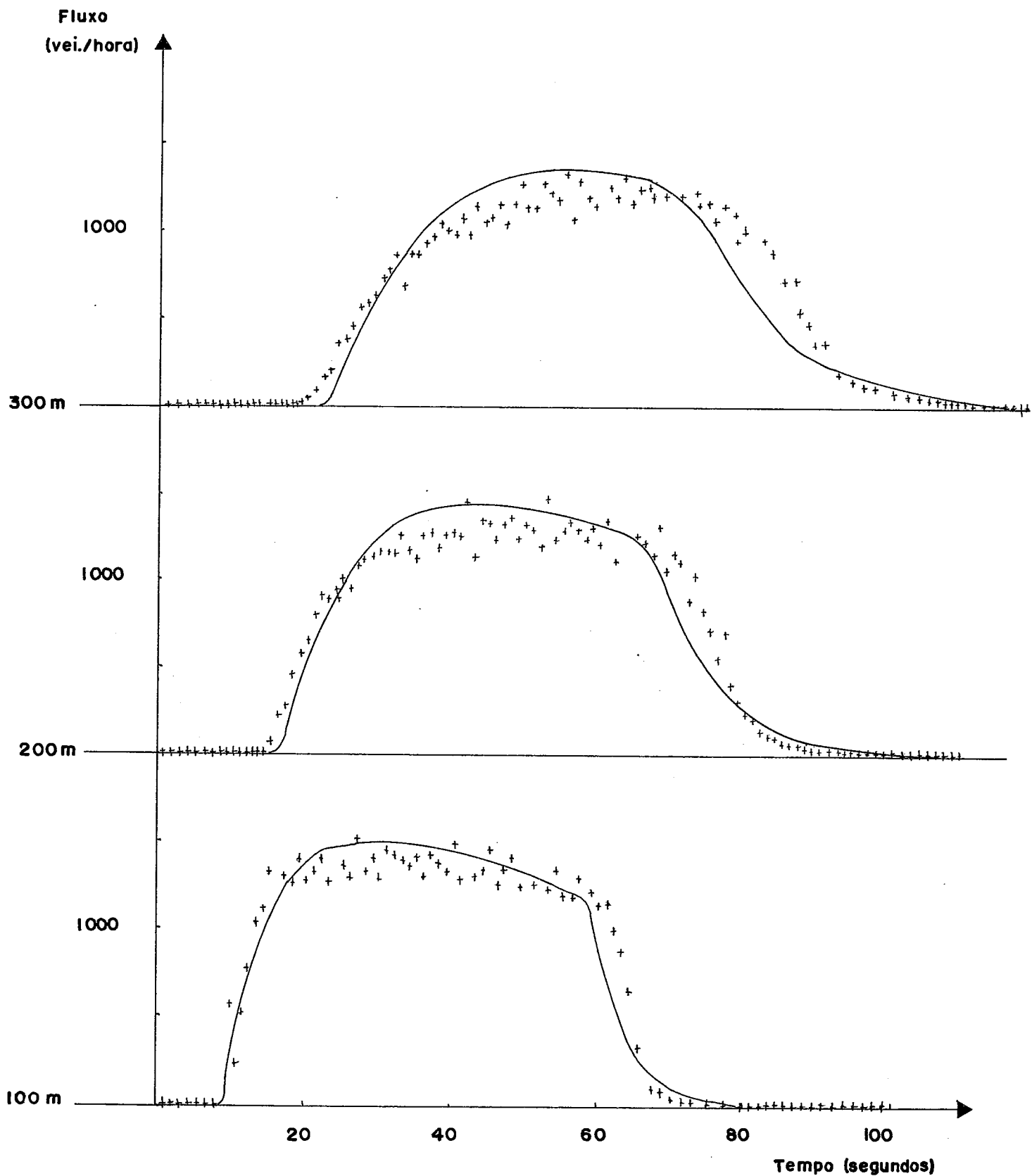


Figura II.7 - Comparação dos pelotões esperados segundo TRANSYT em (linha contínua), e os observados na simulação (+) mediante o MULTISIM.

## II.4 - CUSTOS DO TRÁFEGO URBANO

Os custos gerados pelos fluxos de tráfego urbano são de várias naturezas e afetam tanto o contorno do sistema de transporte como o próprio sistema. Na maioria dos estudos elaborados a este respeito, em países em desenvolvimento, só o segundo aspecto tem sido considerado, apesar do grau de importância do primeiro, em grandes cidades como São Paulo, México, Rio de Janeiro, Bogotá, Caracas, etc. Nestas, os custos suportados pela sociedade se apresentam muito altos como consequência de níveis de poluição ambiental (sonora e química) críticos que alteram diretamente o comportamento e a saúde dos indivíduos.

Em relação aos custos suportados pelos próprios usuários do sistema de transporte urbano, podem-se citar os seguintes:

- custos dos acidentes;
- custo (direto) do combustível ou preço da passagem dos ônibus;
- custos ligados ao nível de serviço existente (duração dos atrasos, número de paradas e outros tipos de desconforto).

A respeito do primeiro tipo de custos, a atuação de um sistema de controle de tráfego deverá ter uma influência mínima, sendo possível uma minimização destes custos através da implantação de um plano de circulação da cidade e de sinalização fixa (horizontal e vertical) do tráfego urbano.

Em relação ao segundo tipo de custos, o custo do combustível, poderá ser considerado como elemento base pois o nível das tarifas de ônibus é calculado muitas vezes a partir do custo operacional das linhas, no qual o item combustível gasto representa uma boa parte. Além disso, o sistema de transporte urbano concorre para o gasto energético do país, que no caso do Brasil, corresponde a hidrocarburetos importados o que contribui

no desequilíbrioda balança de pagamentos. Vários modelos de previsão do consumo de combustível, tanto a nível microscópico como macroscópico, têm sido desenvolvidos RODRIGUEZ J. e NOVAES A.(40). Por exemplo, pode-se citar o modelo (AKCELIK(01)) expressado por:

$$f = f_1 l + f_2 d_s + f_3 h \quad (\text{II.29})$$

onde:

$f$  = consumo médio de combustível por veículo (L/veículo)

$f_1$  = taxa de consumo de combustível enquanto o veículo está se movimentando (L/veículo-Km)

$f_2$  = taxa de consumo de combustível enquanto está parado (L/veículo-hora)

$f_3$  = taxa de consumo de combustível associada a cada parada (L/parada)

$l$  = distância percorrida (Km)

$d_s$  = tempo que o veículo permanece detido (horas)

$h$  = número total de paradas por veículo

( $f, d_s$  e  $h$  são valores médios para todos os veículos, parados e em movimentação).

Na Figura II.8 se observa a trajetória de um veículo que faz uma parada completa, desacelerando de uma velocidade constante até atingir a velocidade nula, e voltando após um certo tempo parado a acelerar até chegar à velocidade constante anterior. Os parâmetros da figura são os seguintes:

$V_c$  = velocidade de cruzeiro

$l'$  = distância total percorrida

$t_c = l/V_c$  = tempo de viagem sem perturbações

$d$  = tempo perdido

$t = t_c + d$  = tempo de viagem com perturbações



	a velocidade de cruzeiro $f_1$ (L/veic.-Km)	sem movimento $f_2$ (L/veic.-hora)	Por cada para- da $f_3$ (L/parada)
veículos leves	0.100	2.200	0.040
veículos pesados	0.120	2.500	0.080
veículos compos- tos*	0.102	2.230	0.044

\* 10% de veículos pesados

Tabela II.1 - Dados de consumo de combustível (gasoli-  
na) para uma velocidade de 60 (Km/hora).

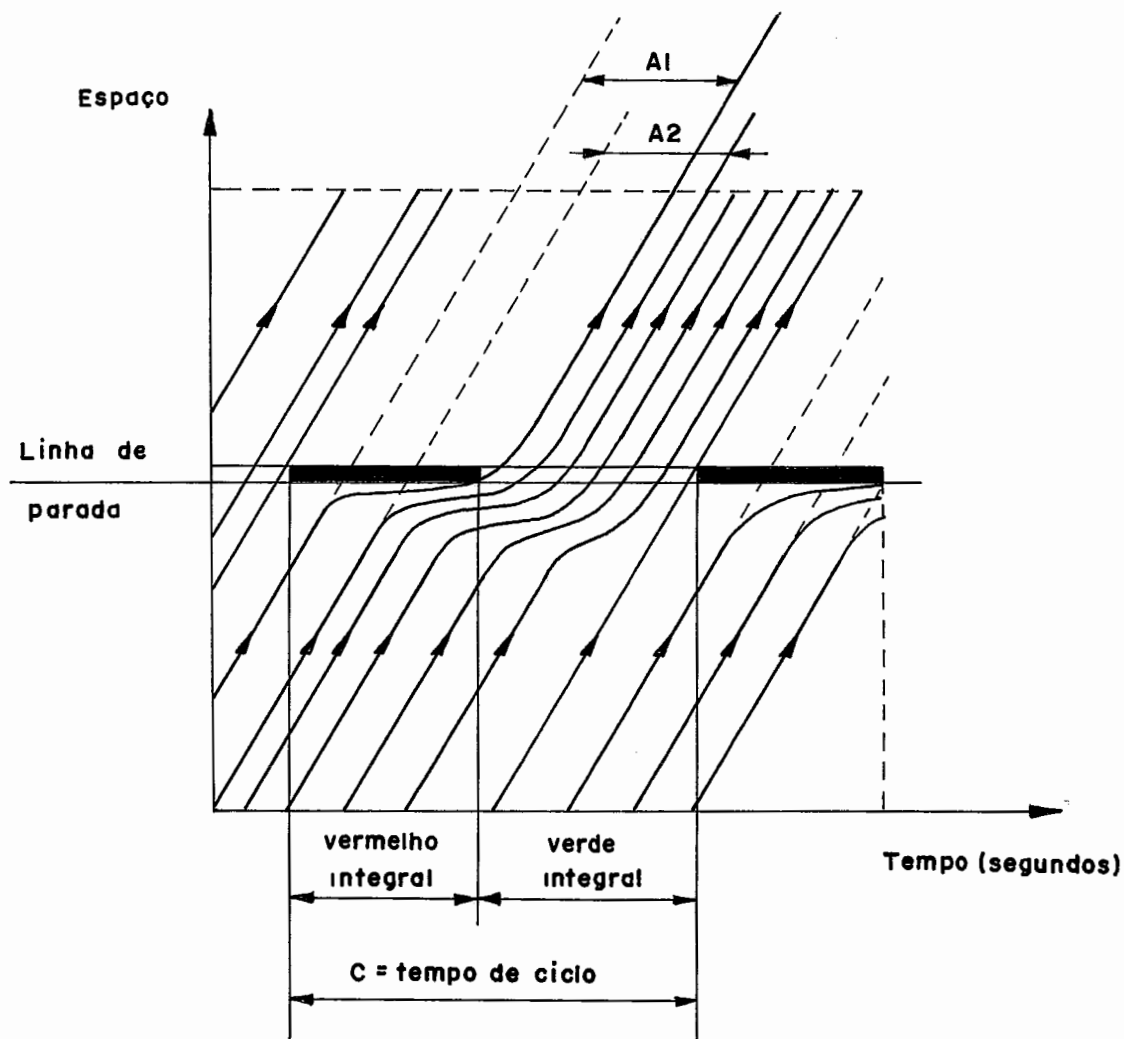
	a velocidade de cruzeiro $f_1$ (L/veic.-Km)	sem movimento $f_2$ (L/veic.-hora)	Por cada parada $f_3$ (L/parada)
CLAFFEY (05)	0.108	2.385	0.048
BAVER (02)	-	1.893	0.126
COURAGE e PARAPAR (09)	-	2.271	0.038
DART e MANN (12)	0.112	2.366	0.025
ROBERTSON et al (37)	0.094	1.500	-

Tabela II.2 - Dados de consumo de combustível (gasoli-  
na) segundo vários autores.

Em relação ao nível de serviço, a atuação do sistema de controle de tráfego será fundamental. Este nível de serviço agrega vários elementos de custo do tráfego urbano, um deles o atraso ao nível de uma interseção, é analisado mais detalhadamente. Na figura II.9 são representados segundo um diagrama espaço-tempo vários atrasos individuais ao nível de aproximação de uma interseção urbana isolada.

Numerosos estudos têm sido feitos para estimar os atrasos

a nível das interseções. O mais famoso deles, desenvolvido por WEBSTER(50) se apresenta da seguinte forma:



**A1 = atraso sofrido pelo primeiro veículo**

**A2 = atraso sofrido pelo segundo veículo**

Figura II.9 - Atrasos que sofrem os veículos ao chegar na aproximação de uma interseção controlada por um semáforo.

$$A_m = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\gamma)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \frac{c^{1/2}}{q^2} x (2+5\lambda) \quad (\text{II.30})$$

onde:

$A_m$  = atraso médio por veículo(segundos);

$c$  = tempo de duração de ciclo semaforico(segundos);

$g$  = tempo de verde(segundos);

$\lambda$  =  $g/c$  = fração do ciclo na qual o sinal está aberto; (II.31)

$q$  = fluxo médio(veículo/hora);

$s$  = fluxo de saturação(veículo/hora);

$y$  =  $q/s$  = taxa de ocupação da aproximação; (II.32)

$x$  =  $(qc)/(sg)$  = taxa de saturação da aproximação (II.33)

$$x = \frac{\text{fluxo que chega à linha de parada(demanda de serviço)}}{\text{capacidade máxima de escoamento(oferta de serviço)}}$$

Na equação (II.30), o primeiro termo corresponde ao atraso médio no caso de um fluxo uniforme de chegada; o segundo leva em conta a distribuição aleatória dos instantes de chegada(modelo de Poisson) e o terceiro constitui um fator de correção cuja influência no atraso pode ser de até 18%. Na prática só os dois primeiros termos têm sido utilizados.

A seguir, será considerada a estrutura em pelotões do fluxo de tráfego na avaliação dos atrasos sofridos pelos veículos(MORALES E.A. (32)). Estes atrasos vão depender da defasagem entre o instante de chegada da frente do pelotão e o início das fases de verde. Assim, consideram-se três casos:

- caso em que o pelotão chega no vermelho;
- caso em que o veículo líder do pelotão chega no fim do vermelho;
- caso em que o veículo líder chega durante o verde;

Em qualquer dos três casos se supõe que a fila é escoada no fim do verde, o que permite limitar o estudo a um único ciclo.

Definindo:

$A$  = atraso dos veículos durante um ciclo;

$d$  = atraso médio por veículo(segundos/veículo);

$t_0$  = instante de chegada do veículo líder do pelotão(segundos);

$k$  = comprimento do pelotão(segundos);

$q$  = fluxo médio do pelotão(veículos/segundo);

$s$  = fluxo de saturação(veículos/segundo);

$c$  = tempo de ciclo(segundos);

$r$  = instante de início do verde(segundos);

$t_x$  = tempo de escoamento da fila.

a. - se o pelotão chega inteiramente durante o período de vermelho (II.10),

ou seja se,

$$\begin{aligned} & 0 \leq t_0 < r \\ & e \\ & t_0 + k < r \end{aligned} \quad (II.34)$$

Neste caso o atraso total está dado por

$$A = \int_{t_0}^{t_0+k} q(t-t_0) dt + \int_{t_0+k}^{t_x} q k dt - \int_r^{t_x} s(t-r) dt \quad (II.35)$$

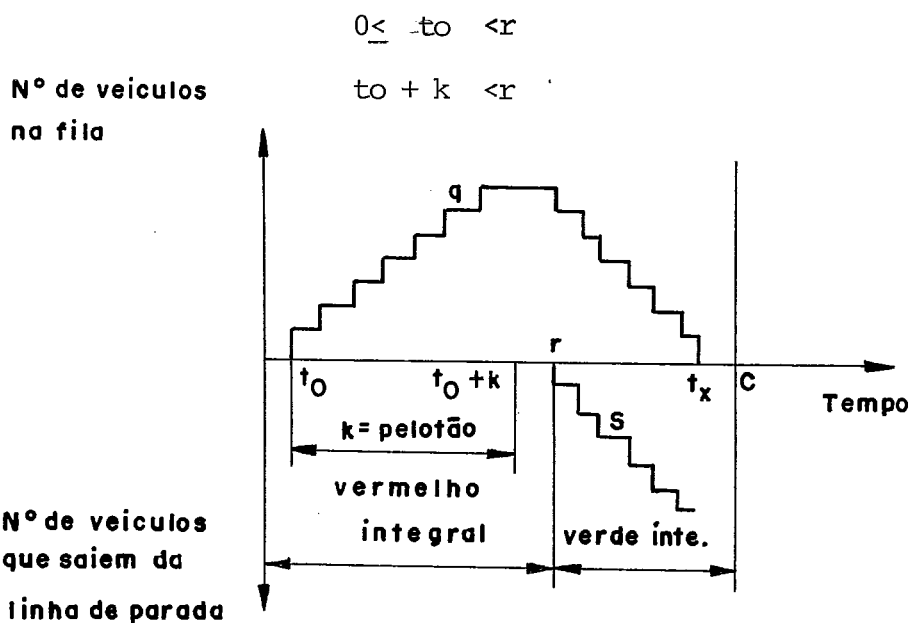


Figura II.10 - O atraso sofrido por um pelotão cujo veículo líder chega durante o vermelho  $t_0$ .



A relação (II.35) se reescreve:

$$A = \frac{1}{2} qk^2 + qk(tx - to - k) - \frac{1}{2}(5(tx - r)^2) \quad (II.36)$$

e tendo

$$s(tx - r) = q.k \quad (II.37)$$

então

$$A = qk(r - to - \frac{1}{2} k (1 - \frac{q}{s})) \quad (II.38)$$

portanto o atraso médio será

$$\bar{d} = r - to - \frac{1}{2} k (1 - \frac{q}{s}) \quad (II.39)$$

b. - Se o veículo líder chega durante o vermelho, tem-se o caso representado na Figura(II.11).

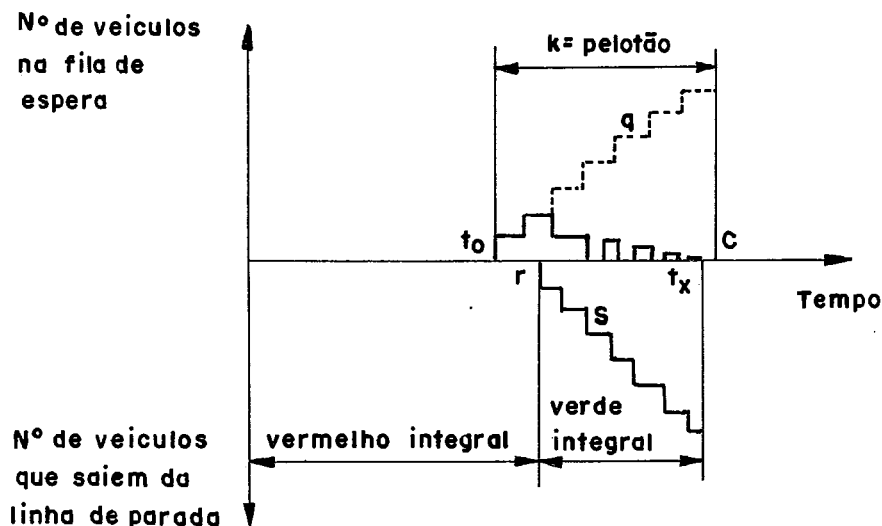


Figura II.11 - Atraso sofrido por um pelotão cujo veículo líder chega no final do vermelho.

Neste caso se tem:

$$\begin{aligned} 0 &\leq t_0 < r \\ r &< t_0 + k < c \end{aligned}$$

e

$$A = \int_{t_0}^{tx} q(t-t_0) dt - \int_r^{tx} s(t-r) dt \quad (\text{II.40})$$

ou ainda:

$$A = \frac{1}{2} q(tx - t_0)^2 - \frac{1}{2} s(tx-r)^2$$

além disso

$$s(tx-r) = q(tx-t_0)$$

então:

$$A = \left( \frac{1}{2} \right) q \cdot (r-t_0)^2 / (1-q/S) \quad (\text{II.41})$$

em consequência o atraso médio por veículo neste caso é:

$$\bar{d} = (1/2k) (r-t_0)^2 / (1-q/S) \quad (\text{II.42})$$

c.- Se o veículo líder chega durante o período de verde, e continuam chegando veículos durante o vermelho, tem-se o caso representado na Figura II.12.

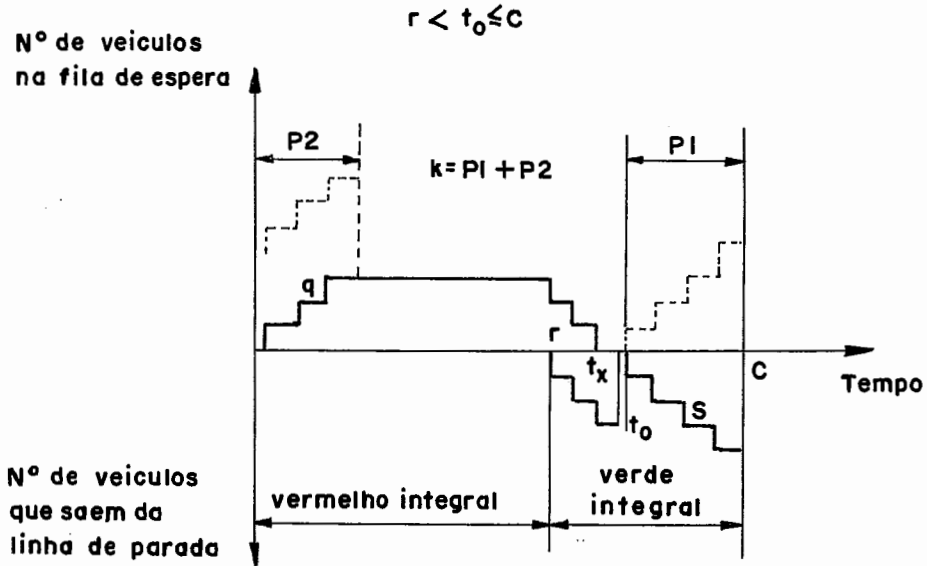


Figura II.12 - Atraso sofrido por um pelotão cujo veículo líder chega no tempo de verde

neste caso se tem:

$$e \quad \begin{aligned} r &< t_0 \leq c \\ t_0 + k &> c \end{aligned}$$

O atraso total se compõe de duas partes. A primeira delas  $A_1$  refere-se aos atrasos ocorridos durante o período verde, enquanto que a segunda parcela  $A_2$  corresponde aos atrasos durante o período vermelho.

$$A_1 = (1/2)q \cdot \left( (r - t_0)^2 / (1 - q/s) \right) \quad (\text{II.42})$$

onde:

$$r_1 = r + (t_0 + k - c) \frac{q}{s} \quad (\text{II.43})$$

$$A_2 = q(t_0 + k - c) \left[ r - \frac{1}{2}(t_0 + k - c) \left( 1 - \frac{q}{s} \right) \right] \quad (\text{II.44})$$

O atraso total será dado por:

$$A = A_1 + A_2 \quad (\text{II.45})$$

portanto o atraso médio por veículo será:

$$\bar{d} = A/(qk) \quad (\text{II.46})$$

Utilizando as equações anteriores, para os diferentes casos, variando unicamente o tempo de chegada do veículo líder do pelotão e mantendo constantes os demais parâmetros, observa-se uma variação dos atrasos como representada na Figura II.13 para dois tempos de ciclo diferentes.

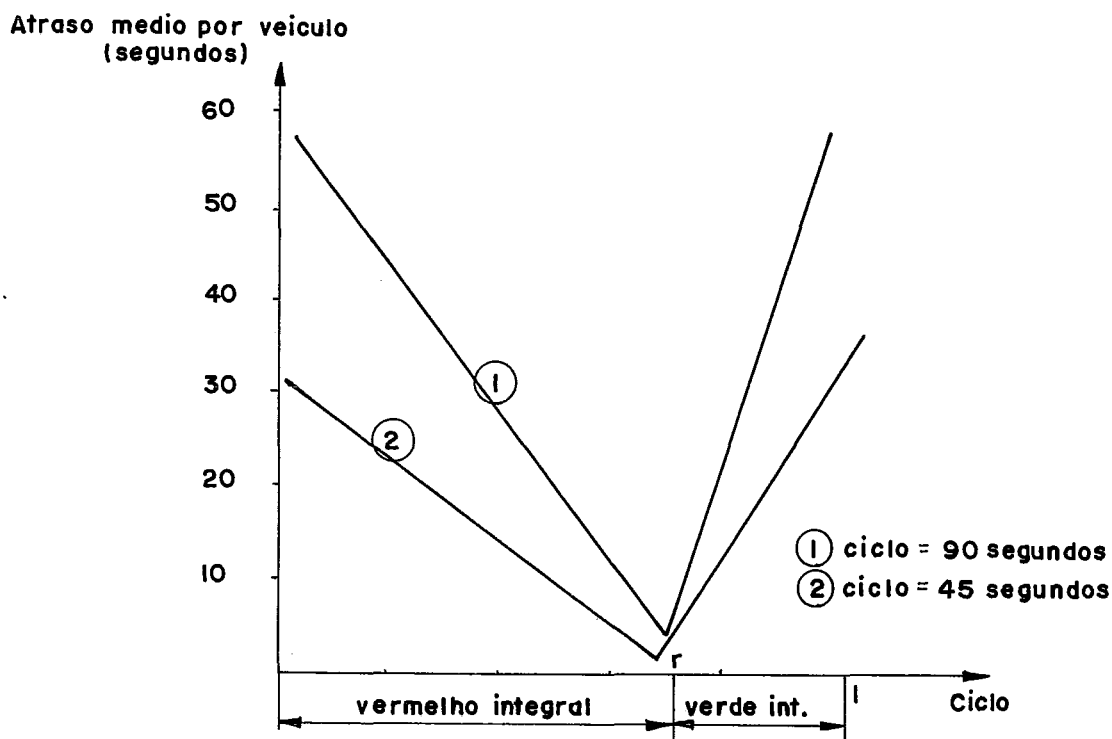


Figura II.13 - Variação do atraso médio para um pelotão de veículos em função do instante de chegada de seu veículo líder.

Da figura anterior se conclui que o menor atraso se consegue quando o veículo líder chega à linha de parada pouco antes de que se inicie o intervalo de verde.

De uma forma geral, o atraso médio varia em função do tempo de distribuição da chegada do pelotão na linha de parada, desde que as demais condições permaneçam constantes. Nota-se também que em ciclos mais longos, o atraso médio é maior. Como já foi observado, o perfil de um pelotão não é geralmente constante ( $q \neq \text{cste}$ ), portanto este caso mais simples já

permite tirar algumas conclusões em relação a defasagem a oferecer entre interseções sucessivas.

CAPÍTULO III - SISTEMAS DE CONTROLE DO TRÁFEGO  
URBANO

### III - SISTEMAS DE CONTROLE DO TRÁFEGO URBANO

#### III.1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos sistemas de controle do tráfego tem acompanhado o aumento do tráfego urbano devido à generalização do uso do automóvel. Na atualidade existe uma ampla variedade de técnicas e equipamentos de controle do tráfego urbano. O principal avanço tecnológico, sobre o assunto, ocorrido nas últimas décadas, foi a introdução de sistemas de controle baseados no computador. Centenas de equipamentos têm sido instalados no mundo ou estão em desenvolvimento na atualidade em várias cidades. O computador digital foi introduzido pela primeira vez em 1960 no sistema de controle de tráfego urbano da cidade de Toronto no Canadá. Em seguida, outros sistemas foram instalados na Escócia na cidade de Glasgow, Inglaterra e nos Estados Unidos nas cidades de San José e Wichita Falls. Na década de setenta, o "hardware" e o "software" se tornou mais versátil, mais rápido e menos custoso, e os procedimentos de cálculo se sofisticaram notavelmente. Ao mesmo tempo, um grande esforço foi aplicado no desenvolvimento de novas estratégias mais sensíveis às condições atuais de tráfego.

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos de controle de tráfego. Uma breve análise das várias filosofias de controle de tráfego urbano existentes, assim como das estruturas de controle correspondentes é realizada. Finalmente são apresentados de forma sucinta os diversos sistemas de "controle de tráfego em área" (CTA), existentes no Brasil.

#### III.2 - ELEMENTOS BÁSICOS PARA O CONTROLE SEMAFÓRICO

O objetivo de um sistema de controle de tráfego urbano é de minimizar conjuntamente os vários itens de custo relacionados no capítulo anterior. Várias técnicas têm sido desenvolvidas na área de Engenharia de Tráfego, com este fim. Na tabela III.1 AKCELIK(01), algumas delas são listadas com suas possíveis consequências em termos qualitativos no que diz respeito ao nível de serviço, custo energético e segurança.

Medidas de gerenciamento do sistema de tráfego	Nível de serviço			Consumo de Combustível	Segurança
	Velocidade	Atraso	Paradas		
Controle coordenado dos sinais numa área de tráfego	=	+	+	+	+
Melhoria na geometria das interseções (Ex. faixas adicionais para movimentos giratórios)	=	+	+	+	+
Redefinição das fases dos sinais luminosos	=	+	+	+	+
Otimização dos tempos dos sinais para minimizar o consumo de combustível	=	-	+	+	?
Criação de vias prioritárias	?	-	-	-	?
Sistemas de prioridade para pedestres	=	-	-	-	?
Limitação de movimentos giratórios	-	+	+	+	+
Sistemas de vias de sentido único	-	+	+	+	+
Mudança de sentido em função do horário	=	+	+	+	?
Limitações de estacionamento	=	+	+	+	+
Sistema de informação do melhor caminho	+	+	+	+	+
Controle de acesso	?	+	+	+	?
Controle de velocidade	=	-	+	+	+

+ melhoria - deteriorado = inalterado ? indeterminado ou muito variável

TABELA III.1 - Efeitos esperados ao aplicar diferentes medidas de gerenciamento de um sistema de tráfego



O controle semaforizado tem se revelado dentro dos sistemas automáticos de controle de tráfego, o mais flexível e adaptável às condições do tráfego urbano, assim como o mais viável em termos técnicos e econômicos.

Tradicionalmente os sistemas de controle semaforizados apresentam uma periodicidade na sua atuação no tráfego. Este período ou "ciclo", geralmente fixo nos sistemas mais simples, pode variar em função das diversas condições (na hora do dia, situação do tráfego) nos sistemas mais recentes.

A sinalização luminosa de uma interseção (auxiliada de forma constante pela sinalização horizontal e vertical) permite repartir no tempo uma área comum a vários usuários que vão realizar movimentos conflitivos (tanto assim que os principais critérios para implantação de tais sinais luminosos levam em conta o número de conflitos potenciais existentes, assim como o número de acidentes ocorridos no local). Na figura III.1 (CURY P. (10)) é representada uma interseção com duas aproximações assim como os movimentos permitidos nela.

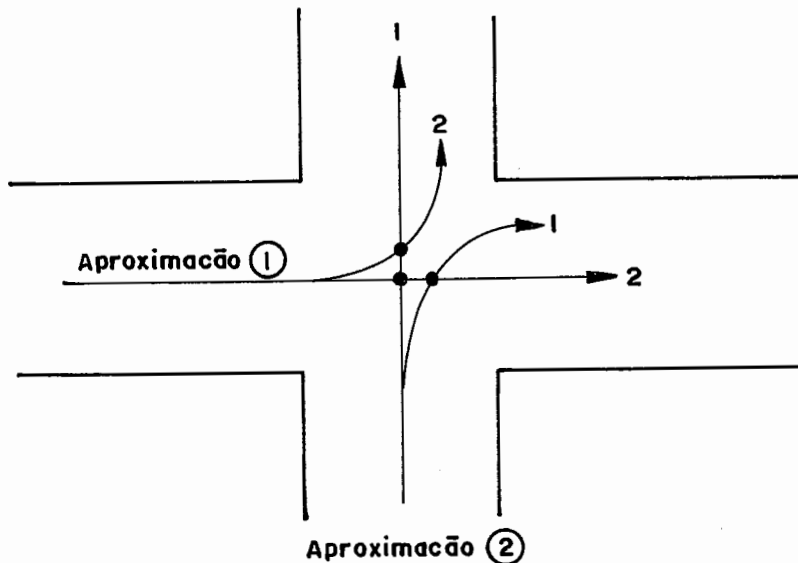


Figura III.1 - Exemplo de movimentos permitidos numa interseção simples.

Nota-se a presença de três pontos de conflito. Para eliminá-los divide-se os movimentos em dois grupos 1 e 2, definindo assim duas "fases" como apresentados na figura III.2.

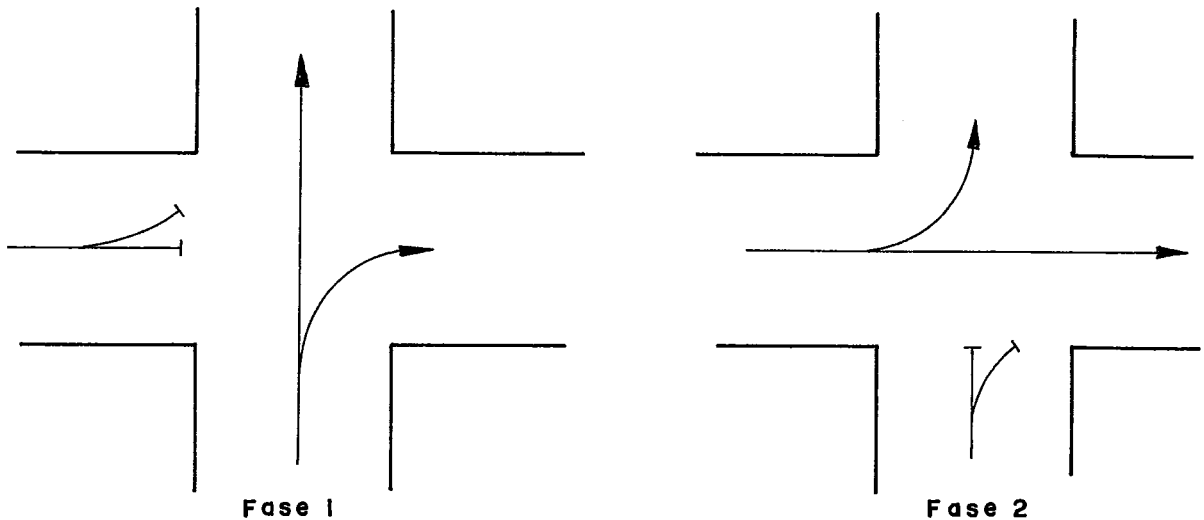


Figura III.2 - Representação das fases numa interseção simples.

A cada uma destas fases é alocada uma parte do tempo total do ciclo (tempo de verde). Cada período de verde interrompido define assim um "estágio". Geralmente por medidas de segurança, a passagem de um estágio de verde ao seguinte é feita de forma gradual, criando-se um estágio intermediário (amarelo) de duração variável em função da geometria da interseção (2 a 4 segundos), assim com um período em que todos os sinais estão vermelhos, o "vermelho integral". Por exemplo, na Figura III.3 apresentam-se os possíveis tempos atribuídos aos estágios correspondentes à Figura III.1.

Os tempos de verde atribuídos a cada fase constituem um dos parâmetros principais do sistema de controle de tráfego. Outro parâmetro importante é constituído pela "defasagem" existente entre a sinalização luminosa de interseções sucessivas, (se a periodicidade for idêntica ou múltipla) permitindo a coordenação entre estes sinais e favorecendo o fenómeno conhecido pelo nome de "onda verde". Devido à estrutura malhada da rede urbana, tais ondas verdes são muitas vezes impossíveis de

serem realizadas.

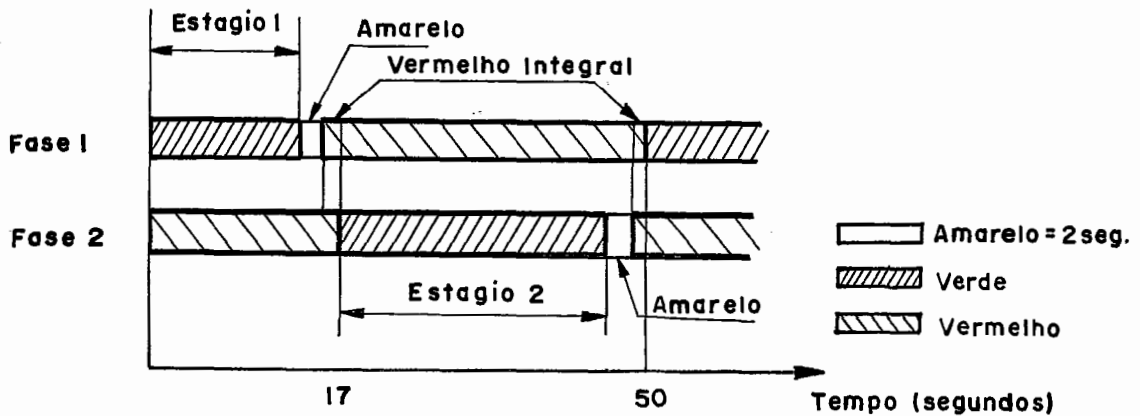


Figura III.3 - Repartição dos tempos de verde entre os dois estágios de uma interseção simples.

A seguir são apresentados alguns elementos, que caracterizam a influência dos parâmetros de controle citados (duração do ciclo, tempo de verde e defasagem) sobre o nível dos custos de transporte. Na Figura III.4 (SALTER J. (41)) apresenta-se a influência da duração do ciclo no atraso médio por veículo.

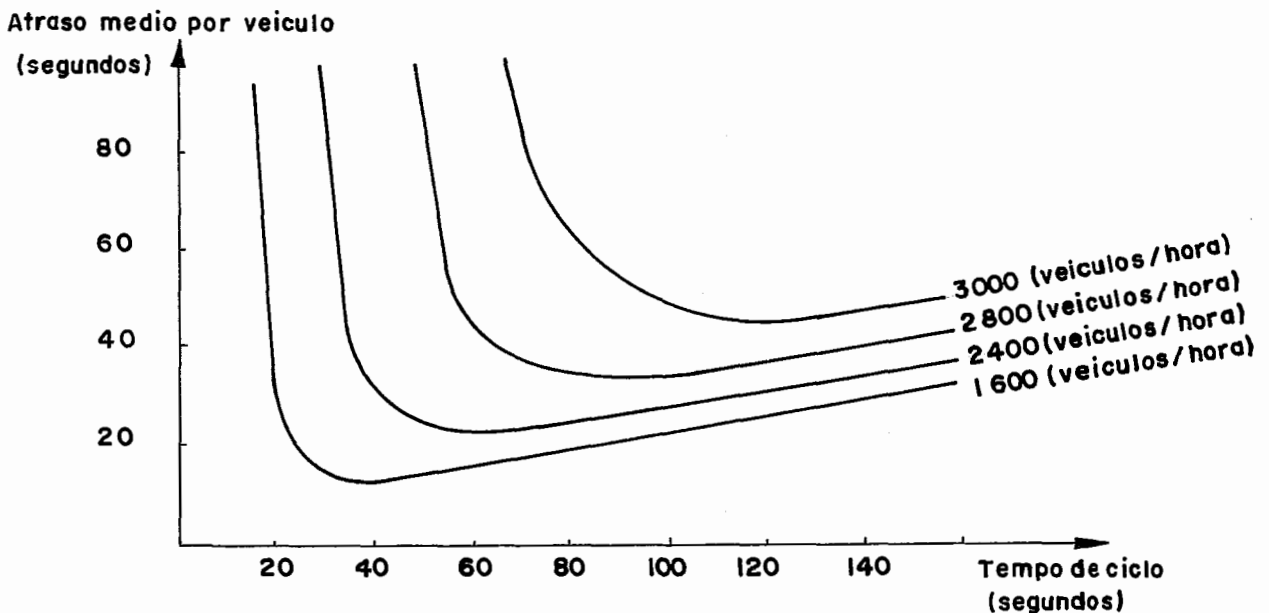


Figura III.4 - Atraso médio por veículo em função do tempo de ciclo para uma interseção de duas fases com fluxos de saturação de 1800 veículos/hora, tempos de verdes iguais e 10 segundos de tempo total perdido.

Da análise desta influência chegou-se à conclusão que no caso de uma interseção isolada o tempo do ciclo que minimiza o atraso médio por veículo é dado pela expressão:

$$C_o = \frac{1.5L+5}{1-y} \quad (\text{III.1})$$

onde:

$C_o$  = tempo de ciclo ótimo para a interseção estudada;

$$L = \text{tempo total perdido no ciclo} = \sum_{i=1}^{NF} (P_i + V_i); \quad (\text{III.2})$$

$$Y = \sum_{i=1}^{NF} y_i \text{ (somatório num ciclo das taxas de ocupação máxima de cada uma das fases);} \quad (\text{III.3})$$

$y_i$  = taxa de ocupação máxima da fase  $i$ ;

$NF$  = número total de fases da interseção estudada;

$P_i$  = tempo total perdido no início e no fim do verde da fase  $i$ ;

$V_i$  = tempo de vermelho integral da fase  $i$ ;

Também demonstrou-se de forma empírica que o tempo de verde alocado a cada estágio devia ser proporcional à solicitação do mesmo, conduzindo à seguinte expressão:

$$g_i = \frac{y_i}{Y} (C_o - L) + P_i - AM \quad (\text{III.4})$$

onde:

$g_i$  = tempo de verde para a fase  $i$ ;

$y_i$  = taxa de ocupação máxima da fase  $i$ ;

$Y$  = segundo(III.3);

$C_o$  = segundo(III.1);

$L$  = segundo(III.2);

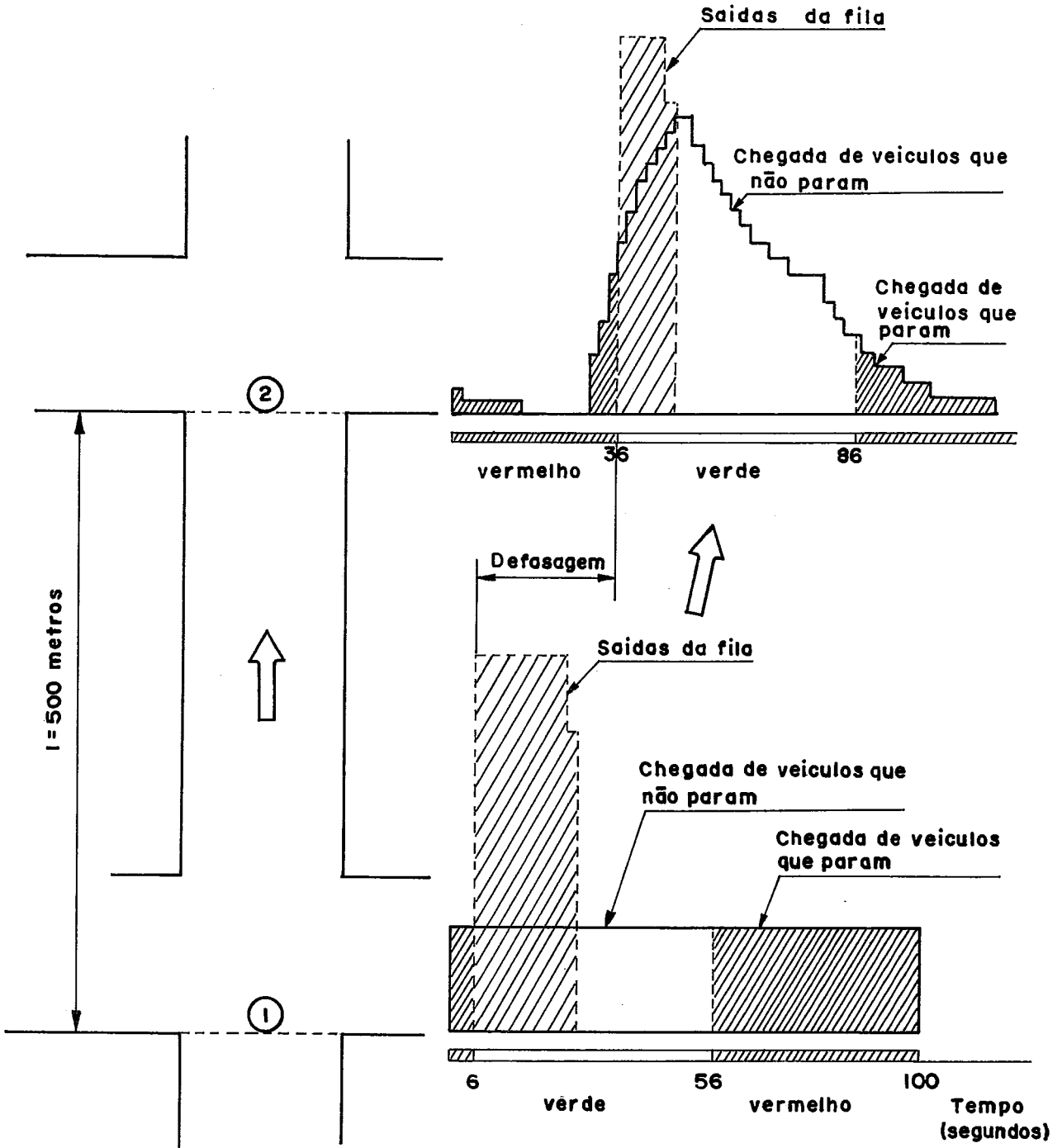
$P_i$  = tempo total perdido no início e no fim do verde da fase  $i$ ;

$AM$  = tempo de amarelo da fase  $i$ ;

Em relação à defasagem, não existem modelos analíticos que permitam determinar no caso de uma rede malhada, a defasagem ótima entre duas interseções. Os principais fenômenos que são levados em conta para avaliar a influência da defasagem sobre os custos de tráfego urbano são a formação de filas e a dispersão dos pelotões. Estes fenômenos são representados na Figura III.5 AKCELIK (01). Na Figura III.6 AKCELIK (01) a influência da defasagem sobre o consumo de combustível, o atraso médio por veículo e o número de paradas são representados. Nota-se que existe uma faixa estreita para a qual estes três elementos de custo se tornam mínimos. Também nota-se o grau de dependência destes custos em relação ao parâmetro de defasagem.

A definição de um conjunto de parâmetros (tempo de ciclo comum ou não, repartição de verdes e de defasagem) para as diferentes interseções que pertencem a uma área urbana, conduz à noção de "Plano de Sinalização". Em geral, os sistemas de controle de tráfego urbano a tempo fixo implementam tais planos desenvolvidos, calculados e/ou armazenados no sistema de controle de tráfego, os planos de sinalização resumem os tipos de atuação a serem implementados numa mesma área urbana durante certo período do dia. Recentemente, apareceram também outros tipos de sistemas de controle, os sistemas atuados pelo tráfego, ou sistemas "on line", onde a periodicidade na atuação da sinalização não é mais realizada, dependendo a mesma dos níveis atuais da demanda de serviço pelo tráfego. Estes sistemas têm tido sucesso só no caso de interseções isoladas, ou quando os fluxos urbanos são muito baixos (de madrugada), apresentam grandes dificuldades de "software" KENZO J. (27) e altos custos de investimentos apesar do desenvolvimento da tecnologia do microprocessador. Portanto, mesmo estes sistemas precisam da fixação de vários parâmetros (tempos de verde mínimos, tempos de vermelho máximos, ...), parâmetros que poderiam ser incluídos num plano de sinalização concebido num sentido mais amplo. Em relação à medição dos fluxos de tráfego urbano, um dos elementos fundamentais da cadeia de medição - decisão-ação do sistema de controle de tráfego urbano, poucos tipos de sistemas automatizados existem. No caso mais tradi-

cional, realizam-se pesquisas de campo que acarretam altos custos de mão de obra e conduzem a resultados de pouca precisão e representam uma fotografia de uma situação momentânea, só permitindo avaliar a variabilidade destes dados através de estudos complementares onerosos. Sistemas de detecção e de contagem automática têm sido desenvolvidos nas últimas décadas, estes apresentam vários problemas na sua utilização (contagem dupla, identificação errada) e na sua manutenção. A maioria deles se baseiam na tecnologia do laço indutivo. Estes detetores permitem medir o fluxo de tráfego, a taxa de ocupação, a velocidade individual, e os mais sofisticados conseguem fazer até uma contagem classificatória (carros de passeio, camionete, caminhão e ônibus, caminhão com reboque). Estes sistemas de detecção podem ser acoplados a simples acumuladores ou a sistemas que apresentam uma inteligência local (controlador atuado isolado) ou a uma inteligência central (sistema de controle em área). O uso destes sistemas de detecção permite identificar dentro dos fluxos de tráfego de uma área urbana os "padrões de fluxo" constituídos por dados sobre o volume e o grau de ocupação atuais em vários pontos julgando características das condições de tráfego. Diz-se que esses detetores instalados nesses locais são do tipo "estratégico".

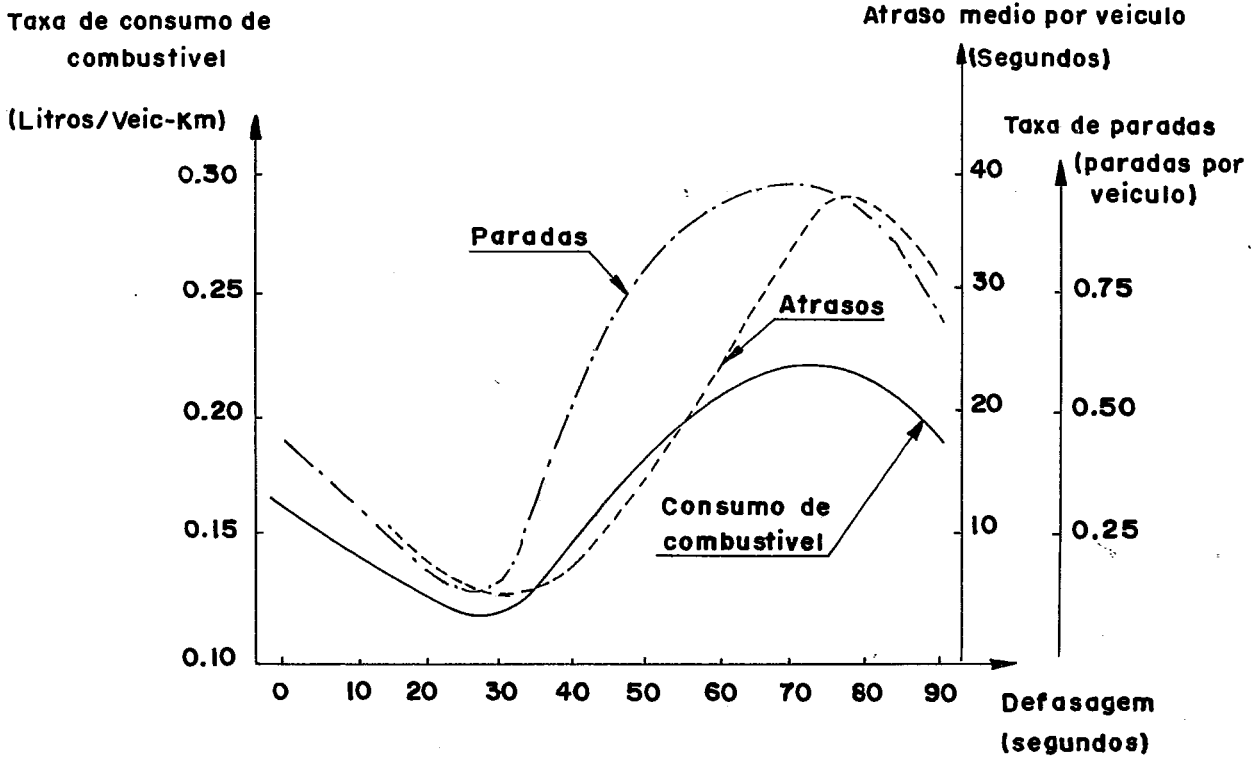


para os dois arcos:  $C = \text{tempo de ciclo} = 100 \text{ segundos}$

$V_c = 60 \text{ Km/hora}$

$g = 50 \text{ segundos}$

Figura III.5 - Dispersão de pelotão e defasagem entre as aproximações (1) e (2).



$C$  = tempo de ciclo = 100 (segundos)

$g$  = verde = 50 (segundos)

$q$  = fluxo médio = 1080 (veículos/hora)

$s$  = fluxo de saturação = 3600 (veículos/hora)

Figura III.6 - Atrasos, paradas e consumo de combustível em função da defasagem entre dois sinais.

### III.3 - AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO TRÁFEGO URBANO

Os sistemas de controle por área procuram usar estratégias de controle que se ajustem na melhor forma possível às flutuações do tráfego. Para isto é preciso que o sistema seja versátil e segundo a opinião de alguns técnicos, isto se alcançaria através da automatização do processo de alteração dos planos de sinalização, logicamente elevando o custo total do sistema.

Em relação aos procedimentos de elaboração e implementação destes planos, pode-se encontrar as seguintes formas:

- i) Cálculo "off -line" e seleção "on-line";



O cálculo é realizado a partir de dados obtidos de pesquisas de campo ou dados obtidos diretamente pelo próprio sistema. São elaborados diversos planos de acordo com a solicitação do serviço segundo a hora do dia e o dia da semana. A implementação dos mesmos será feita "on-line", ou seja, de acordo com informações de solicitação atual, obtidas através dos detetores localizados em pontos estratégicos; se escolherá um dos planos armazenados na biblioteca, o mesmo se manterá até que as condições mudem de forma que seja necessário escolher outro plano de sinalização. Este método de operação é conhecido como método dos vetores.

ii ) Cálculo "off-line" e seleção "off-line".

O cálculo é feito de forma igual ao caso anterior, mas a implementação é feita a partir de horários pré-estabelecidos. Este método é conhecido como método "hora do dia-dia da semana".

iii) Cálculo e implementação "on line".

Neste caso, os planos são calculados em períodos curtos de tempo segundo dados recolhidos na hora ou a partir de previsões de fluxos obtidas através de modelos de previsão a curto prazo. Existe a possibilidade de dividir dinamicamente a área, dando um tratamento específico a cada sub-área. Estes sistemas se caracterizam pela não utilização de planos pré-estabelecidos em forma contrária aos dois casos anteriores.

Uma grande variedade de métodos e programas computacionais têm sido desenvolvidos para calcular estes planos de sinalização. Entre eles pode-se citar Transyt, ROBERTSON (38), (39), FURTADO J.B. et alii (14); o método Combination, HILLER J. A. (23); Flexipro; Equistat; Plident; Sigop, TRAFIC RESEARCH CORPORATION (49), PEAT, MARWICK, LIVINGSTON e COMPANY (33) (34); Sigrid e o Mitrop, GARTNER N., LITTLE J. e GABBAY H. (16).

Vários estudos comparativos entre estes algoritmos têm sido desenvolvidos, considerando-se uma mesma estratégia de

operação. Pode-se citar por exemplo um estudo comparativo entre a versão '6' do Transyt (existem 8 versões do mesmo) e o programa Mitrop JUNQUEIRA B. (26). Tem-se realizado também estudos experimentais comparativos das diferentes estratégias de controle do tráfego urbano GARTNER N.H. (15). A seguir são apresentados os resultados das experiências realizadas, respectivamente, em Glasgow HOLROYD J. e HILLER J.A. (25); Toronto CORPORATION OF METROPOLITAN TORONTO (08) e nos Estados Unidos TRAFFIC CONTROL SYSTEMS HANDBOOK (48).

No experimento de Glasgow (1971) foram avaliadas 5 estratégias cujos resultados estão resumidos na Tabela III.1.

Estratégias de Controle	Resultados
Método Combination "off-line"	12% de melhoria com relação ao existente na época em Glasgow.
Transyt "off-line"	4% de melhoria com relação ao método Combination.
Sistema Flexiprogram atuado "on-line"	Aproximadamente igual ao Método Combination.
Sistema Equistat "on-line"	Aproximadamente igual ao Método Combination.
Sistema Plident "on-line"	Experimenta uma degradação com relação ao método Combination.

Tabela III.1 - Comparação dos resultados experimentais da cidade de Glasgow.

O método Combination serviu como base de comparação e se concluiu que a estratégia mais efetiva era aquela que utilizava uma biblioteca de planos de sinalização calculados a partir de dados históricos numa operação "off-line".

No experimento de Toronto (1976) foram testados 4 diferentes tipos de estratégias que foram comparados com a estratégia baseada no método Sigrid. Os resultados estão resumidos na Tabela III.2.

Estratégias de Controle	Resultados
Sigop	Equivalente ao método Sigrid
Transyt	Equivalente ao método Sigrid
Método Combination	4.5% melhor que o método Sigrid
RTOP (otimização em tempo real)	4.8% melhor que o método Sigrid

Tabela III.2 - Resultados dos experimentos desenvolvidos em Toronto (1976).

Da tabela anterior se conclui que o método Combination e o RTOP deram resultados levemente melhores comparados com as duas outras estratégias.

O projeto do Sistema de Controle de Tráfego Urbano iniciado no ano de 1967 nos Estados Unidos (UTCS) tinha por objetivo principal o desenvolvimento e teste de diferentes conceitos e estratégias de controle de tráfego em malhas urbanas de diversos tipos.

No projeto UTCS definiram-se três gerações de estratégias como se mostra na Tabela III.3.

A Primeira Geração de Controle (1GC) utiliza planos de sinalização que são previamente calculados "off-line" a partir de dados históricos do tráfego arquivados. O plano de sinalização pode ser selecionado em base à hora do dia ou pode ser diretamente acionado pelo operador, ou a partir da comparação dos planos existentes em biblioteca com condições de tráfego recentes. A atualização do plano é feita com uma frequência de 15 minutos. O "software" inclui a passagem progressiva entre dois planos diferentes. Os planos podem ser calculados "off-line" utilizando métodos de otimização dos tempos de sinalização tais como Sigop, Transyt ou Mitrop.

Características da Otimização	Primeira Geração "off-line"	Segunda Geração "on-line"	Terceira Geração "on-line"
Frequência de atualização	15 minutos	5-10 minutos	3-6 minutos
Número máximo de interseções	40	ilimitado	ilimitado
Previsão dos fluxos de tráfego	Não	Sim	Sim
Controle de interseções críticas	Ajuste dos estágios de verde	Ajuste dos estágios de verde e das defasagens	Ajuste dos estágios de verde, das defasagens e do ciclo
Hierarquia de controle	Seleção de interseções	Cálculo de interseções	Fluxos congestionados e medianamente congestionados
Tempo de ciclo fixo	Entre cada interseção	Entre grupos variáveis de interseções	O tempo de ciclo não é fixo

Tabela III.3 - Características das estratégias dos sistemas de controle do tráfego urbano: três gerações.

Na Segunda Geração de Controle (2GC), o "software" inclui uma rotina de otimização "on-line" que determina os parâmetros de controle que minimizam atrasos e número de paradas dentro de uma rede no curto prazo. A atualização dos planos é feita em intervalos de 5 a 10 minutos. Os dados utilizados na otimização são o resultado de uma filtragem de dados históricos recentes. Uma versão modificada do método Sigop tem sido utilizada neste caso (com um tempo de ciclo fixo).

A Terceira Geração de Controle (3GC) apresenta uma forma de atuação mais dinâmica em relação à segunda geração. Esta difere da anterior devido à maior frequência de atualização dos planos (3-6 minutos) e pelo tempo de ciclo que varia de acordo com a relação volume/capacidade nas diferentes aproximações

das interseções. O processo de otimização pode ser baseado no programa Sigop II.

Uma comparação entre as três gerações foi realizada pela equipe da UTCS nos Estados Unidos em 1976, Tabela III.4. Os resultados foram os seguintes: o melhor desempenho ocorreu com a (1GC) em suas diversas formas de controle. A segunda geração obteve resultados variáveis e em geral inferiores aos da (1GC), sendo estes resultados consistentes com os obtidos no experimento de Toronto. Os resultados referentes à (3GC) mostram uma grande degradação se comparados com os das duas gerações anteriores.

GERAÇÃO DE CONTROLE	Percentagem de variação do tempo médio de viagem numa rede ou numa via arterial			
	Pico da manhã	Fora do Pico	Pico da Tarde	Todo o dia
PRIMEIRA GERAÇÃO				
Via arterial	- 1.5	- 5.7	- 15.3	Não disponível
Via urbana	- 4.0	+ 2.7	- 2.2	Não disponível
SEGUNDA GERAÇÃO				
Via arterial	- 1.3	- 3.8	+ 0.5	- 2.1
Via urbana	+ 4.4	+ 1.9	+ 10.7	+ 5.2
TERCEIRA GERAÇÃO				
Via arterial	+ 9.2	+24.2	+ 21.2	+16.9
Via urbana	+14.1	+ 0.5	+ 7.0	+ 8.2

Tabela III.4 - Comparação dos resultados das diferentes estratégias de controle, segundo a UTCS.

Outros aspectos importantes devem ser considerados em relação às estratégias de controle. Estas podem ser também diferenciadas segundo a forma na qual consideram aspectos como a saturação e as prioridades para o transporte público. De fato, as estratégias devem ser definidas em função do conjunto global de objetivos fixados para o sistema de controle

do tráfego urbano.

A maioria das estratégias usadas para condições não saturadas procura otimizar o desempenho global da malha viária enquanto que as estratégias usadas em condições de saturação atendem ao processo de otimização como dos diversos pontos de vista dos quais ainda não se tem feito nenhuma avaliação sistêmica. Assim, algumas delas procuram otimizar através da procura de um equilíbrio demanda/capacidade, outras alocam o tempo de acordo com o tamanho das filas, ou também procuram evitar o congestionamento em locais críticos (por exemplo em vias de largura e comprimento insuficientes para armazenar adequadamente os veículos).

A introdução de medidas de prioridade para ônibus são efetivadas com a ajuda de planos de sinalização gerados por programas de tipo Transyt 5, Thesee-bus, e outros em que se aloca um maior peso (empiricamente) a estes veículos em relação ao resto do tráfego. Algumas tentativas experimentais têm sido realizadas, uma delas através de atuação local a qual demonstra uma maior eficácia no caso de fluxos de ônibus baixos (1 ônibus/ciclo), e de grandes variações do fluxo de tráfego. Além disto, tem-se constatado que com a tecnologia atual, os custos de implementação e operação são elevados em relação aos benefícios gerados.

### III. 4 - ESTRUTURA DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO EM ÁREA (CTA)

Em relação à estrutura do Sistema de Controle de Tráfego Urbano em Área, existem três tipos de concepção:

- Sistemas Centralizados. Neste caso o computador central requer um certo porte, podendo comunicar-se diretamente com os controladores locais através de multiplexadores ou de concentradores que melhoram a eficiência da comunicação, ver Figura III.7;

- Sistemas Hierarquizados. Estes sistemas utilizam um

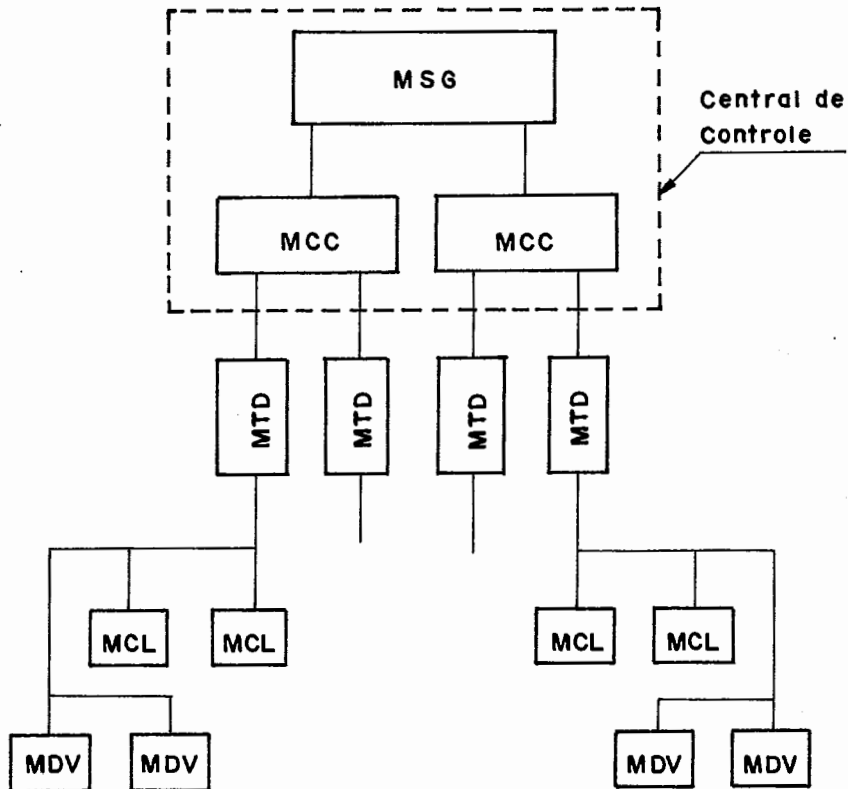
computador central basicamente para fins estatísticos ou de simulação. O controle das sub-áreas é feito através de coordenadores que apresentam uma inteligência obtida pela utilização de microprocessadores; estes coordenadores podem atuar em forma independente, ver Figura III.8.

- Sistemas Totalmente Descentralizados. Na atualidade estão em desenvolvimento nos Estados Unidos e na França. Estes sistemas precisam ainda de um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento nos campos de estimação e filtragem dos fluxos de tráfego e no processo de otimização "on-line" com a coordenação, ver Figura III.9.

Excetuando-se o último caso que ainda está em experimentação, existe uma polêmica em relação à melhor filosofia. Na prática, todas apresentam vantagens e desvantagens. Por exemplo, o sistema centralizado requer computadores de maior porte e uma rede de transmissão de maior capacidade, com a vantagem que permite da própria sala de controle fazer a manutenção do "software" de todo sistema. Já o sistema hierarquizado minimiza a necessidade de um computador de maior porte, mas apresenta uma maior complexidade e uma menor flexibilidade no caso de modificação nas sub-áreas.

### III.5 - EQUIPAMENTO PARA OS SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO

Os elementos de um Sistema de Controle de Tráfego Urbano em geral são os seguintes (qualquer que seja a estratégia e estrutura empregada):



MSG Módulo de Supervisão Geral

MCC Módulo de Controle Central

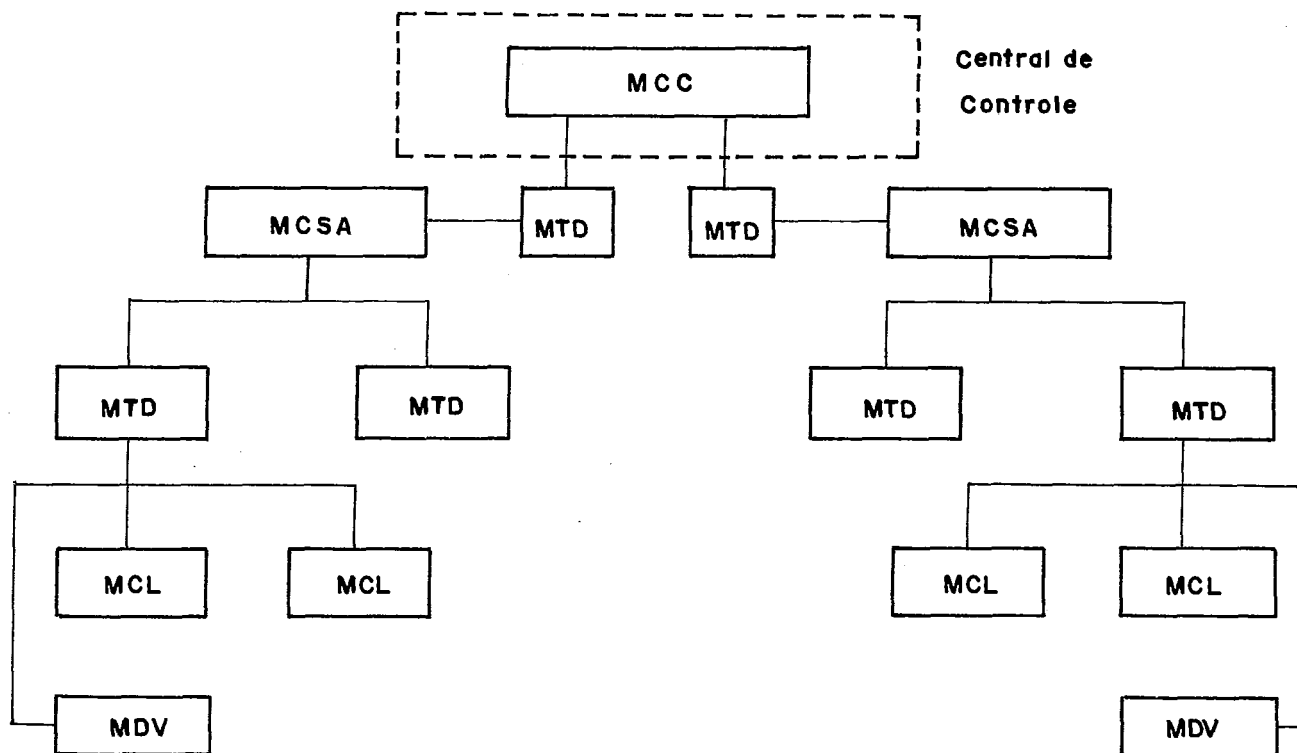
MCL Módulo de Controle Local

MTD Módulo de Transmissão de Dados

MDV Módulo de Detecção de Veículos

Figura III.7 - Sistema de Controle de Tráfego Urbano Centralizado





MCC Módulo Central de Controle

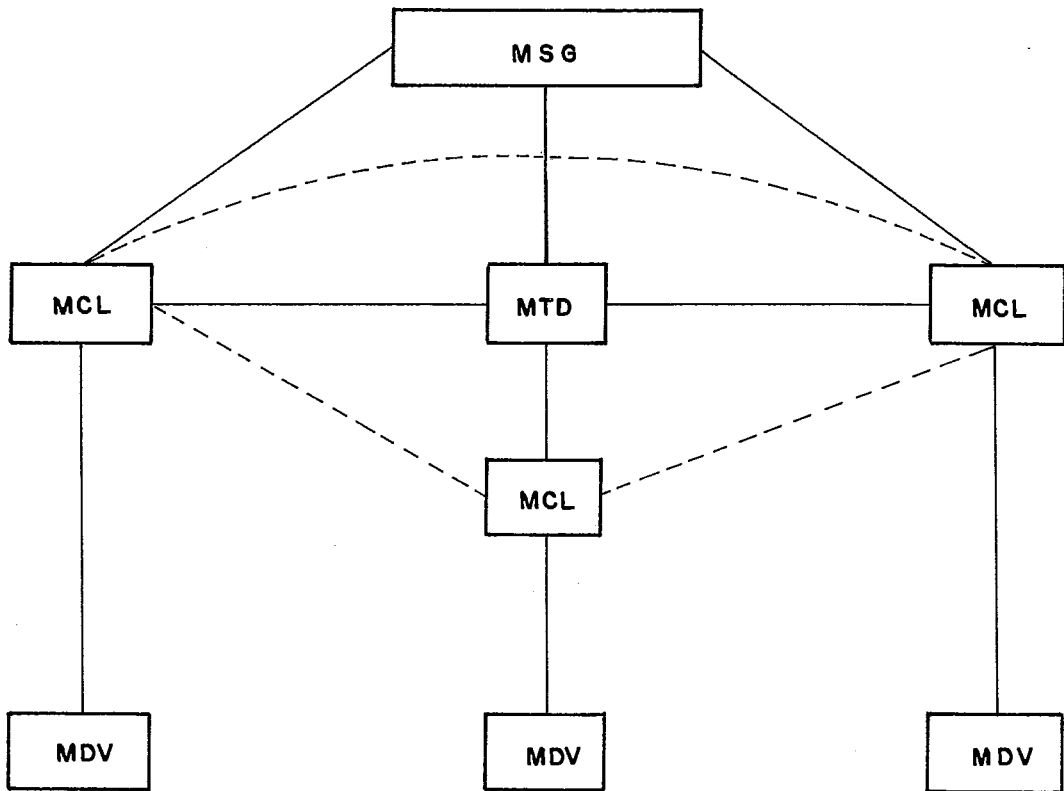
MCSA Módulo Central de Supervisão de Área

MTD Módulo de Transmissão de Dados

MCL Módulo de Controle Local

MDV Módulo de Detecção de Veículos

Figura III.8 - Sistema de Controle de Tráfego Urbano Hierarquizado



MSG Módulo de Supervisão Geral

MCL Módulo Central Local

MDV Módulo de Detecção de Veículos

MTD Módulo de Transmissão de Dados

Figura III.9 - Sistema de Controle de Tráfego Urbano  
Totalmente Descentralizado

- O Processador Central
- O Sistema de Detecção e Comunicação
- Os Controladores Locais

Os equipamentos necessários para o processamento dos algoritmos de otimização do tráfego urbano estão relacionados diretamente com as características dos algoritmos utilizados. Portanto o processador central deverá ter um porte compatível com o método selecionado. Ultimamente têm sido realizados alguns experimentos com sistemas mais compactos baseados em mini e micro computadores de menor custo de aquisição e implantação. O desenvolvimento de um computador específico para o controle do tráfego em área é atualmente possível mas economicamente inviável.

vel dessa forma estão sendo utilizados equipamentos de uso geral da área de controle de processos e de custo mais baixo já que são produzidos em série.

A comunicação do processador central com os controladores locais que eventualmente se realiza através de equipamentos intermediários, é normalmente feita por via telefônica.

Com respeito aos detetores do veículo, pode-se indicar que além dos de laço indutivo que já foram descritos, serão citados os detetores de gradiente magnético, cujas especificações superam às dos detetores de laço indutivo, inclusive no aspecto econômico, já que seu custo de instalação é inferior.

Os controladores locais, adequados para sistemas de controle de tráfego automatizado, dispõem normalmente de microprocessadores, nos quais os comandos enviados pelo processador central são recebidos e interpretados com ajuda de um sistema operacional pequeno que permite muitas vezes uma atuação autônoma dos controladores (estado degradado de funcionamento quando o elo de comunicação com o processador central é interrompido).

Também existem controladores eletromecânicos apresentando elevados índices de falhas, estes têm sido restritos à manutenção e/ou à expansão dos sistemas já existentes.

Os sistemas mais recentes apresentam características importantes tais como:

- i) - possibilidade de expansão da memória local, permitindo o armazenamento de maior número de planos de sinalização; e
- ii) - reprogramação dos controladores ou modificação dos planos locais de sinalização diretamente a partir do computador central.

A instalação de câmaras de televisão nos sistemas de CTA dos países desenvolvidos para prestar serviço complementar de monitorização, têm sido recusada devido a:

- i) - dificuldade operacional;
- ii) - baixa relação benefício/custo; e
- iii) - quebra da privacidade dos indivíduos.

### III.5 - OS SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO NO BRASIL

No Brasil existem vários sistemas de Controle de Tráfego Urbano assim como vários outros em fase de estudo ou implantação. Entre os instalados pode-se destacar o sistema de Curitiba e o de São Paulo. Entre os sistemas em via de implantação pode-se citar os de Belo Horizonte e Rio de Janeiro. Ainda um estudo tem sido levado a cabo pela EBTU e a COPPE(07), no caso de Fortaleza.

São apresentados na Tabela III.5 um resumo das características principais destes sistemas.

O sistema de Curitiba calcula e seleciona os planos de sinalização "off-line".

Deve-se ressaltar que neste caso, paralelamente à implementação do (SCTU), foram adotadas medidas conjuntas tais como o remanejamento do transporte coletivo e a restrição do uso dos veículos particulares, em certas áreas da cidade (Centro), com a finalidade de atingir os fins estabelecidos.

O sistema de São Paulo é da forma cálculo "off-line" e seleção do plano de sinalização "on-line", com a possibilidade de ser também "off-line". Os dois sistemas mencionados têm a possibilidade de atuar de forma autônoma (estado degradado) ao nível dos controladores locais.

Com relação aos resultados de implementação destes sistemas só se tem referência dos de Curitiba, onde se experimenta

um incremento da velocidade média de 27%, uma redução de 20% dos acidentes, uma redução de 15% de gasto em combustível e uma diminuição de 23% no tempo de percurso médio.

SISTEMAS	CONTRATADO NO ANO	Nº DE INTERSEÇÕES	Nº DE SUB-ÁREAS	Nº DE PLANOS IMPLEMENTADOS
CURITIBA	1977	180 operando (300 no máximo)	7	3
SÃO PAULO	1978	250 operando (500 no máximo)	5 (1a. fase)	3 (8 no máximo)
RIO DE JANEIRO	1982	70 operando (em regime degradado)	3	3
BELO HORIZONTE	1983	180 (em implantação)	3 (1a. fase)	3 (1a. fase)

SISTEMAS DE CONTROLE	ESTRATÉGIA UTILIZADA	EQUIPAMENTO		ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONTROLE	TIPO DE DETETORES (NÚMERO)
		DE CONTROLE	CÁLCULO DOS PLANOS		
CURITIBA	Transyt 5 "off line"	Phillips AD 301	IBM 370	Hierarquizado	laço indutivo (175 máximo)
SÃO PAULO	Transyt 5 "off line"	Plessey	PDP 11/70	Centralizado	laço indutivo (700)
RIO DE JANEIRO	provisoriamente -cálculo manual	Phillips	-	Hierarquizado	laço indutivo
BELO HORIZONTE	Transyt com escolha "on line"	Phillips	-	Hierarquizado	laço indutivo

Tabela III.5 - Características dos sistemas existentes no Brasil para o controle do Tráfego Urbano.

## III.6 - CONCLUSÃO

Como conclusão deste capítulo, nota-se que a implantação, a operação e a manutenção de sistemas de controle de tráfego urbano têm apresentado no Brasil grandes dificuldades (exceto em Curitiba), levando muitas vezes este empreendimento ao fracasso ou então a situações de operação parcial e/ou degradada conduzindo a uma certa ineficiência. Isto se deve em parte à complexidade dos sistemas planejados e também devido ao grande esforço financeiro a ser realizado pelo poder público, sem obter um retorno direto, o que desestimula a continuidade dos investimentos. Por outro lado, a ineficiência se deve também em parte à tecnologia, que é quase sempre importada (software de base, de aplicação, material de cálculo e de comunicação).

Neste trabalho, procurou-se fornecer uma filosofia de controle de tráfego extremamente simples, adaptada às condições brasileiras, não só das grandes metrópoles, mas também das cidades de médio porte. Além disso, e de acordo com este último enfoque, pretendeu-se também desenvolver uma tecnologia própria de geração de planos de controle de tráfego urbano. No capítulo seguinte, esta abordagem será apresentada detalhadamente e justificada do ponto de vista técnico.

CAPÍTULO IV - PROCESSOS DE GERAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE  
PLANOS DE SINALIZAÇÃO

#### IV.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo consideram-se os métodos numéricos de geração e otimização de planos de sinalização. Numa primeira parte apresenta-se o método de otimização presente no programa TRANSYT (Hill Climbing). Devido a várias limitações teóricas e práticas deste método, alguns pesquisadores têm procurado desenvolver métodos de geração e otimização de planos de sinalização a partir de técnicas mais avançadas de Programação Matemática. Assim, apresenta-se depois o programa MITROP que faz uso da Programação Linear Inteira, e da Programação Mista. Considerando-se estudos comparativos realizados entre estes dois tipos de métodos, descobriu-se que o segundo tipo não apresentava as melhorias esperadas, apesar do grande esforço computacional suplementar desenvolvido. Finalmente, após descrever um algoritmo de cálculo de um plano de sinalização inicial para uma área urbana, apresenta-se uma nova proposta metodológica, objeto desta tese: a geração e otimização progressiva de um plano de sinalização através de uso iterativo de um modelo de simulação implantado num microcomputador como ferramenta de avaliação dos planos parciais ou provisórios.

#### IV.2 - MÉTODOS DE BUSCA SEQUENCIAL

Os primeiros trabalhos numéricos para calcular planos de sinalização ótimos foram realizados por Engenheiros de Tráfego pouco acostumados com as técnicas avançadas de Programação Matemática. Assim, estes primeiros métodos têm tratado o problema de forma aproximada ao processo de busca por tentativa e erro que eles estavam utilizando até essa época. Estes métodos apresentam as características seguintes (ver Figura IV.1):

- um plano inicial é fornecido ou calculado;
- uma seqüência de modificação dos valores iniciais dos parâmetros destes planos é proposta a priori;
- uma modificação é aceita quando ela conduz a uma melhoria em relação ao plano corrente;



- cada modificação é avaliada através do uso de um modelo de simulação de fluxos de tráfego;
- a seqüência de modificações desenrola-se de forma autônoma, sem intervenção do usuário.

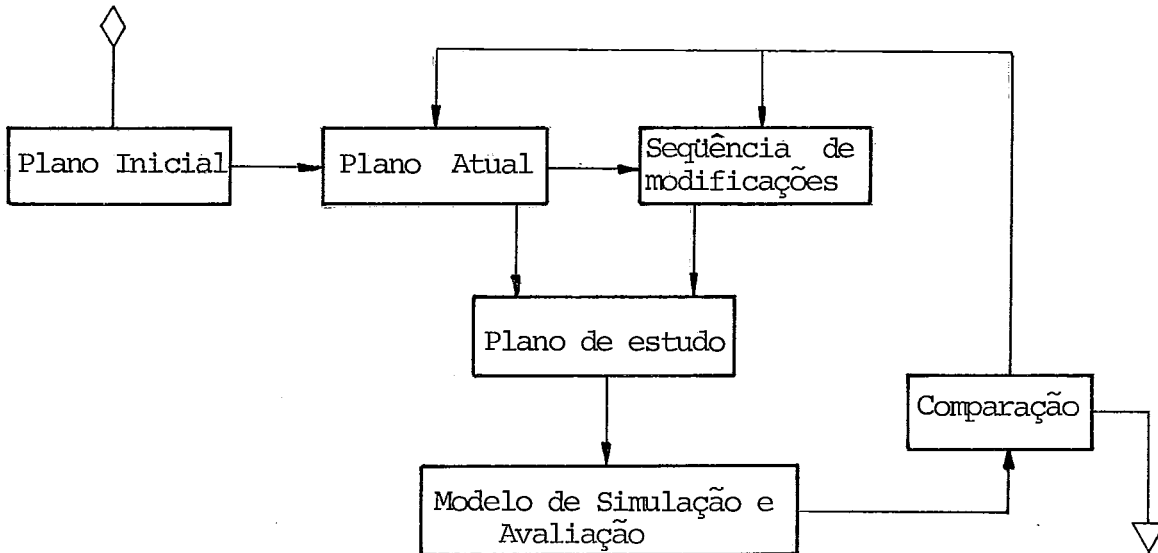


Figura IV.1 - Organização Computacional dos Métodos Seqüenciais

Nota-se que é também possível valer-se de um processo aleatório de geração a cada passo (Random Search Method) das próximas modificações. Assim, estes métodos de busca seqüencial assemelham-se aos métodos elementares de busca direta da Programação não Linear. Portanto, aqui, o número de parâmetros a otimizar é geralmente grande e a avaliação da função objetivo escolhida passa pela utilização de um modelo de simulação.

Entre os métodos existentes, podem ser citados os utilizados nos programas COSE II, Thêbes e as várias versões do TRANSYT. Nestes três casos, o método de busca utilizado corresponde a variantes do método "Hill Climbing" proposto por ROBERTSON (36), em 1969.

O método "Hill Climbing", utilizado no TRANSYT

procura minimizar o Índice de desempenho seguinte:

$$ID = \sum_{i=1}^n (d_i + k c_i) \quad (IV.1)$$

onde:  $d_i$  = atraso médio (UCP-hora/hora) no arco 'i' da rede

$c_i$  = número médio de UCP que param por segundo no arco 'i'

$K$  = fator de penalidade

Ele se baseia no princípio seguinte:

O Índice de desempenho ID depende dos valores dos parâmetros  $\underline{P}$  do plano de sinalização considerando, onde:

$$P^t = (\text{duração do ciclo comum, defasagens entre interseções: } SQ_K, \text{ repartição de tempos de verde entre fases de interseções: } V(K)_i) \quad (IV.2)$$

ou seja:  $ID = ID(\underline{P})$

O método parte de um vetor inicial  $\underline{P}_0$  e procura, analisando sucessivamente cada direção, melhorar o índice de desempenho. Os incrementos a serem testados são fornecidos à priori. Na Figura IV.2 é representado este processo de busca extremamente simples, no caso em que  $\underline{P}$  é um vetor de duas dimensões e onde o incremento é constante.

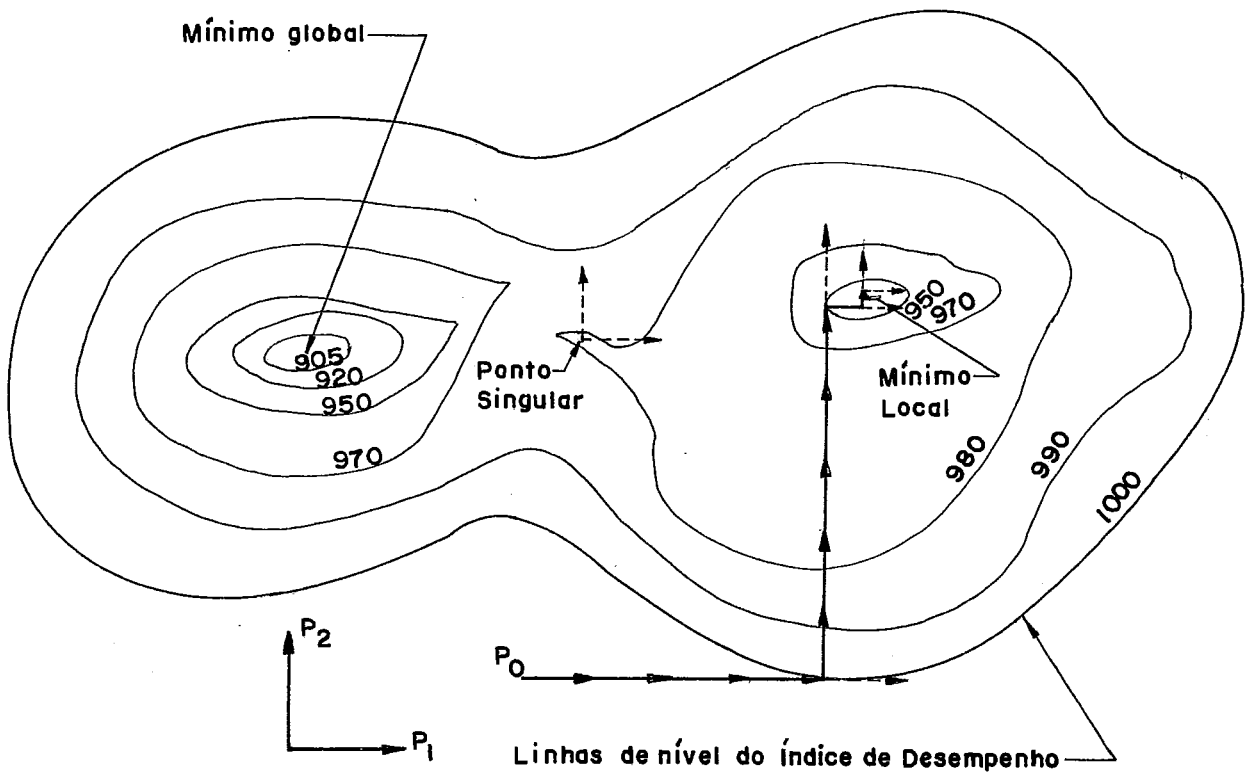


Figura IV.2 - Exemplo de procura de mínimo pelo método do Hill Climbing.

- ele pode conduzir, dependendo da inicialização, à vizinhança de um mero ótimo local;
- ele pode apresentar pontos singulares como o ponto  $P_s$ , nos quais o processo de busca é interrompido, sem portanto ter atingido uma vizinhança do ponto ótimo local ou global.
- ele pode apresentar um baixo grau de precisão, como é o caso da Figura IV.2 em torno do ponto do mínimo local.

Para aplicar este método à otimização do plano de sinalização de uma rede viária, é necessário fornecer uma lista ordenada das interseções consideradas. Assim, já que o processo de busca não é ótimo, a solução obtida dependerá desta ordenação, da mesma forma como ela depende da lista ordenada dos arcos a serem simulados pelo programa de avaliação do pla-

no (uma parte do programa TRANSYT). A organização dos cálculos efetuados durante a busca de uma solução pelo programa TRANSYT é apresentada a seguir:

1. Leitura do plano inicial, da lista de interseções e da lista de incrementos propostos;
2. Alteração da defasagem das interseções consideradas sucessivamente na ordem da lista em cada caso, até atingir um ponto onde nenhuma melhoria baseada na lista de incrementos seja possível;
3. Alteração dos tempos de verde de cada interseção num processo idêntico ao anterior.

No caso do TRANSYT, é possível considerar simultaneamente até 50 interseções e no máximo 15 incrementos diferentes para as defasagens e tempos de verde (incluídos numa mesma lista, estas últimas sendo identificadas por um sinal -). Também é importante notar que desta lista de incrementos dependerá a qualidade da solução obtida. ROBERTSON (36) fornece um exemplo de oito incrementos listados na Tabela IV.1 (note-se que a lista dos incrementos dos tempos de verde são bem menores).

Estágio	Tamanho do intervalo (passos) para o ciclo = 50 pontos
1	7
2	20
3	* -1
4	7
5	20
6	1
7	* -1
8	1

\* os intervalos negativos alteram o tempo de verde

TABELA IV.1 - Exemplo de uma listagem de incrementos a serem utilizados no processo de otimização do TRANSYT.

Nesta seqüência, Robertson introduz valores muito diferentes para os incrementos, com o objetivo, se possível, de evitar pontos de ótimo local. Portanto, não tendo nenhuma informação sobre a forma da superfície associada ao índice de desempenho, este procedimento não é muito confiável quanto a sua capacidade para encontrar soluções globais ótimas.

Na prática observou-se que muitos Engenheiros de Tráfego que utilizam o programa TRANSYT não se preocupam com a definição de uma seqüência específica para o seu problema e assim adotam simplesmente a tabela fornecida por Robertson (Tabela IV.1),

No programa TRANSYT, é possível também reagrupar interseções de forma a alterar em conjunto suas defasagens em relação ao resto da rede e assim preservar resultados prévios parciais de otimização do plano.

#### IV.3 - APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA À OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE SINALIZAÇÃO

Levando em consideração as várias observações feitas anteriormente em relação aos métodos seqüenciais, vários autores oriundos da Pesquisa Operacional e da Programação Matemática, têm tentado aplicar o ferramental destas áreas para resolver o problema de otimização de planos de sinalização. Duas linhas de ação ofereceram-se:

- considerar o problema como sendo de controle ótimo de um sistema dinâmico;
- Considerá-lo como sendo um simples problema de Programação Matemática.

A primeira abordagem conduz a considerar de forma explícita equações dinâmicas de formação de filas. Portanto, as técnicas disponíveis na área de controle têm sido desenvolvidas para sistemas onde os fluxos são contínuos e as relações dinâmicas são lineares na sua maioria. Assim, poucos trabalhos

relacionados com a otimização de planos de sinalização têm sido desenvolvidos nesta linha HENRY J.J. e PAQUIN R. (21). A segunda linha de pesquisa tem sido seguida por vários autores GARTNER(18), PEAT, MARWICK, LIVINGSTON e COMPANY(34) e tem conduzido a estudos mais expressivos. Apresenta-se a seguir o resumo de um trabalho característico desta linha, o programa MITROP (Mixed Integer Traffic Road Optimizations) GARTNER N. et alii (17).

A dificuldade principal na aplicação dos métodos de Programação Matemática a este problema consiste na obtenção de um modelo adequado de otimização na forma clássica. Várias considerações em termos de representação do sistema têm que ser feitas para atingir tal formalismo. Assim, por exemplo, a modelagem dos fluxos tem que ser simplificada; Gartner no MITROP adaptou uma representação retangular (Figura IV.3).

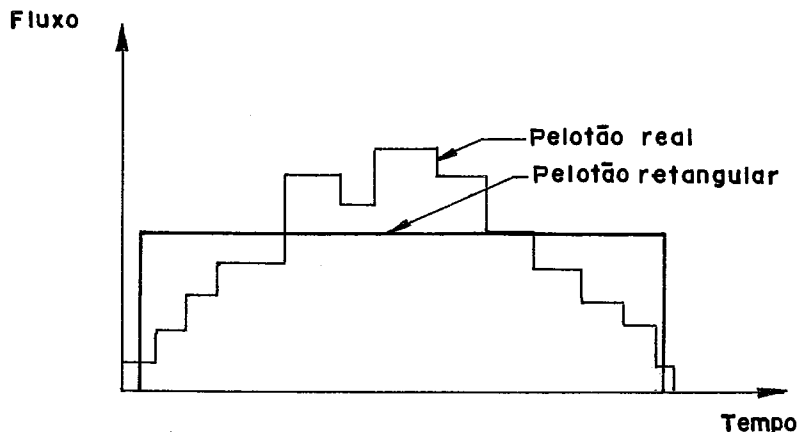


Figura IV.3 - Representação simplificada dos pelotões no MITROP

Esta representação permitiu diminuir o esforço computacional necessário para determinar atrasos e tamanhos de filas. Outras aproximações têm sido feitas, principalmente com respeito à não linearidade encontrada nas relações, permitindo avaliar os atrasos e tamanhos das filas. Na Figura IV.4 é apresentada a linearização da função que representa o atraso determinístico em função da defasagem.

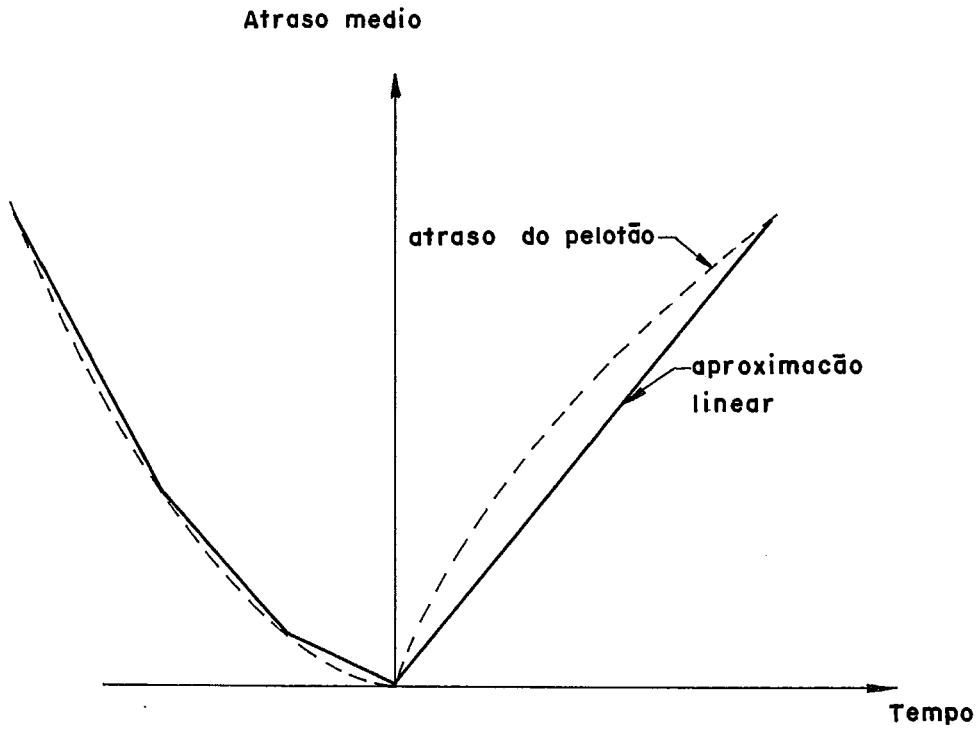


Figura IV.4 - Aproximação linearizada do atraso médio em função da defasagem.

Na figura IV.5 (GARTNER(17)) é apresentada a variação do atraso determinístico e de saturação em função do tempo de ciclo. Nota-se que para altos valores deste tempo, esta função não é convexa. Estas relações sendo em geral não convexas,

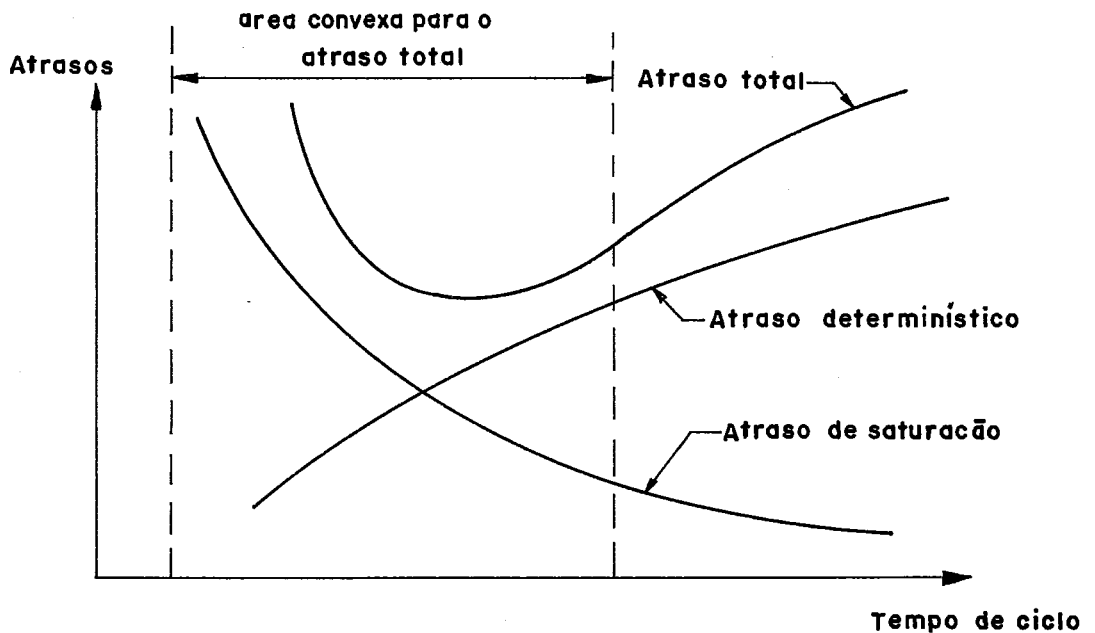


Figura IV.5 - Variação do atraso em função do tempo de ciclo.

a aproximação delas por relações lineares por trechos pode trazer problemas. Portanto o autor justifica este procedimento dizendo que estas regiões não convexas são afastadas da solução ótima, por corresponder a tempos de ciclo longos ou a tempo de verdes irrealis.

Outros problemas surgem também devido a que o sistema viário é representado por uma rede malhada, conduzindo assim a relações de consistência da forma:

$$\sum_{(i,j) \in \ell} \phi_{ij} = n_{\ell} \cdot C, \quad n_{\ell} \in \mathbb{Z} \quad (\text{IV.3})$$

onde  $\ell$  é um laço da rede considerada,  $C$  é a duração comum do ciclo,  $n_{\ell}$  é um número inteiro e  $\phi_{ij}$  é a defasagem existente entre os nós  $i$  e  $j$ .

Vale notar que se de um lado surgem aqui variáveis inteiras no problema de otimização, por outro lado, estas permitem considerar um dos aspectos não tratados nos programas tais como o TRANSYT: a presença de malhas fechadas na rede urbana.

De todas as relações do tipo (IV.4) possíveis para uma rede orientada de  $N$  nós e  $L$  arcos (GARTNER (17)),  $L-N+1$  serão linearmente independentes. Assim, de antemão,  $L-N+1$  ciclos independentes deverão ser determinados e codificados. Também será necessário obter-se limites superiores e inferiores para as variáveis inteiras. Isto é possível observando-se que na prática as defasagens têm que obedecer a relações da forma:

$$\tau_{ij} - g_{ij} < \phi_{ij} < \tau_{ij} + r_{ij} \quad (\text{IV.4})$$

onde  $g_{ij}$  e  $r_{ij}$  são os tempos de verde e vermelho oferecidos na aproximação  $ij$ ,  $\tau_{ij}$  o tempo de percurso até atingir esta aproximação. Tendo também:

$$\phi_{ij} + \phi_{ji} = n C \quad (\text{IV.5})$$



obtem-se:

$$(\tau_{ij} - g_{ij}) + (\tau_{ji} - g_{ji}) \leq n C \leq (\tau_{ij} + r_{ij})(\tau_{ji} + r_{ji}) \quad (\text{IV.6})$$

ou

$$\underbrace{(\tau_{ij} + \tau_{ji})}_{\bar{\tau}} \leq n C \leq \underbrace{(r_{ij} + g_{ij})}_C + \underbrace{(r_{ji} + g_{ji})}_C + \underbrace{(\tau_{ij} + \tau_{ji})}_{\bar{\tau}} \quad (\text{IV.7})$$

e finalmente:

$$\bar{\tau}/C \leq n \leq \bar{\tau}/C + 2 \quad (\text{IV.8})$$

e considerando limites inferiores e superiores para a duração do ciclo:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (\text{IV.9})$$

À nível de cada interseção, várias restrições de consistência têm que ser observadas:

- os tempos de verde de aproximações em fase devem ser iguais;
- o tempo de vermelho das aproximações de uma fase devem ser iguais aos tempos de verde da outra fase. Assim, tem-se as restrições:

$$r_{ji} - l_{ij}/C = r_{kj} - l_{kj}/C, j \in N, (i,j) \in P_j \quad (\text{IV.10})$$

e

$$r_{ji} - (l_{ij} + a_{ij})/C = g_{mj} + l_{mj}, j \in N, i \in P_j, j \in \bar{P}_j \quad (\text{IV.11})$$

onde  $N$  é o conjunto de interseções,  $P_j$  é o conjunto de aproxima-

ções da primeira fase,  $\bar{P}_j$  é o conjunto de aproximações da segunda fase,  $l_{ij}$  é o tempo perdido no início do verde na aproximação  $ij$ ,  $a_{ij}$  é o tempo de amarelo na aproximação  $ij$ .

É importante notar que este método só permite considerar redes com no máximo duas fases por interseção, o que limita bastante a área de aplicação do método.

A função objetivo considerada pelo programa MITROP é relativa aos atrasos médios sofridos pelos veículos na rede, não considerando o número de paradas por veículo. Assim, parece que este item poderia ser incluído na função objetivo sem com isso ter que modificar a estratégia de resolução adotada pelo programa. A saturação da rede é levada em conta através do tamanho das filas de veículos no fim dos tempos de verde, para os quais é possível avaliar o atraso suplementar devido à saturação (a duração de um vermelho acrescentada do tempo médio de escoamento deste resíduo de fila no início do próximo verde).

Esta função objetivo é expressa a seguir:

$$F = \sum_{(i,j) \in L} (f_{ij} d_{ij} + Q_{ij}) \quad (\text{IV.12})$$

onde:

$f_{ij}$  é o fluxo na aproximação  $ij$

$d_{ij}$  é o atraso determinístico

$Q_{ij}$  é o atraso de saturação

$L$  é o conjunto de arcos considerados na rede com:

$$d_{ij} = z_{ij} / C \quad (\text{IV.13})$$

$C$  sendo a variável de decisão: duração do ciclo comum.

Finalmente obtem-se a formulação global do problema de otimização:

$$\underset{\phi, r, c, n}{\text{minimizar}} \sum_{(i,j) \in L} (f_{ij} d_{ij} + Q_{ij})$$

sob as restrições:

linearização por partes da função objetivo:

$$d_{ij} \geq d^k(r_{ij}, C) \quad R = 1, \dots, K_d \quad (\text{IV.14})$$

$$Q_{ij} \geq Q^k(r_{ij}, C) \quad K = 1, \dots, Q_q$$

equações de consistência das defasagens:

$$\sum_{ij \in \ell} (\phi_{ij}) = n \quad \ell \in L \quad (\text{IV.15})$$

onde  $L$  é um conjunto de ciclos independentes.

A seguir se apresentam as equações de consistência dos tempos de verde e de vermelho ao nível de cada interseção.

$$r_{ij} - \ell_{ij}/C = r_{kj} - \ell_{kj}/C, \quad j \in N, (i,k) \in P_j \quad (\text{IV.16})$$

$$r_{ij} - (\ell_{ij} + a_{ij})/C = g_{mj} + \ell_{mj}, \quad j \in N, i \in P_j, j \in \bar{P}_j \quad (\text{IV.17})$$

limites das variáveis:

$$r_{\min} \leq r_{ij} \leq r_{\max}^{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (\text{IV.18})$$

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (\text{IV.19})$$

$$N_{\ell}^{\min} \leq N_{\ell} \leq N_{\ell}^{\max}, \quad N_{\ell} \in N, \ell \in L \quad (\text{IV.20})$$

Apesar das grandes simplificações realizadas, esta formulação com variáveis contínuas ( $\phi$ ,  $r$ ,  $c$ ) e inteira ( $n$ ) é extremamente pesada. Por exemplo no caso da rede representada na Figura IV.6 GARNER et alii(17), esta conduz a um problema de programação linear mista com 248 linhas, 121 colunas, 369 variáveis das quais 8 são inteiras.

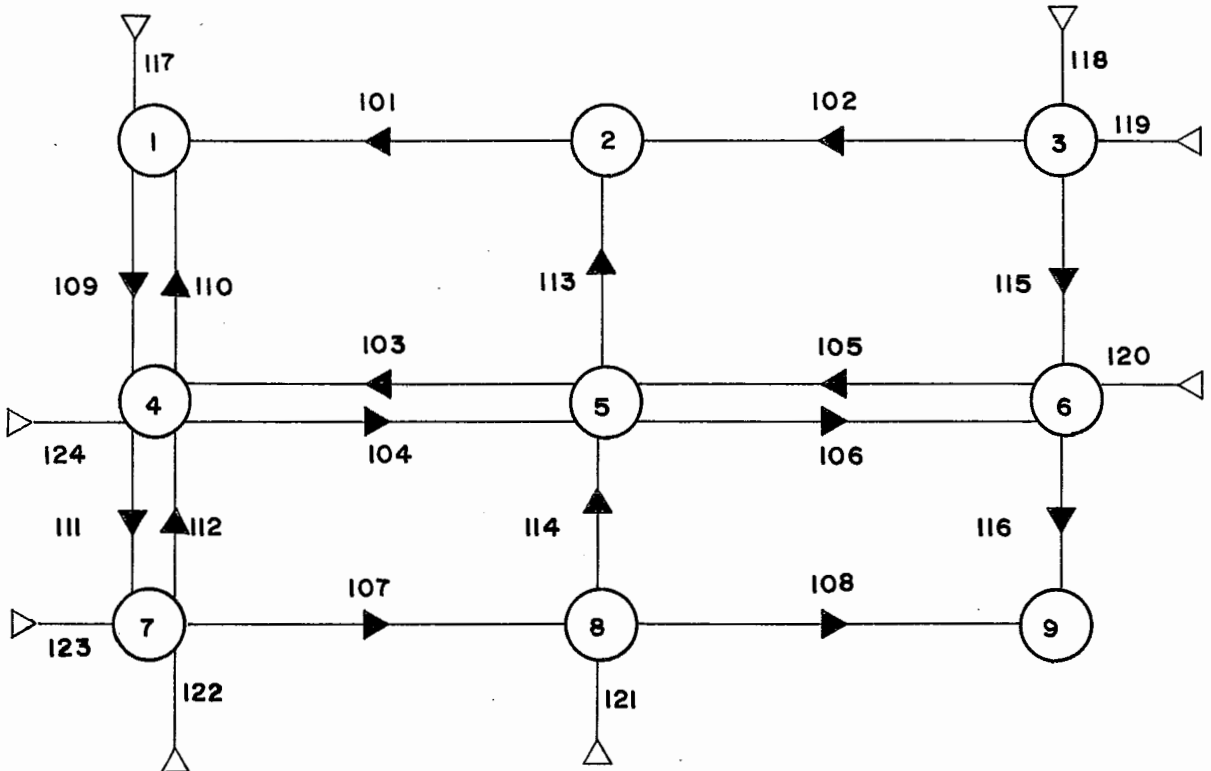


Figura IV.6 - Exemplo de malha a ser resolvida pelo MITROP

Na resolução do problema global, uma primeira solução contínua é obtida considerando todas as variáveis contínuas. Esta solução fornece um valor mínimo para todas as soluções admissíveis do problema original. As variáveis inteiras são então submetidas a um processo de busca do tipo Branch and Bound, a separação sendo feita a partir do valor inteiro imediato superior ao valor real da solução inicial. A cada passo, o problema global, com algumas variáveis inteiras já prefixadas, tem de ser resolvido. Uma vez encerrado este processo de procura (avaliação e eliminação de sub-famílias de soluções acima da árvore das soluções), tem-se certeza que a melhor solução

encontrada é a solução ótima. Assim nota-se que a determinação prévia dos ciclos independentes minimizará o número de variáveis inteiras e diminuirá o esforço computacional a desenvolver. Portanto, a utilização deste método será geralmente condicionada à disponibilidade de um computador de grande porte dotado de um software de Programação Linear Mista. Assim, por exemplo, Gartner utilizou o MPSX da IBM, enquanto que em um estudo comparativo com o TRANSYT desenvolvido na COPPE/UFRJ (JUNQUEIRA(26)) utilizou-se do sistema TEMPO implantado num computador Burroughs B6700.

A seguir, apresenta-se um exemplo destes resultados comparativos relativos à rede representada na Figura IV.7:

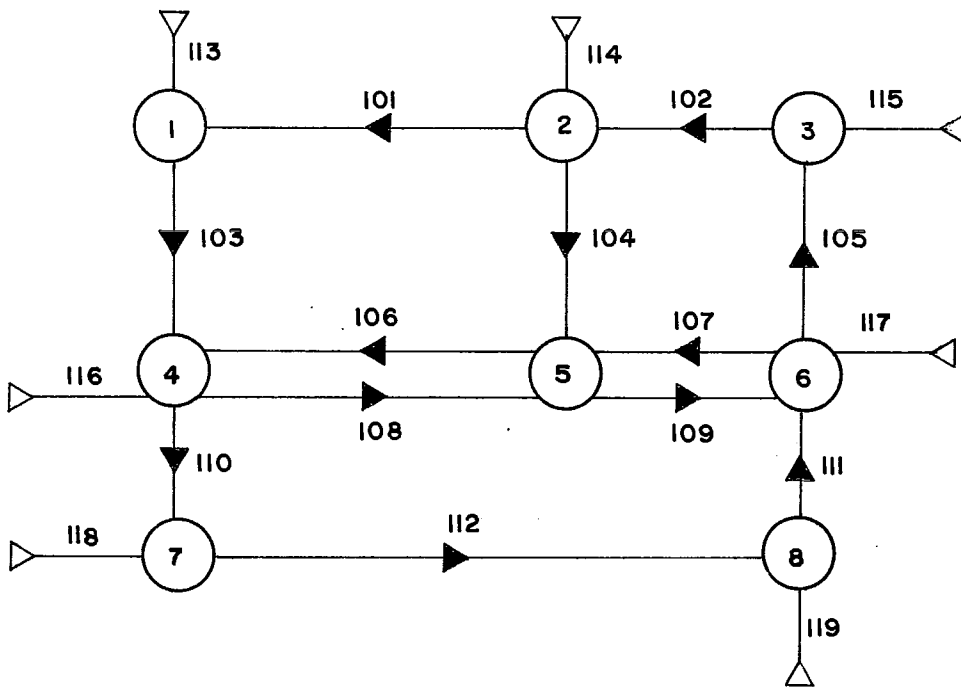


Figura IV.7 - Rede em que foram testados os pacotes TRANSYT e MITROP.

Na Tabela IV.1 são apresentados os desempenhos "performance" dos programas MITROP e TRANSYT para esta mesma rede.

Rede: 12 arcos internos, 7 arcos externos, 8 nós.

SOFTWARE	COMPUTADOR	TEMPO CPU
MITROP	B 6700	2 min. 45 seg.
TRANSYT	IBM 370/145	1 min. 55 seg.

Tabela IV.1 - Desempenho dos pacotes MITROP e TRANSYT para a rede dada Fig.IV.7.

e na Tabela IV.1 são comparadas as soluções obtidas através das duas abordagens.

Nº ARCO	VERDE MITROP (segundos)	VERDE TRANSYT (segundos)
101	33	38
102	24	26
103	18	16
104	26	27
105	18	28
106	38	40
107	30	29
108	30	29
109	33	34
110	19	24
111	23	22
112	16	23
113	23	18
114	32	30
115	38	28
116	38	40
117	33	34
118	37	32
119	40	33

CICLO = 66 segundos

Tabela IV.2 - Comparação das políticas do MITRÓP e do TRANSYT no caso da rede da Figura IV.7.

Assim, os dois métodos comparados neste estudo têm conduzido, após várias iterações no uso do programa TRANSYT, à soluções notoriamente similares. Uma conclusão idêntica poderia ser obtida considerando outros métodos de Programação Matemática para otimizar planos de sinalização.

#### IV. 4 - UM ALGORÍTMO PARA GERAR UM PLANO DE SINALIZAÇÃO INICIAL

Na geração do plano de sinalização inicial intervem duas partes: a primeira serve para escolher o ciclo comum e para indicar as interseções que terão um tempo de ciclo equivalente à metade do ciclo comum; na segunda parte se calcula a repartição dos tempos de verde para cada um dos nós da rede.

A definição de um ciclo comum para uma sub-área urbana tem sido tratada independentemente da definição dos outros elementos de um plano de sinalização pelo programa TRANSYT. O valor inicial do ciclo tem sido obtido seja a partir dos conhecimentos práticos dos Engenheiros de Tráfego, ou a partir de processos empíricos. Pode-se notar também que no caso de métodos de Programação Matemática para a otimização de planos (MITROP) uma boa escolha inicial da duração do tempo de ciclo comum poderá diminuir notavelmente o tempo de cálculo do plano ótimo.

A seguir, apresenta-se o método empírico de determinação do ciclo comum programado no sistema computacional desenvolvido neste trabalho de tese. Também o método empírico utilizado para determinar a repartição inicial dos tempos de verde é descrito.

Para definir o tempo de ciclo comum, é preciso considerar os parâmetros que serão definidos a seguir:

$Y_{(m)}$  = taxa de ocupação do arco 'm'

$$Y_{(m)} = \frac{q_{(m)}}{S_{(m)}} \quad (\text{IV.21})$$

onde:

$q_{(m)}$  = fluxo médio de veículos no arco 'm'

$S_{(m)}$  = fluxo de saturação no arco 'm'

A taxa de ocupação crítica de uma fase será o maior valor dentre as taxas de ocupação de todos os arcos que intervem numa mesma fase, segundo a seguinte relação:

$$YF_{(m)}^Q = \max. \begin{cases} Y_{(m)}, \bar{v}_m & \text{que participa da fase } Q \text{ no} \\ \text{nó 'm'} & \end{cases} \quad (\text{IV.22})$$

onde:

$YF_{(m)}^Q$  = taxa de ocupação crítica da fase  $Q$  no nó 'm'

O somatório de todas as taxas de ocupação crítica das diferentes fases de um nó dá como resultado a taxa de ocupação do nó 'm', dada segundo a relação:

$$YN_{(m)} = \sum_{Q=1}^{NF(n)} YF_{(m)}^Q \quad (\text{IV.23})$$

onde:

$YN_{(m)}$  = taxa de ocupação do nó 'm'

$YF_{(m)}^Q$  = taxa de ocupação crítica da fase  $Q$  do nó 'm', segundo (IV.4.2)

$NF_{(m)}$  = número total de fases do nó 'm'

O tempo perdido para cada interseção é calculado somando os tempos perdidos no início e no fim do verde com os



tempos de vermelho integral de cada fase, todos estes sendo fornecidos pelo usuário. O tempo perdido em cada nó é dado pela seguinte expressão:

$$PN_{(m)} = \sum_{Q=1}^{NF(n)} PF_{(m)}^Q \quad (IV.24)$$

onde:

$PN_{(m)}$  = tempo perdido no nó 'm', por ciclo.

$PF_{(m)}^Q$  = tempo perdido na fase Q do nó m.

o tempo perdido para cada fase em um nó está dado por:

$$PF_{(m)}^Q = P1_{(m)}^Q + P2_{(m)}^Q + P3_{(m)}^Q \quad (IV.25)$$

onde:

$P1_{(m)}^Q$  = tempo perdido no início do verde na fase Q do nó 'm'.

$P2_{(m)}^Q$  = tempo perdido no fim do verde na fase Q do nó 'm'.

$P3_{(m)}^Q$  = tempo de vermelho integral associado com a fase Q do nó 'm'.

No cálculo do ciclo de forma independente para cada interseção utiliza-se a fórmula desenvolvida por WEBSTER(50), que a partir da relação dos atrasos totais em função do tempo de ciclo numa interseção isolada, encontrou uma expressão para o tempo de ciclo que minimiza tais atrasos. A seguir apresenta-se esta relação:

$$C_{(m)} = (1.5 PN_{(m)} + 5) / (1 - YN_{(m)}) \quad (IV.26)$$

onde  $PN_{(m)}$  e  $YN_{(m)}$  são definidos segundo (IV.24) e (IV.23) respectivamente.

A partir da relação dos atrasos médios totais numa interseção, MILANI e de ALBUQUERQUE(31) determinaram uma faixa de variação do tempo de ciclo na qual os atrasos se incrementam em 10% em relação ao atraso correspondente ao tempo de ciclo calculado segundo(IV.26). A seguir apresenta-se a referida faixa:

$$C_{MIN(m)} \leq TC_{(m)} \leq C_{MAX(m)} \quad (IV.27)$$

onde:

$$C_{MIN(m)} = (1.3/1.7) C_{(m)} \quad (IV.28)$$

$$C_{MAX(m)} = (2.5/1.7) C_{(m)} \quad (IV.29)$$

definindo:

$$T1 = C_{MAX(m)} + \Delta t ; e, \quad (IV.30)$$

$$T2 = C_{MIN(m)} - \Delta t \quad (IV.31)$$

tem-se a relação seguinte entre os atrasos totais resultantes:

$$A(T1) < A(T2) \quad (IV.32)$$

o mesmo que se pode observar na Figura III.4 do capítulo anterior, do que se conclui que é preferível acrescentar o tempo

de ciclo num valor  $At$  a partir de  $C_{MAX}$ , do que subtrair de  $C_{MIN}$ .

A partir dos parâmetros definidos acima, estabelece-se o algoritmo que define o tempo de ciclo comum para uma rede de tráfego dado. Este algoritmo apresenta os seguintes passos:

1 - Cálculos preliminares:

$$Y_{(m)} \quad \forall m \in NI;$$

$$P_{(m)} \quad \forall m \in NI;$$

$$C_{(m)} \quad \forall m \in NI;$$

$$C_{(m)MIN}, C_{(m)MAX}, TC_{(m)}, \quad \forall m \in NI.$$

2 - Cálculo do conjunto CI:

$$CI = \left\{ \bigcap TC_{(m)} \quad \forall m \in NI \right\} \quad (IV.33)$$

3 - Se o conjunto CI não for vazio (no caso contrário ir a 4): escolhe-se como ciclo comum uma duração múltiplo de dez que esteja contida neste conjunto; além disso e por razões práticas, o tempo de ciclo comum ficará restrito à seguinte faixa:

$$40 \text{ segundos} \leq C_{COM} \leq 120 \text{ segundos} \quad (IV.34)$$

ir ao passo 5.

4 - Se o conjunto CI é vazio, então se escolherá como tempo de ciclo comum o maior entre os  $C_{(m)MIN}$ .

$$CICOM = \max \left\{ CMIN_{(m)} \quad \forall m \in NI \right\} \quad (IV.35)$$

este valor será aproximado pelo múltiplo de dez mais próximo, e será submetido à restrição (IV.4.14).

5 - Neste passo procede-se à determinação das aproximações que terão um ciclo (CIC 2) equivalente à metade do valor do ciclo comum (CICOM). Assim, compara-se CIC 2 com os tempos de ciclo ótimos de cada interseção segundo o seguinte critério:

$$\text{se } C_{(m)} < CIC\ 2, \text{ então } CICLO_{(m)} = CIC\ 2$$

$$\text{se } C_{(m)} > CIC\ 2, \text{ então } CICLO_{(m)} = CICOM$$

onde:

$$CICLO_{(m)} \hat{=} \text{ ciclo adotado na interseção 'm'.$$

A seguir apresenta-se o método preconizado pelos manuais de Engenharia de Tráfego para determinar a repartição dos tempos de verde em interseções isoladas. Este método foi o escolhido no programa computacional desenvolvido, dentro do cálculo do plano inicial (quando necessário).

O tempo útil do ciclo num nó 'm' será dado pela seguinte relação:

$$TU_{(m)} = CICLO_{(m)} - PN_{(m)} \quad (IV.36)$$

O tempo efetivo de verde da interseção 'm' para a fase Q será calculada segundo a relação seguinte:

$$V_{(m)}^Q = \frac{YF_{(m)}^Q}{YN_{(m)}} \cdot (TU_{(m)}) \quad (IV.37)$$

onde:

$Q$   
YF . está dado segundo (IV. 22);  
(m)

YN está dado segundo (IV. 23); e  
(m)

TU segundo (IV.36)  
(m)

A seguir será gerado o plano de sinalização levando em conta os tempos de verde efetivos calculados, as defasagens dadas, os tempos perdidos no início e no fim dos verdes, o tempo de amarelo adotado e os tempos de vermelho integral dados. Os tempos de todos os sinais são referidos a um "relógio comum" que marca o tempo de ciclo em "passos".

#### IV.5 - UMA NOVA PROPOSTA METODOLÓGICA NA OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE SINALIZAÇÃO

Nos itens anteriores (IV.2 e IV.3) apresentaram-se as duas principais abordagens encontradas na literatura para definir planos ótimos de sinalização. Viu-se que as duas apresentam grandes limitações, assim como alguns pontos discutíveis tanto em termos teóricos como práticos. Assim, se de um lado o método TRANSYT se revela extremamente rudimentar em termos de processo de busca de soluções ótimas, o método MITROP (entre outros) para viabilizar a utilização de técnicas avançadas de Programação Matemática conduz à adoção de uma representação Matemática do problema, que foge do controle do seu usuário, o Engenheiro de Tráfego.

A proposta metodológica a ser apresentada é baseada não só nesta constatação como também nos elementos expostos a seguir:

- Por um lado, nestes últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia do microprocessador observou-se a aparição

dos microcomputadores com preços e desempenho cada vez melhores. Estes microcomputadores já são disponíveis desde alguns anos com linguagens de alto nível (BASIC, PASCAL e FORTRAN, este último tradicional na área de Transportes), e vários outros recursos computacionais (editores de texto, sistemas de gerência de banco de dados, ...). O treinamento e uso de tais sistemas por técnicos e engenheiros tanto de transporte como de outras áreas de aplicação da Engenharia tem-se revelado muito satisfatório. Em muitas cidades de meio porte, tanto no Brasil (Juiz de Fora, Londrina, Florianópolis, Vitória, ...) como no exterior (Quito, Cartagena, La Paz, ...) onde existem necessidades de implantação criteriosa de planos de sinalização, não é possível criar, principalmente por razões financeiras, um centro de cálculo especializado com um computador de grande porte para tratar um problema específico. Assim, a utilização de sistemas computacionais baseados em microcomputadores parece apresentar uma viabilidade no aprimoramento do controle do tráfego urbano.

- Por outro lado, o problema de controle do tráfego urbano é relacionado com vários aspectos da vida da cidade, muitas vezes não quantificáveis e ignorados simplesmente pelos métodos apresentados anteriormente. Também, geralmente o Engenheiro de Tráfego responsável por uma certa área urbana tem um grande conhecimento das condições nesta área, adquirido ao longo do tempo com a vivência diária de sua operação. Assim, muitas vezes o que se precisa realmente não é de definir total e integralmente um plano "ótimo, mas sim completar e acomodar soluções parciais fornecidas por ele próprio. Finalmente, parece importante que o próprio Engenheiro de Tráfego seja um elemento de decisão solicitado pelo processo de otimização de planos de sinalização.

Assim, aqui propõe-se a construção de uma ferramenta de avaliação de planos de sinalização, um modelo de simulação, baseado no uso do microcomputador. Esta ferramenta seria utilizada de maneira iterativa por um decisor (o Engenheiro de Tráfego) que iria propondo aos poucos modificações para planos de sinalização, (ver Figura IV.8).

Não é possível aqui fornecer um algoritmo gerador das modificações a serem introduzidas no plano corrente neste processo. Para cada caso particular, numa abordagem eminentemente heurística, o Engenheiro de Tráfego baseando-se nos comprimentos de filas residuais, graus de saturação e outros parâmetros de tráfego, definiria quais seriam as modificações a serem consideradas a seguir. Para este último seria também proveitoso que o sistema fosse provido de um gerador de planos tal como o apresentado no parágrafo IV.4.

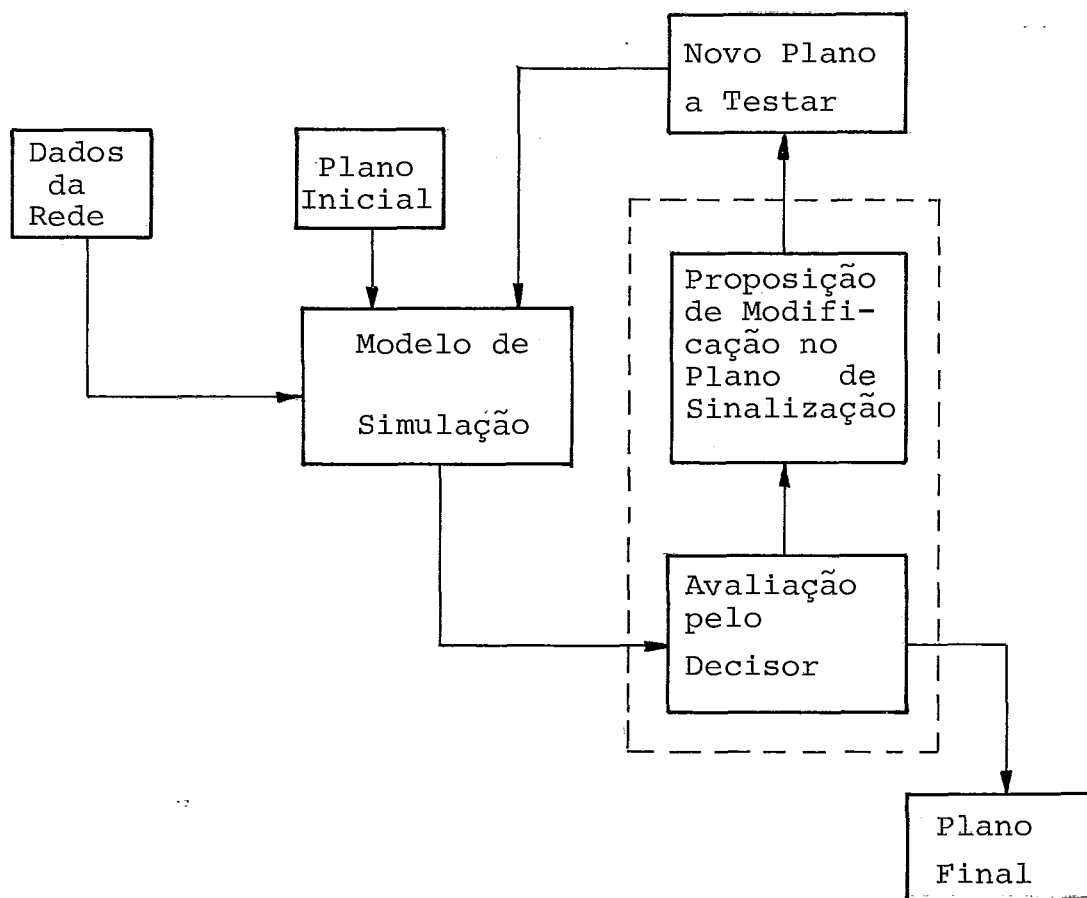


Figura IV.8 - Abordagem de otimização proposta.

Finalmente, é também importante notar que esta proposta é compatível com os sistemas de controle de tráfego mais robustos e confiáveis: os sistemas de controle a tempo fixo (veja-se no capítulo III).

No capítulo seguinte será apresentado o programa de computação desenvolvido para fornecer um tal sistema de apoio à decisão para o Engenheiro de Tráfego.



CAPÍTULO V - O MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO

## V - O MODELO DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDO

### V.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o modelo de simulação desenvolvido. Tanto os fundamentos teóricos, como as hipóteses básicas e a forma de representar a rede viária apresentam poucas diferenças em relação às do modelo de simulação do programa TRANSYT versão 6. Portanto, alguns pontos não explícitos deste último modelo têm sido desenvolvidos de forma original, sem procurar jamais entrar no detalhe do programa TRANSYT. Também o suporte computacional escolhido, um microcomputador de 8 bits por palavra com CP/M, Fortran 80, e Wordstar, equipado de um terminal vídeo e duas leitoras de discos flexíveis, conduziu a uma reorganização total dos cálculos. As principais limitações são relativas à memória central do microcomputador (64 K) e a organização dos arquivos de informações gerados e armazenados nos discos magnéticos. O programa do modelo de simulação foi escrito com ajuda do editor de textos Wordstar que facilitou bastante esta etapa do trabalho.

Numa primeira parte do capítulo, os fundamentos teóricos e as hipóteses básicas implantadas no modelo são apresentados. A seguir a forma de representar a rede viária e os fluxos de veículos é descrita detalhadamente, assim como os índices de desempenho escolhidos. Finalmente o programa do modelo de simulação é descrito em termos de organização dos cálculos e estrutura dos arquivos da memória.

### V.2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E HIPÓTESES BÁSICAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

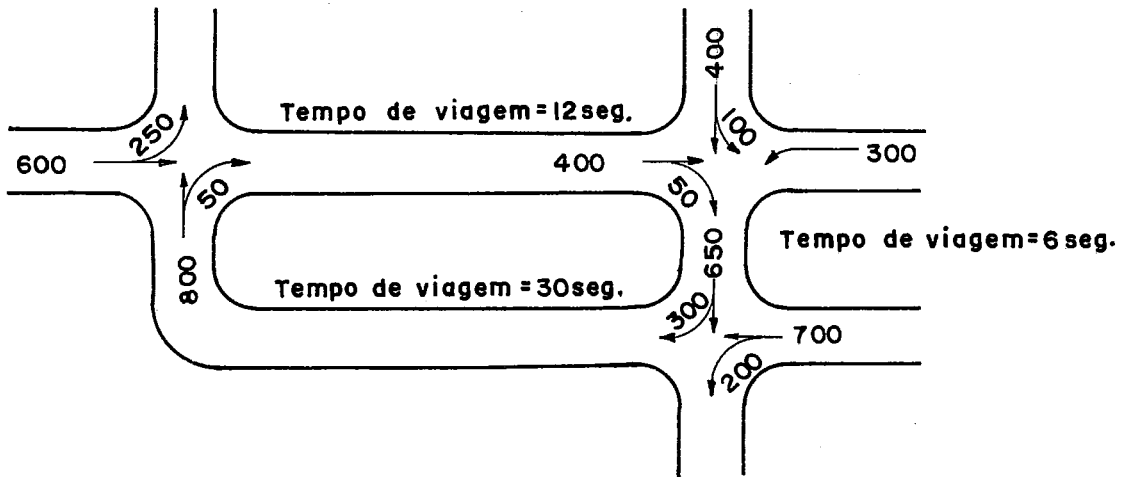
O modelo de simulação desenvolvido é do tipo mesoscópico, utilizando a noção de pelotões e o modelo de dispersão os mesmos de Robertson (ver capítulo IV). Dado um plano de sinalização, o modelo de simulação deve fornecer vários índices de desempenho (locais e globais) dos fluxos do tráfego dentro da rede viária. Várias hipóteses simplificadoras são consideradas na confecção do modelo:

- i) - Todos os cruzamentos considerados na rede são semaforizados;
- ii) - Os semáforos da rede utilizam um tempo de ciclo comum ou a metade do mesmo;
- iii) - Pode-se admitir que os fluxos que entram na rede apresentam taxas constantes;
- iv) - A percentagem dos fluxos que gira a esquerda ou a direita em cada cruzamento permanece constante de um ciclo para outro;
- v) - Não existe saturação na rede (todas as filas são escoadas no fim do estágio de verde);
- vi) - É possível definir um caminho entre todas as intersecções que caracterize as principais interdependências entre elas.

Destas hipóteses algumas não são muito restritivas (i,iii,iv,vi) enquanto que outras podem limitar fortemente o campo de aplicação do modelo (v) ou podem conduzir a redefinição da área em estudo (ii). No caso da hipótese (v), é possível argumentar que se existe algum plano para a área em estudo que elimina a saturação, e que se ele for descoberto, o modelo poderá ser aplicado. Portanto, pode-se pensar em implementar penalidades medindo o grau de saturação da rede de forma que os planos com alto grau de saturação sejam eliminados.

### V.3 - REPRESENTAÇÃO DA REDE DE TRÁFEGO URBANO

A Rede de Tráfego Urbano é representada mediante nós e arcos, os mesmos que simbolizando as intersecções e as vias respectivamente; os arcos interligam os diferentes nós da rede viária. Na Figura V.1.a ROBERTSON (38) se observa uma pequena rede de de tráfego, representada segundo o diagrama da Figura V.1 b.

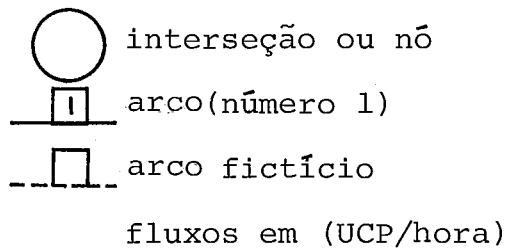
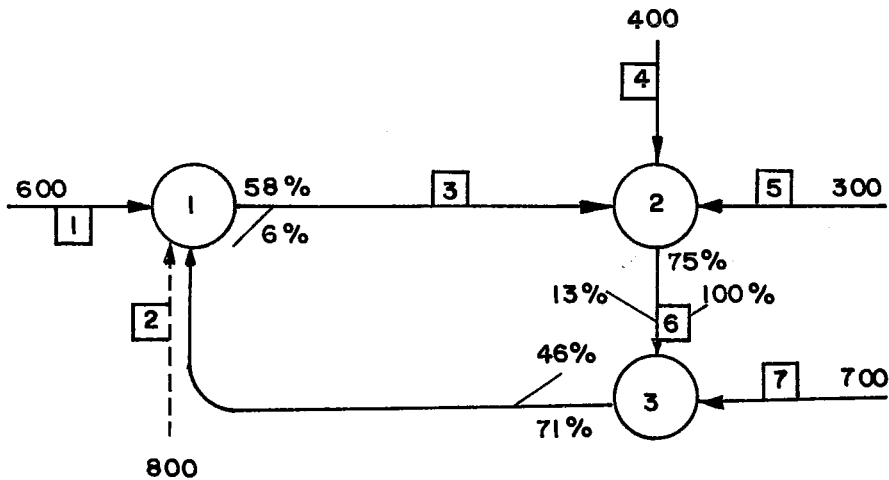


Tempos de viagem médios

Todos os fluxos estão em unidade de carro de passeio por hora (UCP/hora)

Todos os fluxos de saturação são 1800 (UCP/hora)

a) Rede com os fluxos reais.

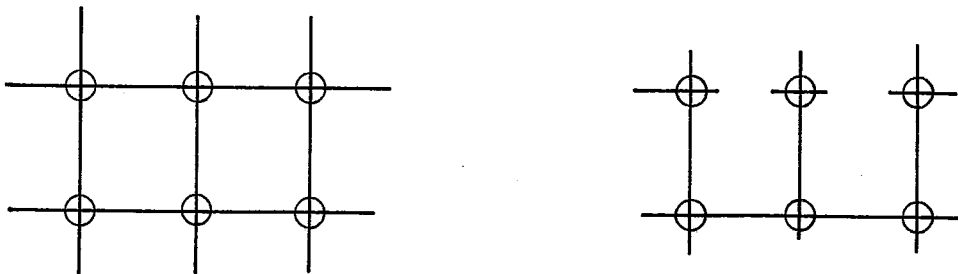


b) Representação da rede mediante nós e arcos.

Figura V.1 - Rede de Tráfego Urbano Simples

Os fluxos médios são dados em unidade de carro de passeio por hora (UCP/hora), chamados também (veículos/hora) (as equivalências dos diferentes tipos de veículos em (UCP) podem ser encontradas em SALTER(41)).

A rede deve ser aberta pois esta evita as realimentações (malha fechada), já que neste caso a determinação dos fluxos em regime de equilíbrio precisa de cálculos iterativos que aumentarão demasiado o tempo de cálculo, e poderão levantar problemas de não convergência. Para transformar uma malha fechada numa aberta é preciso cortar certos arcos e criar "arcos fictícios". Na Figura V.2 pode-se observar os dois tipos de malhas.



a) Malha fechada

b) Malha aberta

Figura V.2 - Exemplo de malhas fechada e aberta

No caso de ter uma rede com malhas fechadas é necessário cortar alguns arcos que devem ser substituídos por arcos artificiais. Isto implica transformar um arco interno simultaneamente em uma saída de veículos e um arco que entra com um fluxo equivalente constante. Este fluxo equivalente (Figura V.3) pode corresponder a uma aproximação muito grosseira do fluxo real do arco cortado. Para diminuir este problema é preciso utilizar os seguintes critérios para escolher os arcos internos a serem cortados:

- i) - Dar prioridade no corte a arcos com baixo fluxo pois seu peso em termos de custos será pequeno;

- ii ) - Aplicar o procedimento anterior no caso de arcos que apresentem fluxos próximos aos de saturação (neste caso o fluxo apresenta características quase determinísticas);
- iii) - No caso de arcos compridos, devido ao alto tempo de percurso, gera fluxos praticamente constantes.

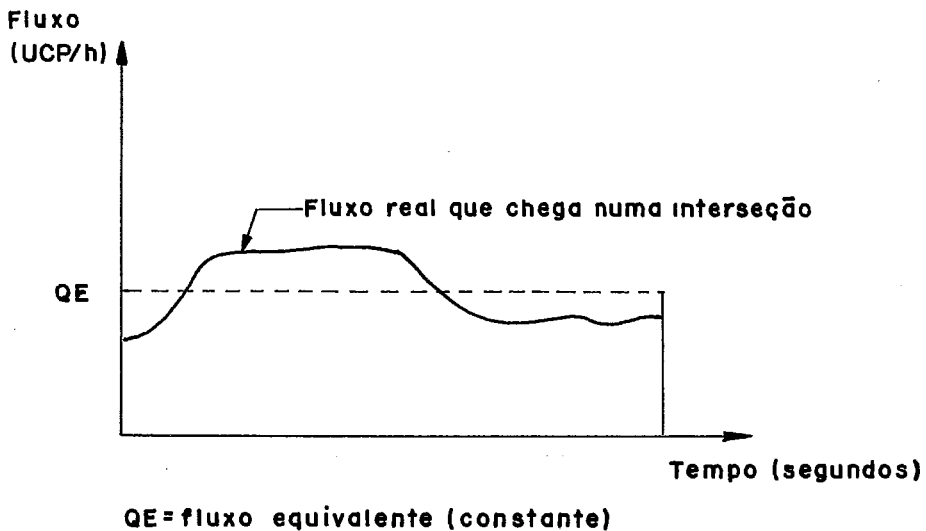


Figura V.3 - Fluxo de chegada numa aproximação de uma interseção.

O tempo de ciclo comum é considerado composto por no máximo 50 intervalos iguais chamados "passos". No caso de interseções cujo ciclo é a metade do ciclo comum se considera então, no máximo, 25 passos por ciclo. Todos os cálculos efetuados no programa são feitos a partir de valores médios dos fluxos e do comprimento médio das filas durante cada um destes passos de tempo.

O padrão do fluxo médio do tráfego que passa por uma via da malha é representado por histogramas nos quais nos eixos das ordenadas se tem o fluxo em (UCP/hora) e no eixo das abscissas se tem o tempo em passos Figura V.4. Uma divisão do tempo de ciclo em 50 passos dá informações de qualidade consistente com as aproximações realizadas nos cálculos e ainda permite limitar os recursos computacionais necessários (memória

e tempo de processamento do microcomputador). Na prática os padrões de fluxo, de um ciclo para outro, variam em relação ao padrão médio devido ao comportamento aleatório de cada um dos pelotões. Para levar em conta este efeito são realizados cálculos suplementares apresentados mais adiante. Todos os cálculos são levados a cabo a partir das informações contidas nos histogramas.

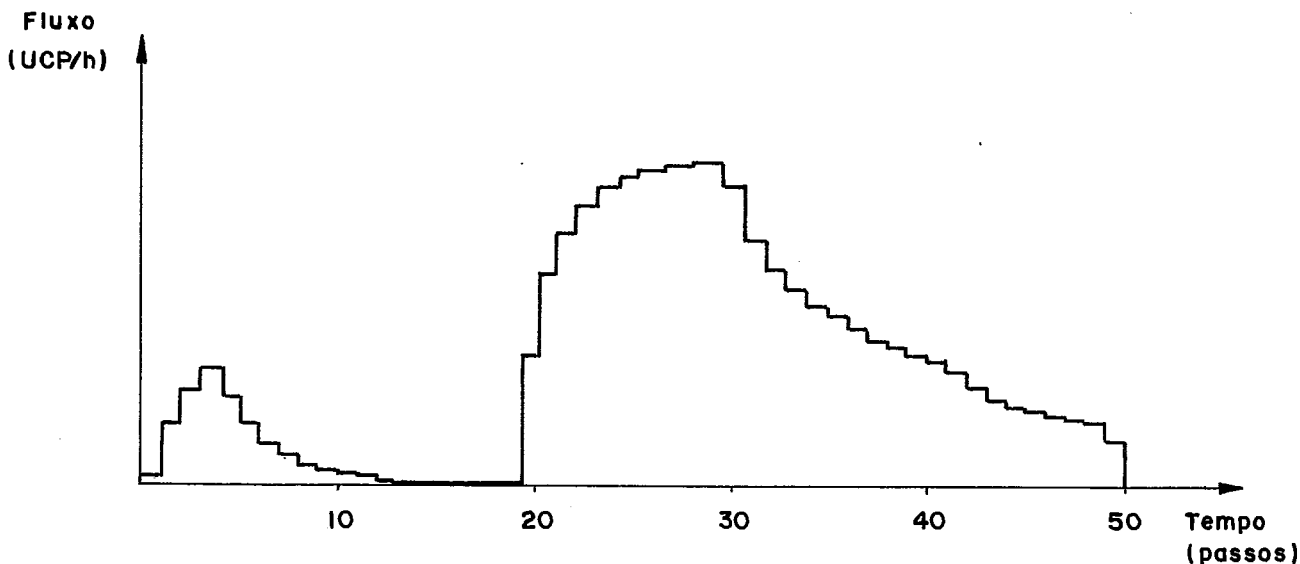


Figura V.4 - Histograma do Fluxo de Tráfego

O comportamento do tráfego dentro de um arco é definido a partir de três tipos de histogramas (Figura V.5).

- i) - O padrão IN, representa o fluxo de tráfego que entra no arco;
- ii) - O padrão GO, representa o fluxo de tráfego que chega até a linha de parada no final do arco;
- iii) - O padrão OUT, representa o fluxo de tráfego que abandona o arco.

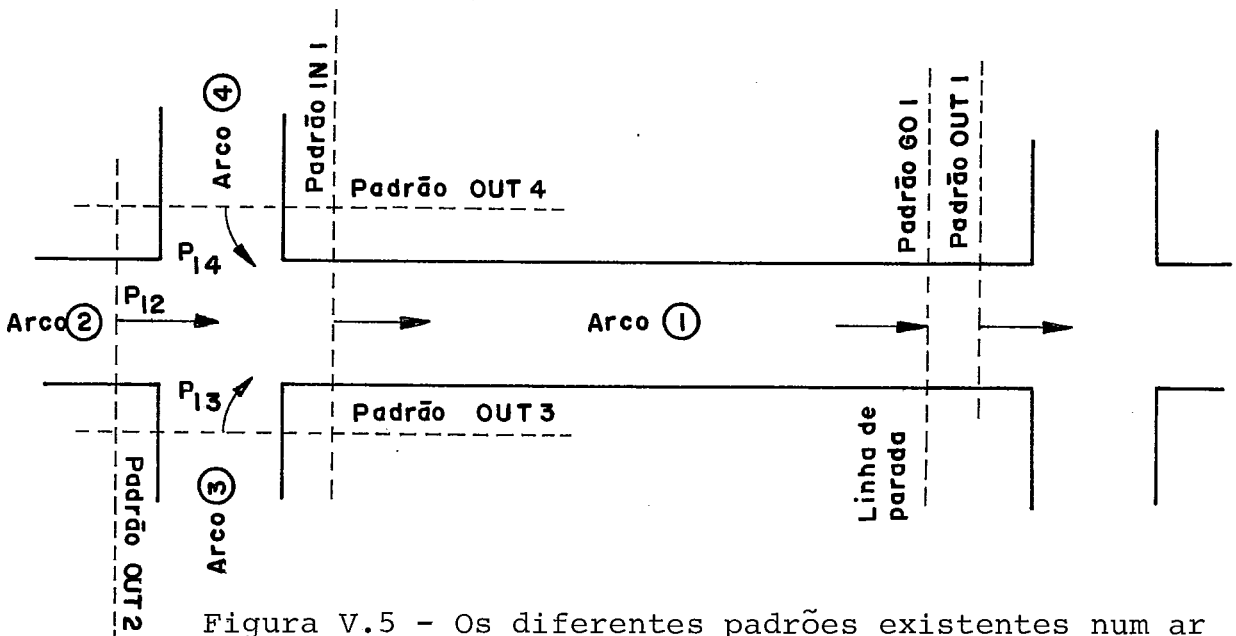


Figura V.5 - Os diferentes padrões existentes num arco da rede de tráfego urbano.

O padrão IN de um arco é dado pela somatória das percentagens dos padrões que entram nele, como se observa na Figura V 5, e pode ser expresso da seguinte forma:

$$IN(m)_j = \sum (P_{ml} OUT(l)_j) \quad (V.1)$$

Onde:  $IN(m)_j$  = fluxo que entra no arco 'm' no instante 'j'

$OUT(l)_j$  = fluxo que sai do arco 'l' no instante 'j'

$P_{ml}$  = percentagem do fluxo  $OUT(l)_j$  do arco 'l' que entra no arco 'm' (percentagem de giro)

Deve-se observar que no caso de arcos externos que têm fluxo de tráfego constante, o padrão de entrada não precisa ser calculado.

O padrão GO considerado no final do arco é gerado a partir do padrão IN ao qual se aplica o modelo de dispersão de pelotão, já apresentado no Capítulo II, na relação recursiva II.23. Assim, aqui temos:



$$GO(m)_{i+t} = F IN(m)_i + (1-F) GO(m)_{i+t+1} \quad (V.2)$$

Onde:  $GO(m)_i$  = fluxo esperado na linha de parada no instante 'i' no arco 'm'

$IN(m)_i$  = fluxo que entra no arco 'm' no instante 'i'

os demais fatores são levados em conta da mesma forma que em (II.23), além disso,

$$GO(m)_t = 0 ; t = \text{tempo de viagem} \quad (V.3)$$

O padrão OUT representa o fluxo de tráfego que abandona a linha de parada (Figura V.5). Para determiná-lo se levam em conta os elementos seguintes: o estado do sinal referente ao arco, o fluxo de saturação da via correspondente, e o estado da fila (se existir) no arco.

O histograma da fila, ou seja, o número de veículos que espera na linha de parada em cada instante 'i' é dado pelas seguintes relações:

$$F(m)_j = F(m)_{j-1} + GO(m)_j \quad \forall j \in \text{tempo de vermelho} \quad (V.4)$$

$$F(m)_j = \begin{cases} F(m)_{j-1} + GO(m)_j - S(m) & \forall j \in \text{tempo de verde} \\ 0 & \text{se } F(m)_{j-1} + GO(m)_j - S(m) < 0 \end{cases} \quad (V.5)$$

Onde:  $F(m)_j$  = número de veículos (UCP) na linha de parada do arco 'm' no instante 'j'

$GO(m)_j$  = fluxo que chega à linha de parada do arco 'm' no instante 'j'

$S(m)$  = fluxo de saturação do arco 'm' (capacidade máxima de escoamento dos veículos de um arco)

Os histogramas das filas são calculados inicialmente para todos os arcos e devem ser recalculados para os arcos considerados durante a simulação.

Em paralelo ao cálculo dos histogramas das filas pode-se calcular os padrões OUT, segundo a seguinte relação:

$$OUT(m)_j = 0 \quad \text{se } j \in \text{ ao tempo de vermelho} \quad (V.6)$$

$$OUT(m)_j \begin{cases} S(m) & \text{se } F(m)_j + GO(m)_j \geq S(m) \\ F(m)_j + GO(m)_j & \text{se } F(m)_j + GO(m)_j < S(m) \end{cases} \\ \text{se } 'j' \in \text{ ao tempo de verde do arco } 'm'$$

(V.7)

Assim, o modelo de simulação cuida da determinação destes três tipos de padrões de fluxo e dos histogramas das filas para todos os arcos simulados numa só iteração relativa a um ciclo completo (de no máximo 50 passos). A partir destes dados gerados pelo modelo, pode-se calcular vários índices de desempenho como descrito a seguir.

#### V.4 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO

A partir das informações dos histogramas descritos no parágrafo anterior, são calculados os índices de desempenho da rede que permitem caracterizar o estado da rede, em consequência da regulação atual dos sinais e serve como base para o processo de otimização.

Os Índices de Desempenho considerados são:

ID1 = atraso total

ID2 = número total de paradas

Definindo:

$$ID1 = \sum_{m=1}^{NA} (AU(m) + AA(m)) \quad (V.8)$$

e

$$ID2 = \sum_{m=1}^{NA} P(m) \quad (V.9)$$

pode-se propor o índice global agregando:

$$ID = ID1 + K ID2$$

onde:

AU(m) = Atraso uniforme médio no arco 'm'

AA(m) = Atraso aleatório no arco 'm'

P(m) = Número médio de paradas no arco 'm'

K = Fator de penalidade de parada fornecido pelo usuário, (K=0 implica que o número médio de paradas não vai influir no cálculo do ID. K>0 permite somar no ID a influência do número médio de paradas penalizado segundo 'K')

NA = Número total de arcos da malha estudada

O atraso uniforme médio é o atraso total sofrido pelos veículos que ficam retidos, dividido pelo número de passos do ciclo. É obtido diretamente a partir dos histogramas da fila como se indica a seguir:

$$AU(m) = \frac{1}{NP} \left( \sum_{j=1}^{NP} F(m)_j \right) \quad (V.10)$$

- Onde:
- $AU(m)$  = Atraso uniforme médio no arco 'm';
  - $NP$  = Número de passos em que está dividido o tempo de ciclo;
  - $F(m)_j$  = Número de veículos na linha de parada no instante 'j', ( $j = 1, \dots, NP$ ) para o arco 'm'.

O atraso aleatório é gerado pelas variações em torno dos valores médios do tamanho da fila, o fluxo de veículos, a distribuição do fluxo dentro do tempo de ciclo e a dispersão do pelotão. As flutuações aleatórias podem também resultar de períodos de verde completamente saturados nos quais veículos são detidos por mais de um ciclo. Esta flutuação aleatória aumenta os valores médios do comprimento das filas, dos atrasos e dos números de paradas em relação aos calculados de forma determinística. O cálculo do atraso uniforme se baseia na hipótese de que o padrão de chegada se repete de um ciclo para outro sem nenhuma variação, enquanto que o atraso aleatório é obtido a partir dos atrasos individuais em ciclos sucessivos. Num experimento realizado por HILLER e ROTHERY (22) foram observados padrões de fluxo 300 metros após a linha de parada de um sinal, de forma a poder calcular os atrasos médio e individuais assim como o tamanho da fila numa interseção imaginária colocada nesta posição. Neste experimento foram consideradas diversas taxas de saturação mudando a defasagem em até um ciclo. Na Figura V.6 se mostra a variação típica do atraso em função da defasagem para o caso de pelotões médios e individuais. Estes resultados foram utilizados para determinar uma correlação do atraso aleatório com o grau de saturação. Na Figura V.7 é apresentada esta variação. Observa-se uma dispersão alta para graus de saturação elevados, embora a tendência geral é similar à curva teórica dos atrasos, dada pela relação:

$$AA(m) = \frac{(X(m))^2}{2(1-X(m))} \quad (\text{veículos hora/hora}) \quad (V.12)$$

Onde:  $X(m)$  = grau de saturação do arco 'm'

Esta expressão é utilizada por WEBSTER e COBBE (5) para calcular o atraso aleatório numa interseção isolada.

Atraso medio  
(Veiculos hora/hora)

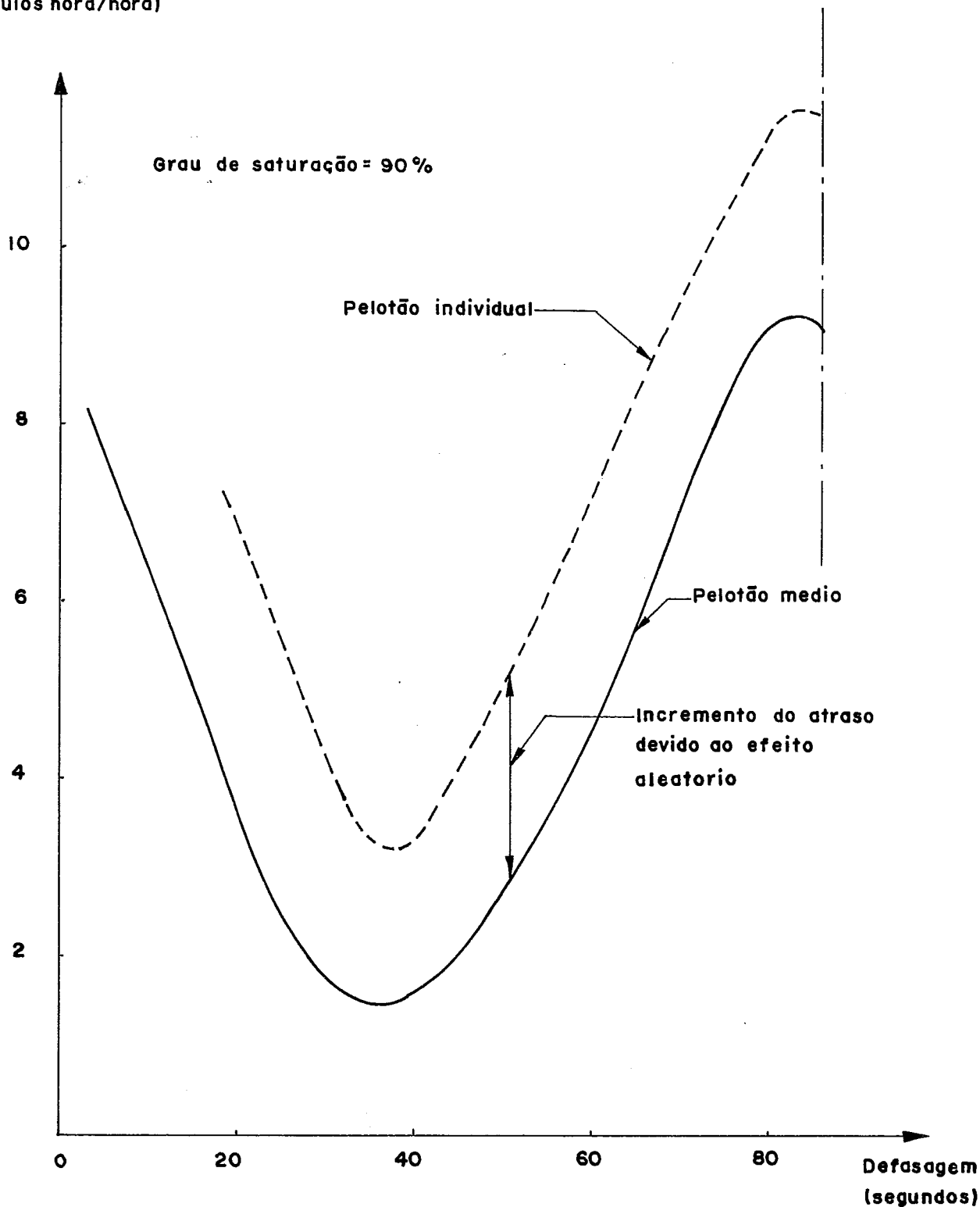


Figura V.6 - Variação dos atrasos em função da defasagem para pelotões individuais e médios.

A Figura V.7 mostra que o atraso aleatório observado na aproximação de uma interseção isolada é maior que no caso de uma arco interligando duas interseções. Nas primeiras versões do TRANSYT, a componente aleatória era calculada em função do grau de saturação da aproximação, a partir da expressão:

$$AA(m) = \frac{(X(m))^2}{4(1-X(m))} \quad (V.13)$$

Onde:  $AA(m)$  = atraso aleatório no arco

$X(m)$  = grau de saturação do arco 'm'

Portanto, esta expressão só é válida para fluxos de saturação inferiores à unidade. Em condições de congestionamento, o fluxo de saturação pode ser superior à unidade. Assim, Robertson utilizou na versão 5 do programa TRANSYT uma expressão empírica válida mesmo neste último caso. A relação mencionada é da forma:

$$AA(m) = (X(m) \alpha(m) - 1) / \beta(m) \quad (V.14)$$

$$\text{Com: } \alpha(m) = (1 + [1 + 2(1/S_\zeta) - 1]X(m)) / (X(m))^2)^{1/2} - 1 \quad (V.15)$$

$$\beta(m) \cong (2/(S_\zeta))(2 - 1/(S_\zeta)) \quad (V.16)$$

e é válida mesmo para valores superiores à unidade. Neste caso, a expressão (V.14) pode também ser considerada como quase-linear de uma função de penalidade.

Não se tem nenhuma referência bibliográfica ou resultado teórico que permite justificar o emprego da relação.

No Modelo de Simulação desenvolvido o cálculo do atraso aleatório distingue dois casos: se o grau de saturação é inferior a um certo valor  $X_F$  ( $X_F$  próximo à unidade,  $X_F$  inferior

à unidade), utiliza-se a relação V.13. Se o grau de saturação for superior a  $X_F$  supõe-se que a variação do atraso aleatório é linear. Assim, utiliza-se a expressão global (ver Figura V.8).

$$AA(m) = \frac{(X_F)^2}{4(1-X_F)} + PE (X(m) - X_F) \quad (V.17)$$

$$\text{com } X(m) \geq X_F \quad \text{e} \quad PE > 0$$

e

$$AA(m) = \frac{(X(m))^2}{4(1-X(m))} \quad \text{se} \quad X(m) < X_F$$

Os parâmetros PE e  $X_F$  deverão ser determinados mediante simulações e pesquisas de campo. Estes parâmetros devem ser diferentes de uma aproximação para outra. Portanto, aqui é suficiente considerar que o termo adicional em V.17 representa uma penalidade à saturação. No processo de otimização, quer ele seja automático como no caso do TRANSYT, ou iterativo como proposto aqui, os planos conduzindo a tais situações serão rejeitados.

O número médio de paradas por ciclo  $P(m)$  é calculado somando o número de veículos que chegam à linha de parada do arco 'm' enquanto a fila estiver não nula e dividindo o resultado pelo número de passos por ciclo.

$$P(m) = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^{NP} GOP(m)_j \quad (V.18)$$

onde:  $GOP(m)_j$  = número de veículos que param no instante 'j' no arco 'm'.

$$GOP(m)_j = \begin{cases} 0 & \text{se } F(m)_j = 0 \\ GO(m)_j & \text{se } F(m)_j > 0 \end{cases} \quad (V.19)$$

NP = número de passos por ciclo.

Atraso aleatório  
(Veículos hora/hora)

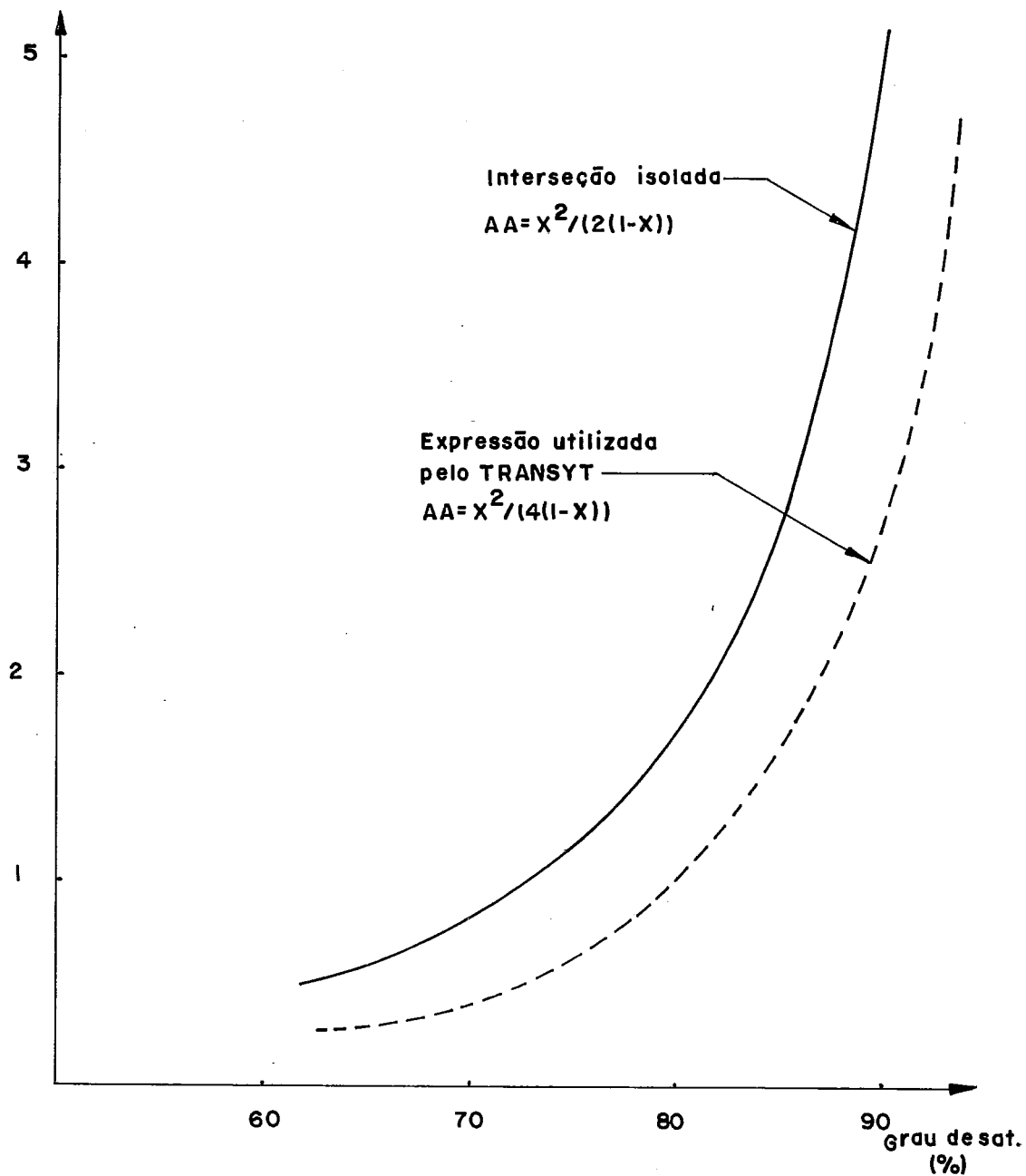


Figura V.7 - Variação do atraso aleatório em função do grau de saturação.



## Atraso Aleatorio

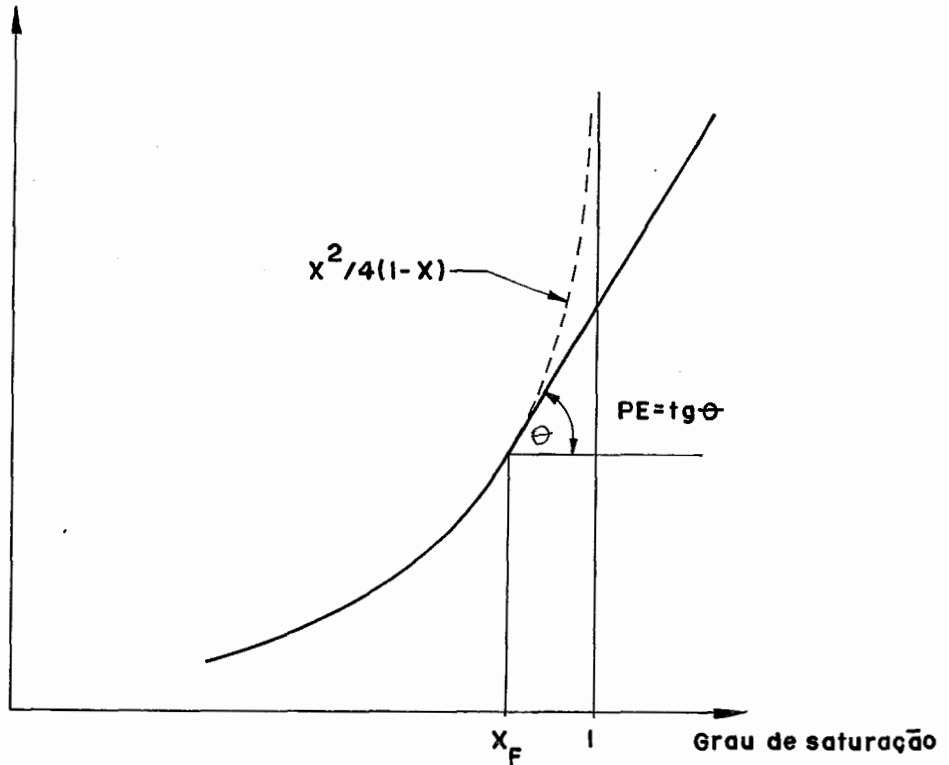


Figura V.8 - O modelo de atraso adaptado.

### V. 5 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

O programa desenvolvido apresenta uma estrutura modular. A seguir serão enumerados os diversos módulos:

- módulo de inicialização.
- módulo para entrada de dados
- módulo para calcular o tempo de ciclo para cada interseção.
- módulo que seleciona o tempo de ciclo comum para toda a rede, e aloca a metade do ciclo aos nós menos carregados.
- módulo de cálculo da repartição inicial dos tempos de verde para cada uma das interseções, e que a partir de defasagens fornecidas inicialmente, calcula o primeiro plano de sinalização a ser avaliado.
- módulo de cálculo dos padrões iniciais IN.
- módulo que calcula os padrões iniciais OUT e os histogramas iniciais das filas.

- módulo que recalcula os padrões IN, GO e OUT, e os histogramas das filas no caso dos arcos simulados.
- módulo de cálculo dos índices de desempenho.

O programa tem a possibilidade de aceitar um plano gerado externamente e ser simulado posteriormente.

O programa do modelo de simulação tem sido escrito em FORTRAN 80 F80 da MICROSOFT(29). Escolheu-se esta linguagem de programação, já que ela é das mais difundidas na área de Engenharia de Tráfego no que se refere a processamento de dados, tornando assim a leitura do programa acessível a um maior número de técnicos da área.

A seguir apresenta-se um fluxograma do programa desenvolvido na Figura V.9.

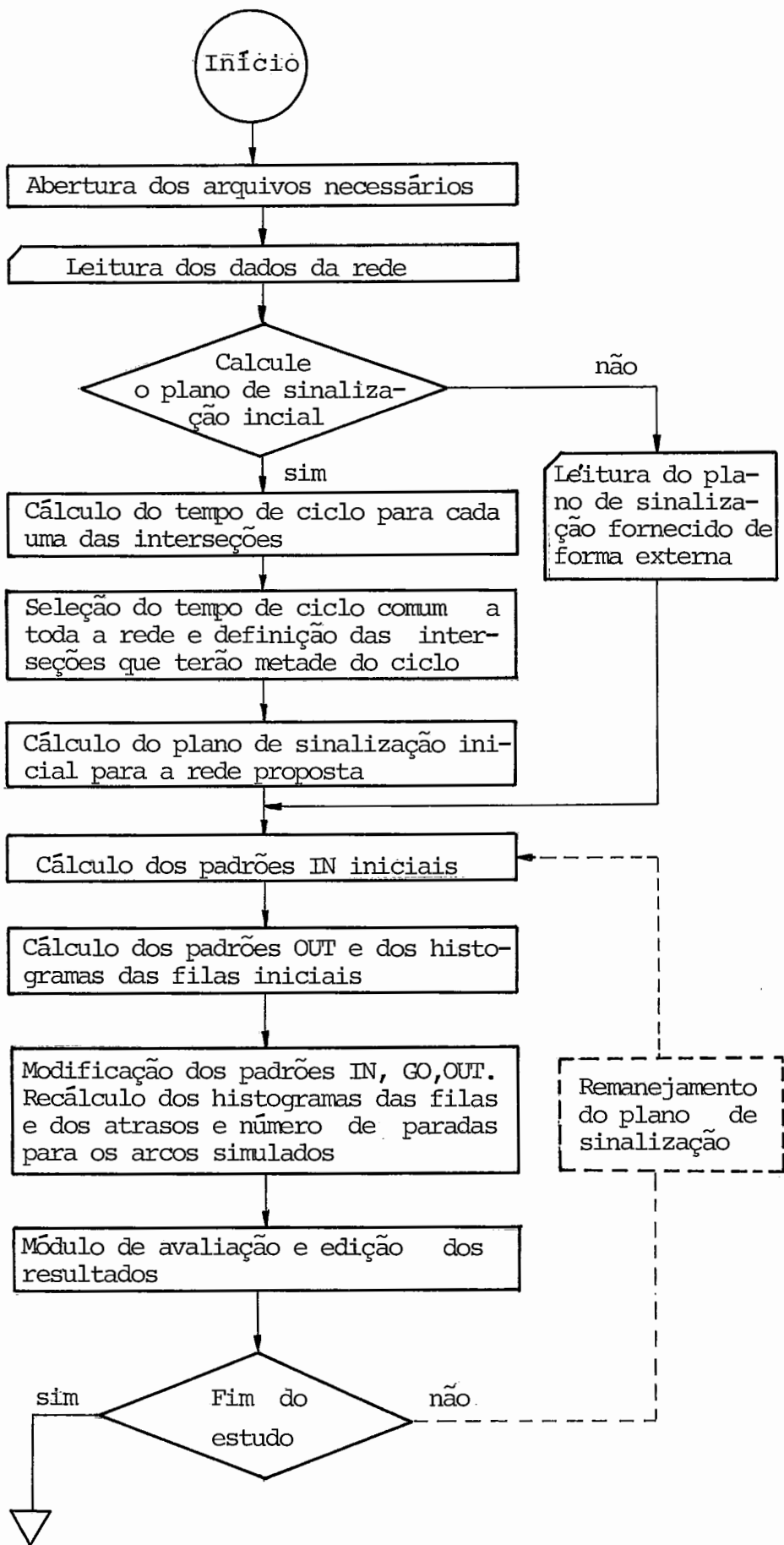


Figura V.9 - Diagrama de Fluxo do Programa Desenvolvido

A seguir apresenta-se um resumo de cada um destes módulos:

Módulo de abertura de arquivos necessários: ele permite abrir diferentes arquivos que servem ao longo do programa para armazenar informações intermédias geradas pelo programa ou fornecidas pelo usuário referentes às interseções (nós), aos arcos (vias), ao plano de sinalização, aos padrões IN, GO, OUT e aos histogramas das filas. Todos estes dados são armazenados em arquivos de acesso direto cujo tamanho padrão de registro é 128 bytes MICROSOFT (29). Este tipo de arquivo é utilizado devido à pequena capacidade da memória central do microcomputador. Esta alocação dinâmica e a leitura dos dados no disco tornam lento o processo de simulação, pois a cada momento que se necessita de uma informação adicional, deve-se procurar no disco correspondente.

Módulo de leitura de dados: os dados relativos à rede são fornecidos e armazenados num arquivo criado de forma independente do programa de simulação. O presente módulo serve para memorizar de forma sistemática as informações relacionadas com a topologia da rede e as informações relativas a cada arco e interseção. No caso de o plano de sinalização inicial ser calculado pelo programa, os dados relativos às fases dos diferentes nós são fornecidos. No caso em que o plano de sinalização tenha sido gerado externamente, ele será armazenado num arquivo apropriado. Além disso, se submete à ordem de tratamento dos diferentes arcos na simulação.

Os princípios dos módulos que servem para calcular o tempo de ciclo para cada interseção, selecionar o tempo de ciclo comum da rede e definir as interseções que terão um tempo de ciclo equivalente à metade do ciclo comum e calcular o tempo de verde, já foram expostos no capítulo anterior.

O módulo que calcula os padrões IN iniciais para toda a rede, gera para cada arco os histogramas que serão arquivados em registros de acesso direto. Levam-se em conta as parcelas dos fluxos dos arcos antecessores que geram o padrão IN,

ou seja seus fluxos médios, seus tempos de verde e as porcentagens de giro de verde. É importante notar que a programação da geração destes padrões é uma tarefa complexa devido aos nós na origem e no fim dos arcos que podem ter diferentes tempos de ciclo (ciclo completo ou metade).

O módulo que calcula os padrões OUT e as filas para todos os arcos da rede, se baseia nos dados gerados pelo módulo anterior. Não se calcula a dispersão dos pelotões nos arcos de entrada da rede já que estes apresentam fluxos constantes e portanto, sua influência no cálculo do índice de desempenho será constante. Neste caso, se considera o padrão GO igual ao padrão IN. A partir dos padrões anteriores e tendo em mente os tempos de verde efetivos nos diferentes nós, calcula-se o padrão OUT para cada um deles.

O módulo de avaliação e edição dos resultados: para efeitos didáticos foi separado no diagrama de fluxo, mas no programa ele está embutido nos módulos que calculam os padrões iniciais IN, OUT os histogramas das filas iniciais e nos módulos que modificam e recalculam os padrões e histogramas indicados. No final de cada simulação serão editados em forma detalhada os atrasos e paradas para cada um dos arcos, como também os índices de desempenho e a partir destes, externamente, se fará um remanejamento do plano e se voltará a simular tudo de novo. O processo será repetido até quando o usuário considere necessário.

A seguir são descritos os vários arquivos de dados utilizados e/ou gerados pelo sistema desenvolvido.



- ARQUIVO 7, disco 1 DAD.DAT. gerando de forma externa contem os dados da rede.

### Dados Gerais da Rede

XF = valor máximo de X para o cálculo do atraso aleatório com a formula de Webster.  
 $\theta$  = ângulo usado no cálculo de atraso aleatório para  $X \geq XF$ .

NI = número de nós da rede (máximo 20)
INDIC= indicador $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se o plano de sinali-} \\ \text{zação vai ser calculado} \\ 0 \text{ se o plano inicial não} \\ \text{vai ser calculado} \end{array} \right.$
NL = número de arcos (máximo 80)
NLS = número de arcos a serem simulados

### Listagem dos Arcos que vão ser Simulados

1º arco	2º arco	3º arco	4º arco	5º arco
6º	7º	8º	..	.
.	NSL = link simulado			

### Informação dos Nós

Nº do 1º nó	Número de arcos que chegam no 1º nó	Número de fases do 1º nó ** (max.4)	Defasagem relativa ao 1º nó (seg)
Nº do 2º nó	Número de arcos que chegam no 2º nó	Número de fases do 2º nó **** (max.4)	Defasagem relativa ao nó 1 (seg)
.	.	.	.
.	.	.	.
Nº do (NI) = nó	Número de arcos que chegam ao (NI) = nó	Número de fases do (NI) = nó *** (max 4)	Defasagem relativa ao nó (NI-1) (seg)

ARQUIVO 7, (continuação).

No caso em que o plano seja fornecido serão necessárias as seguintes informações.

PA = duração de um passo (segundo)

	1	2	3	4	5	6	7	8				
	Tempo perdido no início do verde (passos)											
	Tempo perdido no fim do verde (passos)											
	Tempo de vermelho integral (passos)											
	Tempo de verde efetivo (passos)											
	Instante em que se inicia o verde efetivo											
	Instante em que termina o verde efetivo											
	Instante em que se inicia o vermelho real											
	Instante em que termina o vermelho real											
Rec = 101	1	2	3	4	5	6	7	8	fase 1	}	Tempo para o nó 1	
Rec = 102	2								fase 2			
Rec = 100 + **	**								fase **			
Rec = 201	1								fase 1	}	Tempo para o nó 2	
Rec = 202	2								fase 2			
Rec = 200 + ***	***								fase ***			
	⋮											
Rec = 100 * NI + 1	1								fase 1	}	Tempo para o nó NI	
Rec = 100 * NI + 2	2								fase 2			
Rec = 100 * NI + (****)	****								fase ****			

Número de passos por ciclo para o nó 1
Número de passos por ciclo para o nó 2
⋮
Número de passos por ciclo para o nó NI





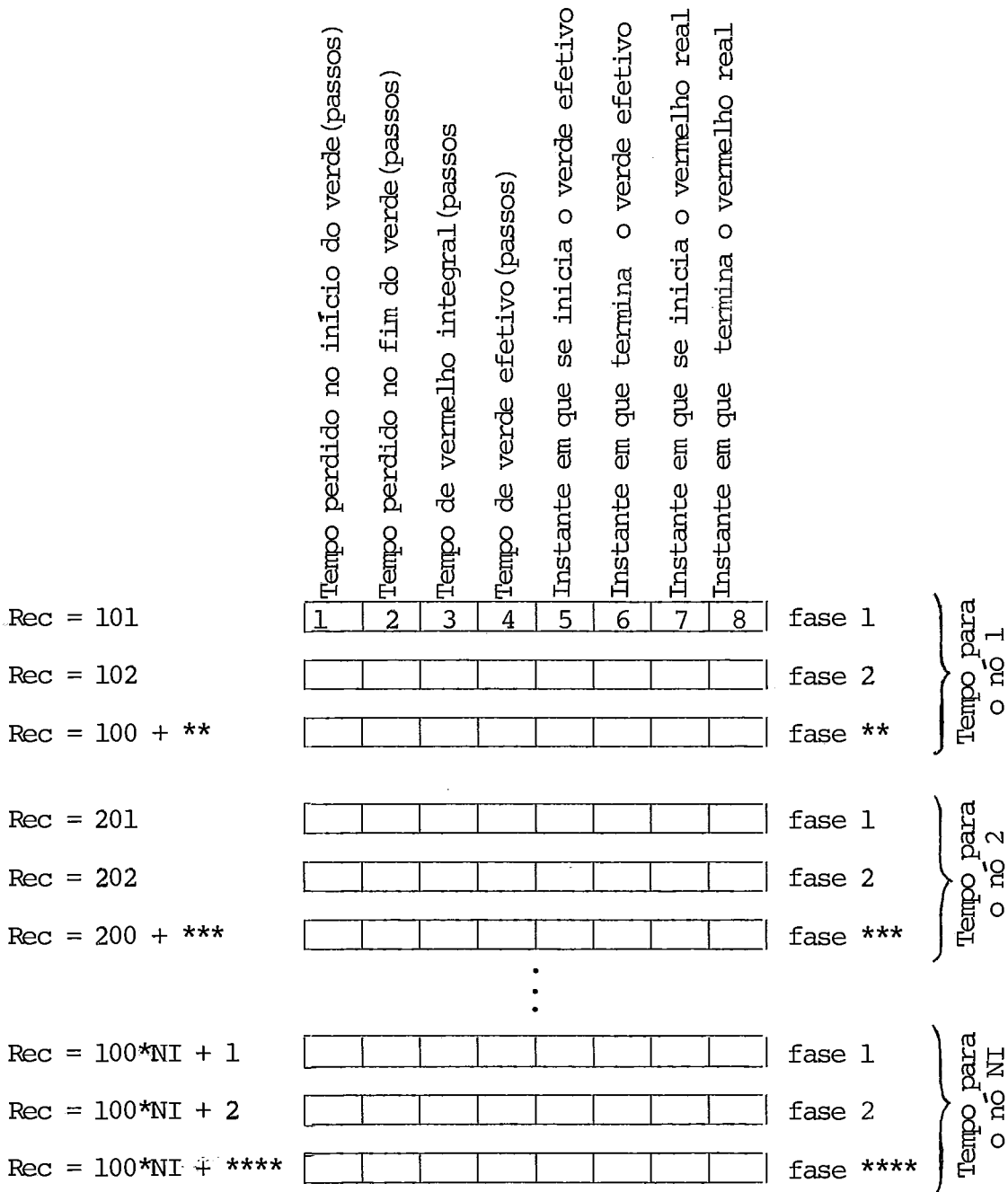
- ARQUIVO 7, (continuação).

Informações de Cada Arco

	Número do arco 1	Nó no qual inicia o arco 1	Fluxo médio (UCP/hora) do arco 1	Número de arcos que alimentam o arco 1	Número do primeiro arco fonte do arco 1	Fase na qual o primeiro arco fonte alimenta o arco 1	Porcentagem do fluxo médio do primeiro arco fonte que entra no arco 1	Número do segundo arco fonte do arco 1	Fase na qual o segundo arco fonte alimenta o arco 1	Porcentagem do fluxo médio do segundo arco fonte que entra no arco 1	Número do terceiro arco fonte do arco 1	Fase na qual o terceiro arco fonte alimenta o arco 1	Porcentagem do fluxo médio do terceiro arco fonte que entra no arco 1	Número da fase na qual o arco participa	Fluxo de saturação do arco 1 (UCP/hora)	Tempo médio de percurso no arco 1 (segundo)
1																
2																
3																
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
NL*																

\* número do arco NL ésimo

- ARQUIVO 8, disco 1, FASES DAT., neste arquivo são armazenadas as informações particulares de cada fase para cada nó. Cada fase corresponde a um "Record" cujo endereço randômico será  $REC = (\text{número do nó a que pertence}) * 100 + (\text{número da fase})$ .
- ARQUIVO 9, disco 1 (PASO.DAT.), neste arquivo são armazenadas em cada record as informações do tempo (passos) associadas com cada fase. O endereço randômico será  $REC = (\text{número do nó}) * 100 + (\text{número da fase})$ .



- ARQUIVO 10, disco 1(HIST.DAT) neste arquivo inicialmente são armazenadas as informações dos padrões IN para cada nó da rede, utilizando para cada padrão dois records:

RECORD 1 = (número do nó) \* 10 + 1(para os primeiros NP/2 elementos do histograma IN);

RECORD 2 = (número do nó) \* 10 + 2(para os NP/2 segundos elementos do histograma IN).

A seguir são calculados os padrões iniciais OUT que serão escritos no lugar dos padrões IN anteriormente preenchidos. Cada padrão OUT referente a um link será armazenado em 2 record com os seguintes endereços:

RECORD 1 = (número do nó) \* 10 + 1 para a primeira metade do vetor;

RECORD 2 = (número do nó) \* 10 + 2 para a segunda metade do vetor.

Paralelamente são calculados os padrões iniciais das filas com endereços aleatórios:

RECORD 1 = (número do nó) \* 10 + 3 para a primeira metade do vetor;

RECORD 2 = (número do nó) \* 10 + 4 para a segunda metade do vetor.

No desenvolvimento da simulação são realocados os valores dos padrões OUT e as filas terão os mesmos endereços de acesso aleatório.

Finalmente, vale indicar que o programa escrito em FORTRAN F-80 da Microsoft, apresenta aproximadamente 1400 linhas e ocupa 32 Kbytes na sua versão compilada.

As performances do modelo desenvolvido são apresentadas através dos estudos de caso considerados no Capítulo seguinte.

CAPÍTULO VI - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

## VI - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

## VI. 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados dois exemplos de aplicação do software desenvolvido.

O arquivo de dados DAD.DAT descrito de forma detalhada no capítulo anterior, sendo gerado com ajuda do editor de textos é arquivado em um disquete independente daquele que contém o Programa Gerador de Planos. Na execução o disquete que contém o arquivo DAD.DAT está alocado no acionador A, enquanto que o disquete que contém o Programa está no acionador B.

## VI. 2 - EXEMPLO I

A seguir apresenta-se uma rede constituída por uma via de duas mãos e de três interseções representada por 14 arcos e 3 nós (ver Figura VI.1).

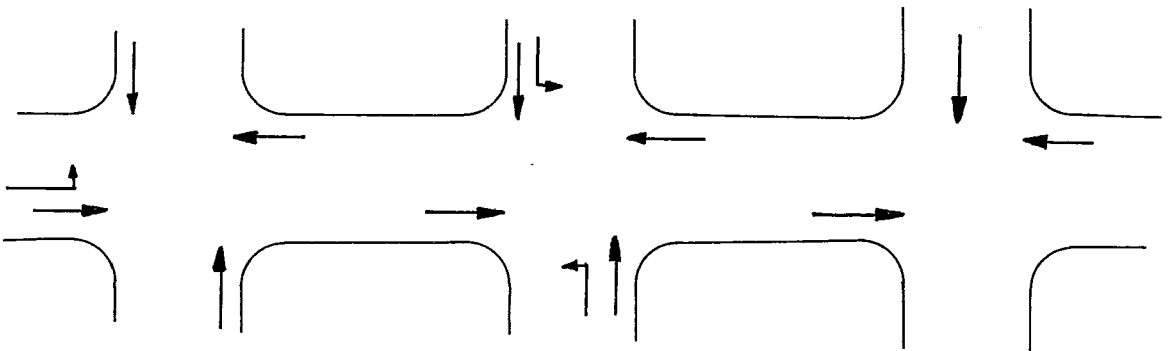


Figura VI. 1 - Rede correspondente ao Exemplo I

Esta rede é representada segundo o diagrama da Figura V.II que contém os seguintes dados: fluxos de saturação, fluxos médios, tempo de percurso médio, comprimento dos arcos e defasagem entre os nós.

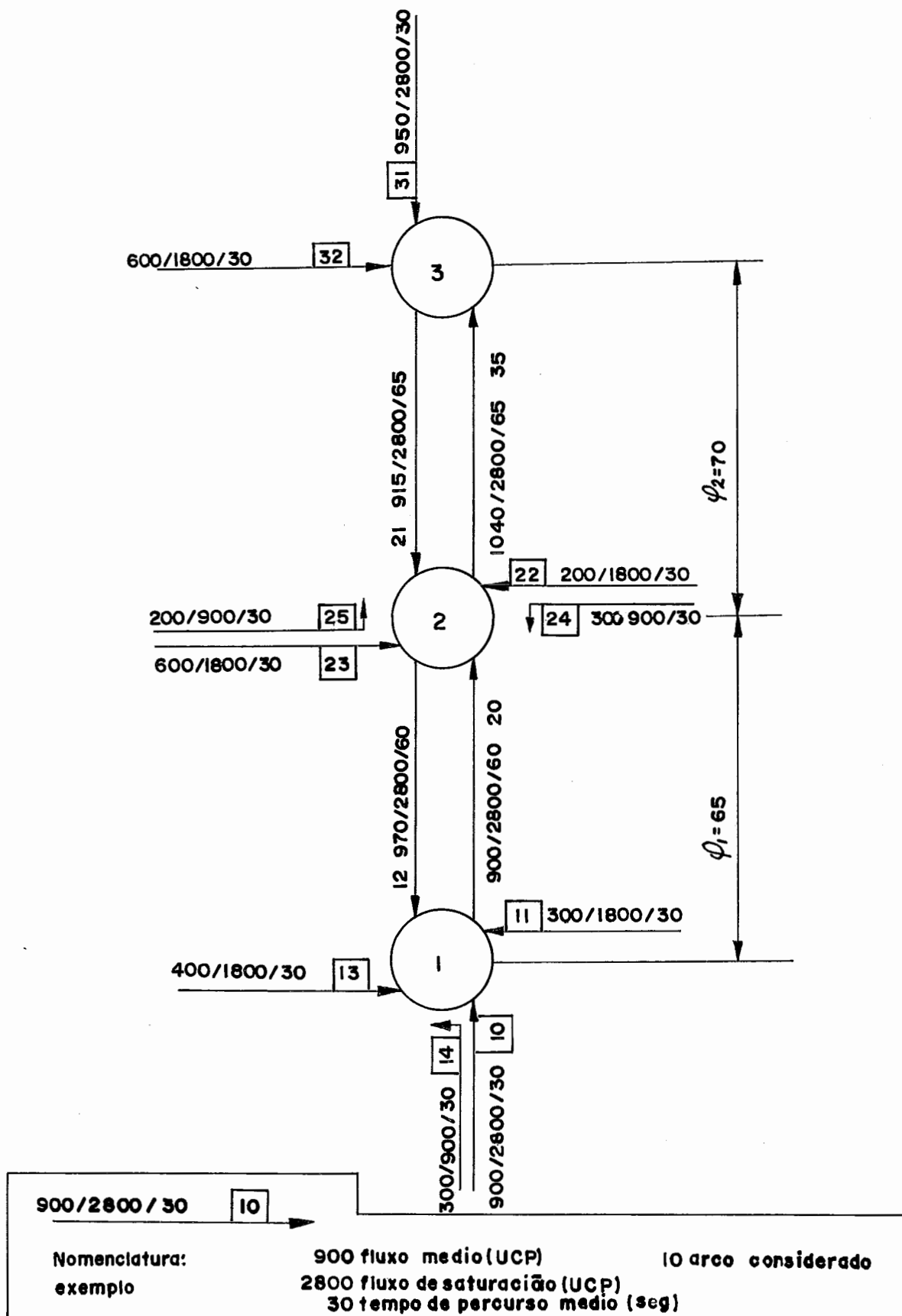


Figura VI. 2 - Diagrama correspondente a Figura VI.1



As diferentes fases para cada nó e as percentagens de giro são apresentadas nas figuras VI.3, VI.4 e VI.5.

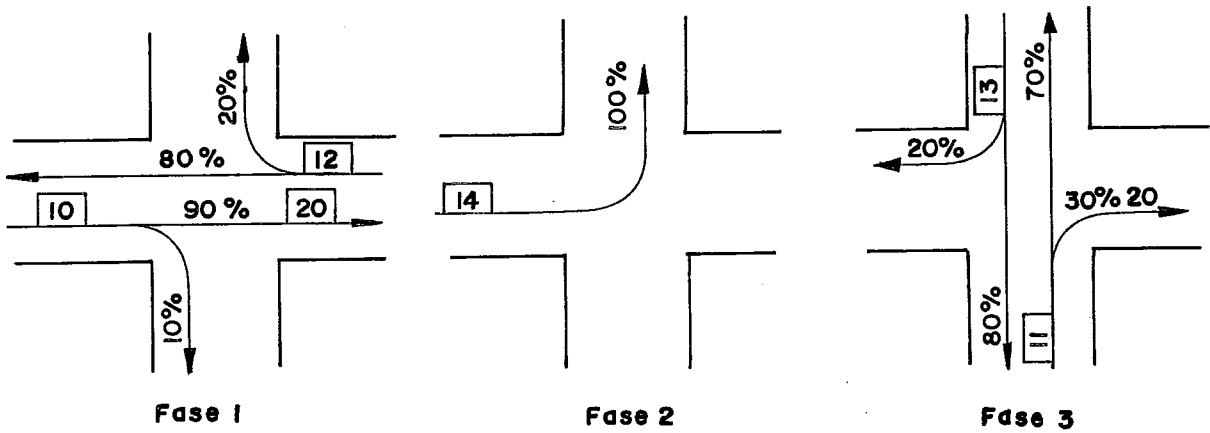


Figura VI.3 Fases e percentagens de giro do nó 1

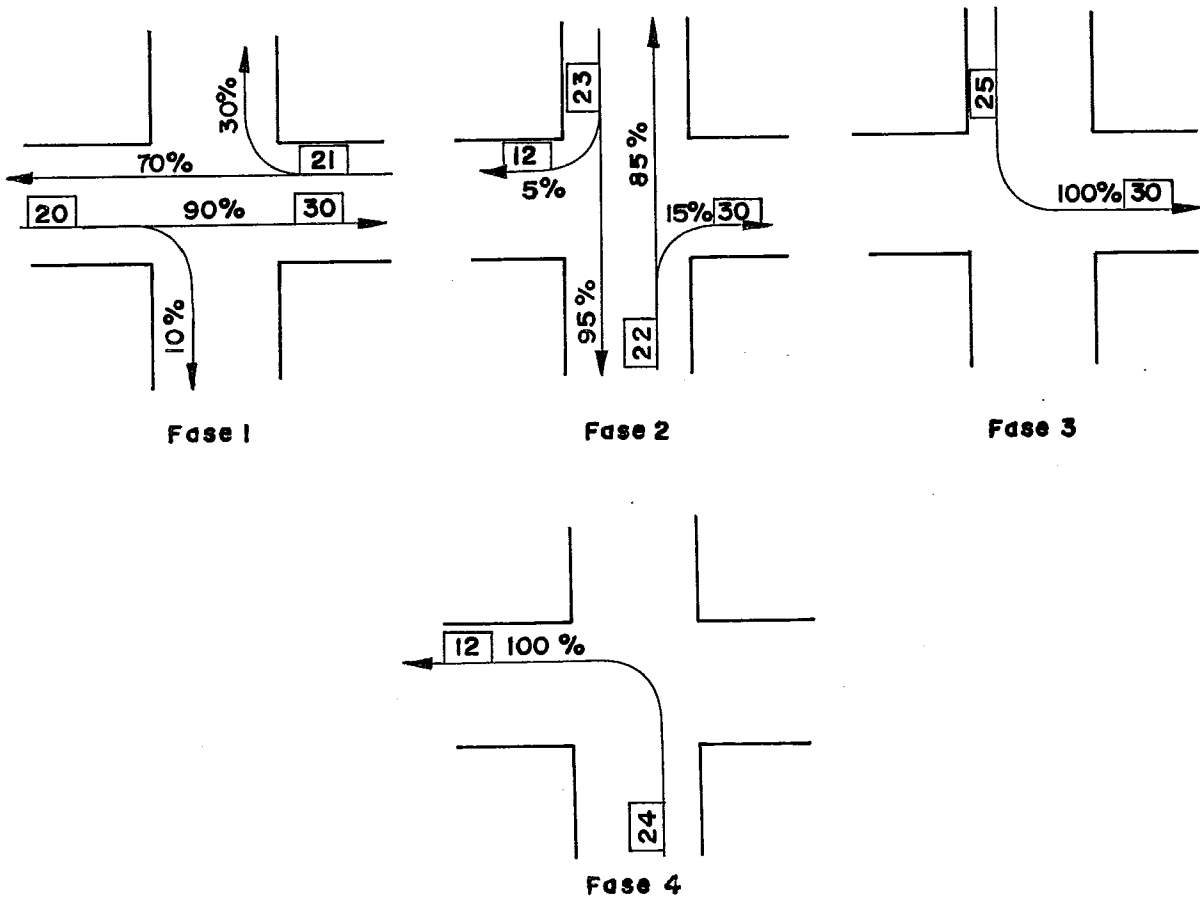


Figura VI.4 - Fases e percentagens de giro do nó 2

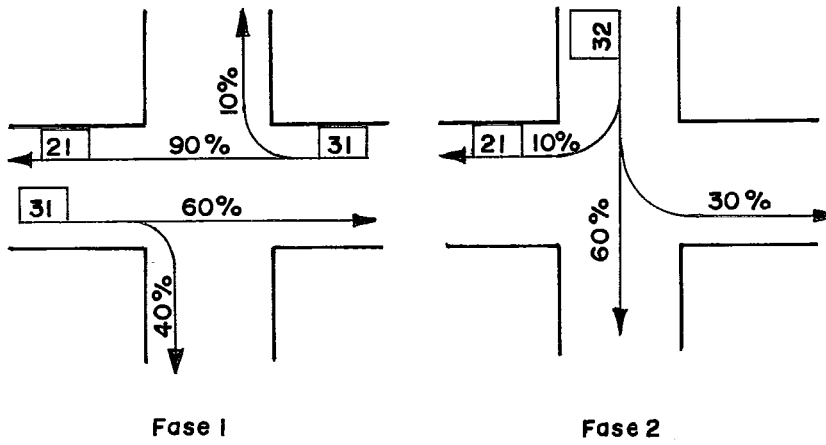


Figura VI. 5 - Fases e percentagens de giro do n<sup>o</sup> 3

Os resultados deste primeiro exemplo constam no arquivo A:RESULTA.DAT. Eles são apresentados a seguir, assim como os dados do problema.

## RESULTADOS DO EXEMPLO I

## DADOS DO PROBLEMA

XF = .95  
 TETHA = 70.  
 NUMERO DE INTERSECOES = 3  
 INDIC = 1  
 NUMERO DE ARCOS = 14  
 NUMERO DE PASSOS POR CICLO = 50  
 NUMERO DE ARCOS A SEREM SIMULADOS = 4

## ARCOS A SEREM SIMULADOS =

20 30 21 12

## DADOS GERAIS DA REDE

1. 5. 3. 0.  
 2. 6. 4. 65.  
 3. 3. 2. 70.

## INFORMACOES DE CADA ARCO

10.	0.	900.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	30.	
11.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	1800.	30.	
12.	2.	970.	3.	21.	1.	70.	23.	2.	5.	24.	4.	100.	1.	2800.	60.
13.	0.	400.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	1800.	30.	
14.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	900.	30.	
20.	1.	900.	2.	10.	1.	90.	11.	3.	30.	0.	0.	0.	1.	2800.	60.
21.	3.	915.	2.	31.	1.	90.	32.	2.	10.	0.	0.	0.	1.	2800.	65.
22.	0.	200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	
23.	0.	600.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	
24.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	4.	900.	30.	
25.	0.	200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	900.	30.	
30.	2.	1040.	3.	20.	1.	90.	22.	2.	15.	25.	3.	100.	1.	2800.	65.
31.	0.	950.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	30.	
32.	0.	600.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	

## INFORMACOES DAS FASES PARA CADA NO

NO = 1																
1.	2.	970.2800.	900.2800.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	12.	10.	0.	0.
2.	1.	300. 900.	0. 0.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	14.	0.	0.	0.
3.	2.	400.1800.	300.1800.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	13.	14.	0.	0.
NO = 2																
1.	2.	900.2800.	915.2800.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	20.	21.	0.	0.
2.	2.	600.1800.	200.1800.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	23.	22.	0.	0.
3.	1.	200. 900.	0. 0.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	25.	0.	0.	0.
4.	1.	300. 900.	0. 0.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	24.	0.	0.	0.
NO = 3																
1.	2.	1040.2800.	950.2800.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	30.	31.	0.	0.
2.	1.	600.1800.	0. 0.	0.	0.	0.	0.	2.	3.	5.	0.	0.	32.	0.	0.	0.

## RESULTADOS

TAXA DE OCUPACAO = 1.2157 DO NO 2

ADMITE-SE PARA O ON 2 O TEMPO DE CICLO MAXIMO = 120 (segundos)  
 O VALOR DO CICLO COMUM CALCULADO = 120.000

## PLANO CALCULADO

NO =	1						
1.	1.	2.	15.	2.	16.	18.	50.
1.	1.	2.	14.	21.	34.	36.	19.
1.	1.	2.	9.	39.	47.	49.	37.
NO =	2						
1.	1.	2.	9.	29.	37.	39.	27.
1.	1.	2.	9.	42.	50.	2.	40.
1.	1.	2.	6.	5.	10.	12.	3.
1.	1.	2.	10.	15.	24.	26.	13.
NO =	3						
1.	1.	2.	22.	8.	29.	31.	6.
1.	1.	2.	20.	34.	3.	5.	32.

## RESULTADOS DA SIMULACAO

O NO SIMULADO = 20

ENTRAM = 28.25

VAO = 28.25

SAIEM = 16.80

NO LINK 20 FICAM RETIDOS 11.4450(UCP)

O NO SIMULADO = 30

ENTRAM = 19.72

VAO = 19.72

SAIEM = 19.72

NO LINK 30 FICAM RETIDOS .0000(UCP)

O NO SIMULADO = 21

ENTRAM = 30.40

VAO = 30.40

SAIEM = 16.80

NO LINK 21 FICAM RETIDOS 13.5950(UCP)

O NO SIMULADO = 12

ENTRAM = 18.32

VAO = 18.32

SAIEM = 18.32

NO LINK 12 FICAM RETIDOS 0.0000(UCP)

## RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA CADA ARCO

	Número do arco (I) (dado)	Nó onde nasce o arco(I) (dado)	Fluxo médio (UCP/hora) do arco(I) (dado)	Número de arcos que antecedem ao arco (I) (dado)	Número do primeiro arco fonte do arco(I) (dado)	Fase na qual o primeiro arco fonte alimenta ao arco(I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do primeiro arco fonte que entra no arco(I) (dado)	Número do segundo arco fonte do arco(I) (dado)	Fase na qual o segundo arco fonte alimenta ao arco(I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do segundo arco fonte que entra no arco (I) (dado)	Número do terceiro arco fonte(I) (dado)	Fase na qual o terceiro arco fonte alimenta ao arco (I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do terceiro arco fonte que entra no arco(I) (dado)	Número da fase na qual o arco(I) participa(dado)	Fluxo de saturação do arco(I) (UCP/hora) (dado)	Tempo médio de percurso no arco(I) (segundos) (dado)	(Tempo médio *0.8/PA) (passos) (calculado)	Fluxo demanda (UCP) por ciclo no arco(I) (calculado)	Tempo de verde efetivo para o arco(I) (passos) (calculado)	Grau de saturação do arco (I) (calculado)	Atraso aleatório do arco(I) (UCP seg/seg) (calculado)	Atraso uniforme do arco(I) (UCP seg/seg) (calculado)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
10.	0.	900.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	30.	10.	30.00	15.	1.0714	4.70	3.15
11.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	1800.	30.	10.	10.00	9.	.9259	2.89	1.43
12.	2.	970.	3.	21.	1.	70.	23.	2.	5.	24.	4.	100.	1.	2800.	60.	20.	18.32	15.	.6543	.31	1.24	
13.	0.	400.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	1800.	30.	10.	13.50	9.	1.2500	4.98	1.94
14.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	900.	30.	10.	10.00	14.	1.1905	4.89	1.11
20.	1.	900.	2.	10.	1.	90.	11.	3.	30.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	60.	20.	28.25	9.	1.6813	5.65	3.39
21.	3.	915.	2.	31.	1.	90.	32.	2.	10.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	65.	22.	30.40	9.	1.8092	5.85	5.70
22.	0.	200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	10.	6.50	9.	.6019	.23	.93
23.	0.	600.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	10.	20.00	9.	1.8519	5.92	2.87
24.	0.	300.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	4.	900.	30.	10.	10.00	10.	1.6667	5.63	1.37
25.	0.	200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	900.	30.	10.	6.50	6.	1.8056	5.84	1.07
30.	2.	1040.	3.	20.	1.	90.	22.	2.	15.	25.	3.	100.	1.	2800.	65.	22.	19.72	22.	.4802	.11	1.01	
31.	0.	950.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	30.	10.	31.50	22.	.7670	.63	2.13
32.	0.	600.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1800.	30.	10.	20.00	20.	.8333	1.04	1.55

ATRASSO ALEATORIO = 48.6638

ATRASSO UNIFORME = 28.8853

NUMERO DE PARADAS = 87.7231

## VI. 3 - EXEMPLO 2

A rede considerada no Exemplo 2 é apresentada na Figura VI.6 e consta de 4 nós e 13 arcos.

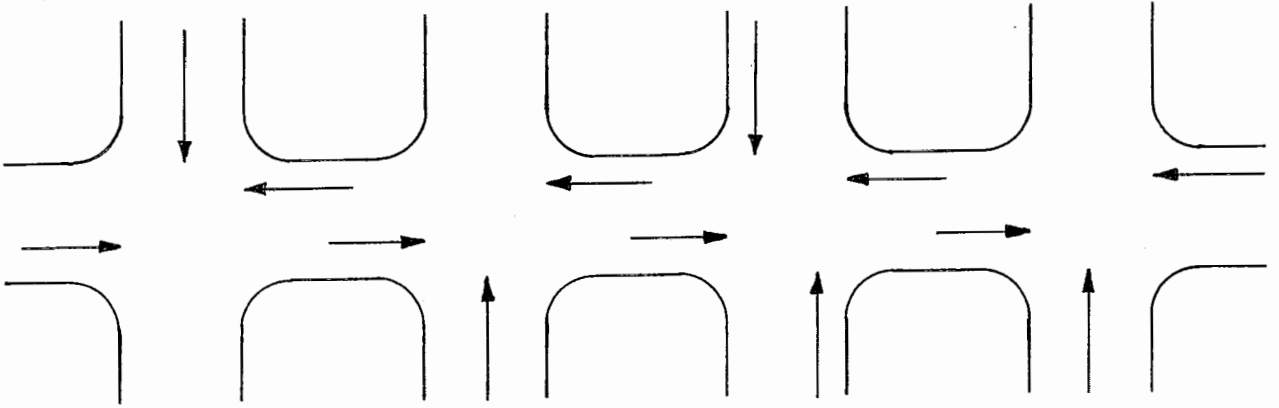


Figura VI.6 - Rede correspondente ao Exemplo 2

Da mesma forma que no capítulo anterior, na Figura VI.7 e representado o diagrama da rede e os dados de fluxo de saturação, fluxos médios, tempos de percurso médios, comprimentos dos arcos e defasagens entre nós.

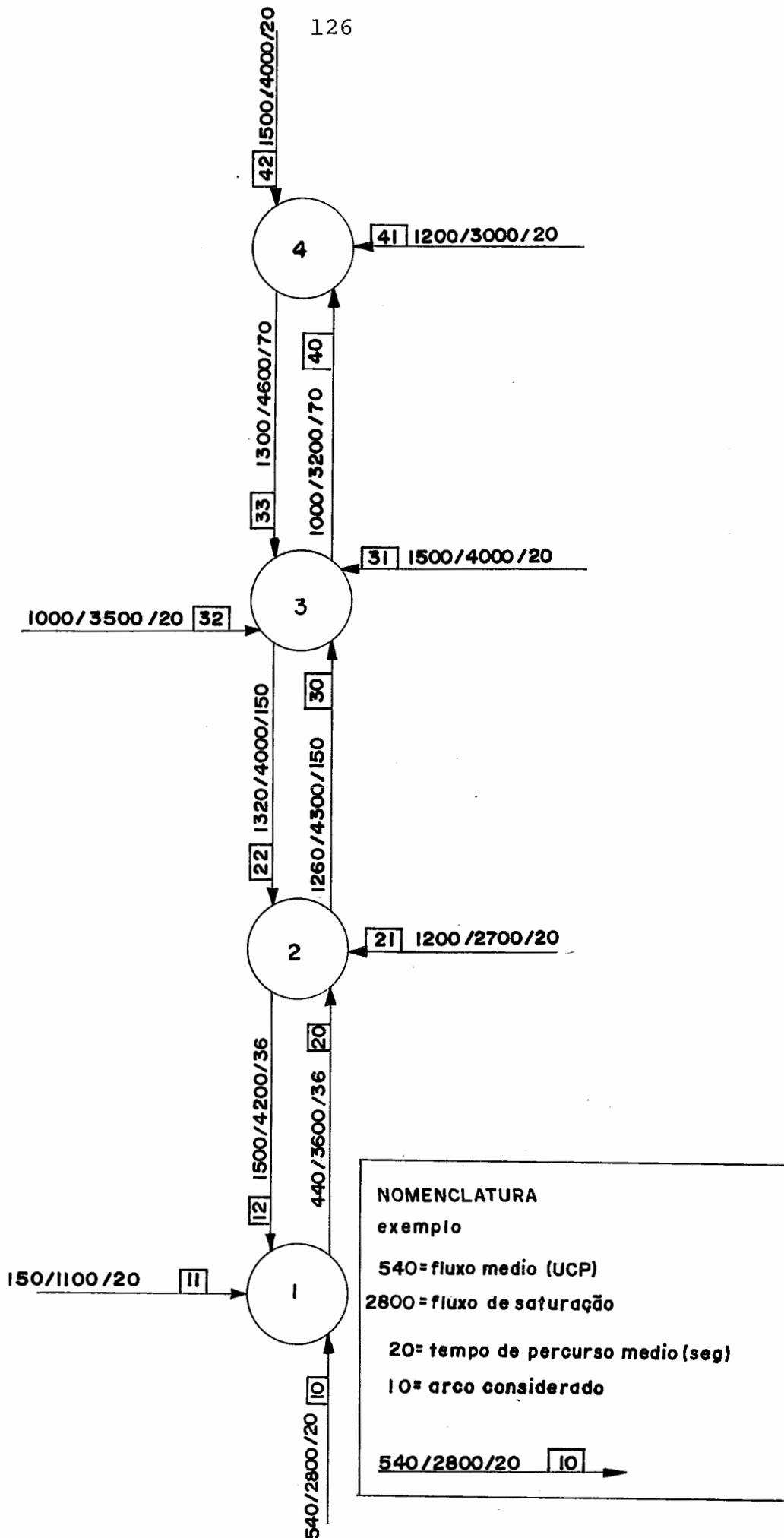


Figura VI.7 - Diagrama correspondente à Figura VI.6

As diferentes fases e percentagens de giro para cada nã são apresentadas nas Figuras VI.8, VI.9, VI.10 e VI.11.

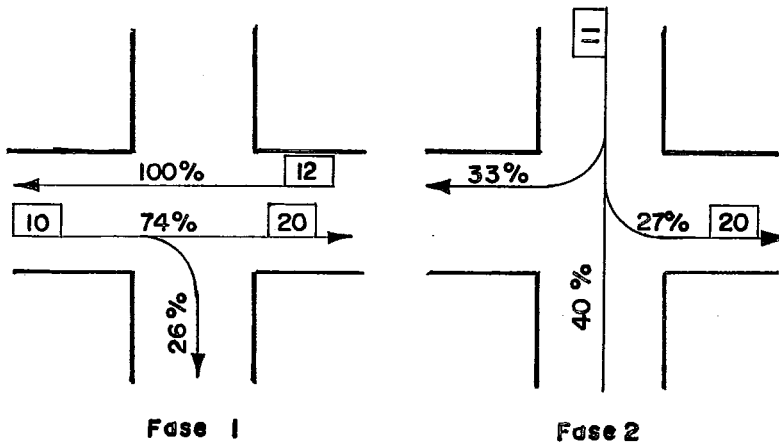


Figura VI.8 - Fases e percentagens de giro do nã 1

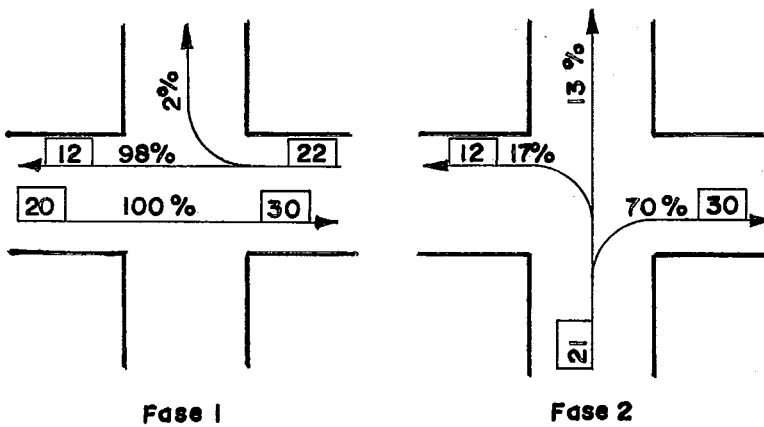


Figura VI.9 - Fases e percentagens de giro do nã 2

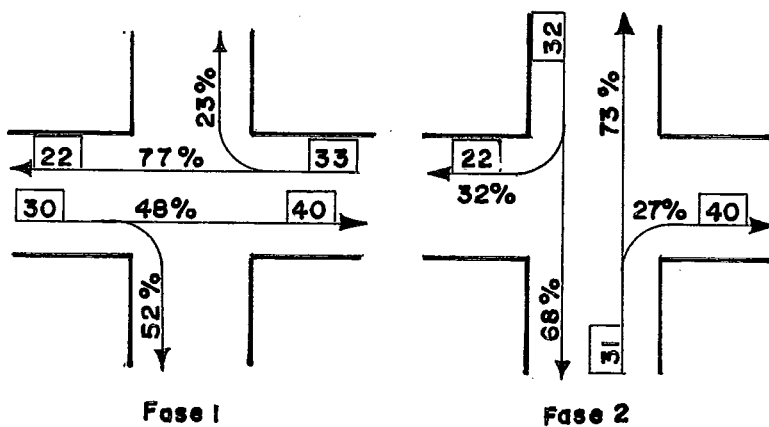


Figura VI.10 - Fases e percentagens de giro do nã 3



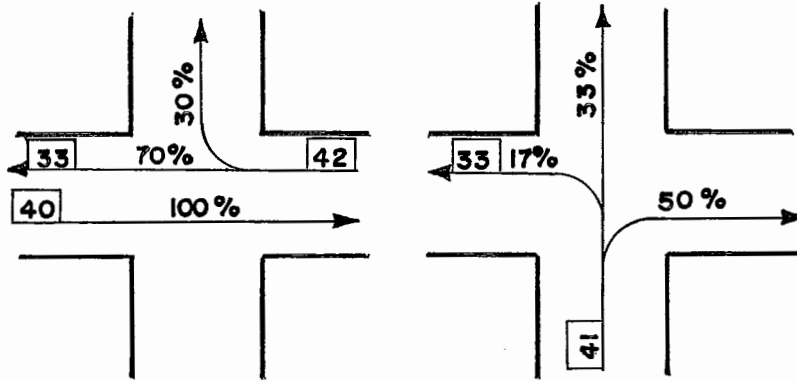


Figura VI.11 - Fases e percentagens de giro do nó 4

Os resultados deste segundo exemplo são extraídos do arquivo A:RESULTA.DAT. Eles são apresentados a seguir, assim como os dados do problema.

RESULTADOS DO EXEMPLO II

## DADOS DO PROBLEMA

XF = .95

TETHA = 70.

NUMERO DE INTERSECOES = 4

INDIC = 1

NUMERO DE ARCOS = 13

NUMERO DE PASSOS POR CICLO = 50

NUMERO DE ARCOS A SEREM SIMULADOS = 6

## ARCOS A SEREM SIMULADOS =

20 30 40 33 22  
12

## DADOS GERAIS DA REDE

1. 3. 2. 0.  
2. 3. 2. 40.  
3. 4. 2. 200.  
4. 3. 2. 80.

## INFORMACOES DE CADA ARCO

10.	0.	540.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	20.
11.	0.	150.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1100.	20.
12.	2.	1500.	2.	22.	1.	98.	21.	2.	17.	0.	0.	0.	1.	4200.	36.
20.	1.	440.	2.	10.	1.	74.	11.	2.	27.	0.	0.	0.	1.	3600.	36.
21.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	2700.	20.
22.	3.	1320.	2.	33.	1.	77.	32.	2.	32.	0.	0.	0.	1.	4000.	150.
30.	2.	1260.	2.	20.	1.	100.	21.	2.	70.	0.	0.	0.	1.	4300.	150.
31.	0.	1500.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	4000.	20.
32.	0.	1000.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	3500.	20.
33.	4.	1300.	2.	42.	1.	70.	41.	2.	17.	0.	0.	0.	1.	4600.	70.
40.	3.	1000.	2.	30.	1.	48.	31.	2.	27.	0.	0.	0.	1.	3200.	70.
41.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	3000.	20.
42.	0.	1500.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	4200.	20.

## INFORMACOES DAS FASES PARA CADA NO

NO = 1																		
1.	2.	540.	2800.	1500.	4200.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	10.	12.	0.	0.
2.	1.	150.	1100.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	11.	0.	0.	0.
NO = 2																		
1.	2.	440.	3600.	1320.	4000.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	20.	22.	0.	0.
2.	1.	1200.	2700.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	21.	0.	0.	0.
NO = 3																		
1.	2.	1260.	4300.	1300.	4600.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	30.	33.	0.	0.
2.	2.	1500.	4000.	1000.	3500.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	31.	32.	0.	0.
NO = 4																		
1.	2.	1000.	3200.	1500.	4200.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	40.	42.	0.	0.
2.	1.	1200.	3000.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	2.	3.	0.	0.	41.	0.	0.	0.

## RESULTADOS.

O VALOR DO CICLO COMUM CALCULADO = 114.729

## PLANO CALCULADO

NO =	1							
	1.	1.	1.	14.	2.	15.	17.	25.
	1.	1.	1.	5.	19.	23.	25.	17.
NO =	2							
	1.	1.	1.	19.	44.	12.	14.	42.
	1.	1.	1.	25.	16.	40.	42.	14.
NO =	3							
	1.	1.	1.	19.	31.	49.	1.	29.
	1.	1.	1.	25.	3.	27.	29.	1.
NO =	4							
	1.	1.	1.	21.	16.	36.	38.	14.
	1.	1.	1.	23.	40.	12.	14.	38.

## RESULTADOS DA SIMULACAO

O NO SIMULADO = 20

ENTRAM = 13.50

VAO = 13.50

SAIEM = 13.50

NO LINK 20 FICAM RETIDOS 0.0000(UCP)

O NO SIMULADO = 30

ENTRAM = 40.07

VAO = 40.07

SAIEM = 39.22

NO LINK 30 FICAM RETIDOS .8501(UCP)

O NO SIMULADO = 40

ENTRAM = 31.78

VAO = 31.78

SAIEM = 31.78

NO LINK 40 FICAM RETIDOS .0000(UCP)

O NO SIMULADO = 33

ENTRAM = 40.09

VAO = 40.09

SAIEM = 40.09

NO LINK 33 FICAM RETIDOS .0000(UCP)

O NO SIMULADO = 22

ENTRAM = 41.08

VAO = 41.08

SAIEM = 40.22

NO LINK 22 FICAM RETIDOS .8572(UCP)

O NO SIMULADO = 12

ENTRAM = 45.88

VAO = 45.88

SAIEM = 37.48

NO LINK 12 FICAM RETIDOS 8.4038(UCP)

## RESULTADOS DA SIMULACAO PARA CADA ARCO

	Número do arco (I) (dado)	Nó onde nasce o arco (I) (dado)	Fluxo médio(UCP/hora) do arco(I) (dado)	Número de arcos que antecedem ao arco(I) (dado)	Número do primeiro arco fonte do arco(I) (dado)	Fase na qual o primeiro arco fonte alimenta ao arco(I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do primeiro arco fonte que entra no arco(I) (dado)	Número do segundo arco fonte do arco(I) (dado)	Fase na qual o segundo arco fonte alimenta ao arco(I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do segundo arco fonte que entra no arco(I) (dado)	Número do terceiro arco fonte(I) (dado)	Fase na qual o terceiro arco fonte alimenta ao arco(I) (dado)	Porcentagem do fluxo médio do terceiro arco fonte que entra no arco(I) (dado)	Número da fase na qual o arco(I) participa(dado)	Fluxo de saturação do arco(I) (UCP/hora) (dado)	Tempo médio de percurso no arco(I) (segundos) (dado) (Tempo médio *0.8/PA) (passos) (calculado)	Fluxo demanda(UCP) por ciclo no arco(I) (calculado)	Tempo de verde efetivo para o arco(I) (passos) (calculado)	Grau de saturação do arco(I) (calculado)	Atraso aleatório do arco(I) (UCP seg/seg) (calculado)	Atraso uniforme do arco(I) (UCP seg/seg) (calculado)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
10.	0.	540.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2800.	20.	7.	17.00	14.	.6804	.36	1.97
11.	0.	150.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	1100.	20.	7.	5.00	5.	1.4263	5.25	.90
12.	2.	1500.	2.	22.	1.	98.	21.	2.	17.	0.	0.	0.	1.	4200.	36.	13.	45.88	14.	1.2242	4.94	7.63
20.	1.	440.	2.	10.	1.	74.	11.	2.	27.	0.	0.	0.	1.	3600.	36.	13.	13.50	19.	.3095	.03	2.04
21.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	2700.	20.	7.	38.00	25.	.8832	1.67	2.15
22.	3.	1320.	2.	33.	1.	77.	32.	2.	32.	0.	0.	0.	1.	4000.	150.	52.	41.08	19.	.8479	1.18	4.12
30.	2.	1260.	2.	20.	1.	100.	21.	2.	70.	0.	0.	0.	1.	4300.	150.	52.	40.07	19.	.7694	.64	3.28
31.	0.	1500.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	4000.	20.	7.	48.00	25.	.7531	.57	2.72
32.	0.	1000.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	3500.	20.	7.	32.00	25.	.5738	.19	1.81
33.	4.	1300.	2.	42.	1.	70.	41.	2.	17.	0.	0.	0.	1.	4600.	70.	24.	40.09	19.	.7196	.46	4.58
40.	3.	1000.	2.	30.	1.	48.	31.	2.	27.	0.	0.	0.	1.	3200.	70.	24.	31.78	21.	.7420	.53	1.66
41.	0.	1200.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	3000.	20.	7.	38.00	23.	.8640	1.37	2.50
42.	0.	1500.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	4200.	20.	7.	48.00	21.	.8538	1.25	3.64

ATRASSO ALEATORIO = 18.4645

ATRASSO UNIFORME = 39.0047

NUMERO DE PARADAS =207.7810

Finalmente na tabela VI.1 são apresentados os tempos de computação necessários para realizar o cálculo do plano e uma simulação completa, sendo que no caso do exemplo I se tratou somente o tempo de execução da simulação.

	Exemplo I Cálculo do plano + 1 Simulação	Exemplo I Só simulação	Exemplo II Cálculo do plano + 1 Simulação
Tempo de Execução	5 min 45 seg	5 min 15 seg	6 min 5 seg

Tabela VI.1

Assim, o tempo de resposta do microsistema para redes de pequeno ou médio porte, embora prolongado é aceitável, mas poderia ser diminuído utilizando um micro-computador com um espaço de memória central maior (256 KB por exemplo), o que evitaria as ordens de leitura e escrita no disco flexível, as quais implicam em perda de tempo na execução do programa.

CAPÍTULO VII - CONCLUSÃO GERAL

## VII - CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho, apresentou-se um sistema de geração de planos de sinalização compatível com a realidade técnico-econômica dos países em via de desenvolvimento. Assim, o objetivo principal da pesquisa foi plenamente atingido. Por um lado, obteve-se uma ferramenta simples e prática apoiada no uso de microcomputadores de características comuns, e por outro propôs-se uma nova abordagem do problema de otimização de planos de sinalização. Os exemplos apresentados no penúltimo capítulo da tese demonstram claramente a eficiência do sistema apresentado. Várias melhorias podem ser propostas para o sistema no seu estágio atual de desenvolvimento, principalmente no que diz respeito aos seguintes pontos:

- melhor representação dos fenômenos de formação e dissipação de filas (como na versão 7 de TRANSYT, por exemplo) de forma a avaliar mais precisamente os atrasos gerados pela sinalização,
- utilização de um software de base de dados, tal como o Dbase II da Microsoft, na fase de descrição dos dados da rede de tráfego a controlar, de forma a facilitar esta última;
- melhor representação gráfica das saídas de simulação (utilização de um terminal gráfico colorido, por exemplo).

Portanto, outros estudos ligados à própria utilização do sistema deverão ser realizados. Podem ser citados exemplos de vários pontos, que apesar do Programa TRANSYT (em várias de suas versões) ter sido utilizado no Brasil por mais de uma década, não tem sido devidamente aprofundados. Pensa-se principalmente em estudos de calibração tanto do modelo de dispersão de pelotões, como nos vários modelos de atraso utilizados.

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

1. AKCELIK, R., "Fuel Efficiency and Other Objectives in Traffic System Management", England, Traffic Engineering and Controle, Fev.1981, pp. 54-65.
2. BAVER, C.S., "Some Energy Considerations in Traffic Signal Time", England, Traffic Engineering 45(2), 1975, pp. 19-25.
3. BRANSTON, D., "Models of Single Lane Headway Distributions", United States, Transp. Sci., V.10,Nº 2, pp.125-148,1976.
4. BUCKLEY,D.J., "Road Traffic Headway Distributions", Proc. Austr., Road Research Board,1962, pp.153-187.
5. CLAFFEY,P.J., "Passenger Car Fuel Conservation", Report FHWA-PL 77009, United States, Federal Highway Administration, 1976.
6. COIMBRA,J., "Contribuição ao Estudo Teórico de Modelos de Alocação de Viagens", Rio de Janeiro, D.Sc. Tese-Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ, 1982.
7. COPPE/UFRJ, "Estudo de Coordenação de Sinalização por Área em Fortaleza:2a. Etapa", Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Agosto de 1981.
8. CORPORATION OF METROPOLITAN TORONTO, Improved Operation of Urban Transportation Systems , Toronto-Canada, Vol. 1, March 1974, Vol.2, Nov.1975, Vol. 3, Nov.1976.
9. COURRAGE,K. G. e PARAPAR, S.M., "Delay and Fuel Consumption at Traffic Signals", England, Traffic Engineering,45(11), 1975, pp.23-27.
10. CURY, P., "Projeto SEMCO - Sistema de Controle de Tráfego em Área de São Paulo". São Paulo, Companhia de Engenharia de Tráfego, Boletim Técnico da CTE Nº 7, 1977.



11. CHAVEZ, F. e MORA-CAMINO, F., "MICROPLAN: A Computer Based Traffic Control Plan Generator", United States, The Society for Computer Simulation SCS Multicoference, 1984.
12. DART, O.K. e MANN, L., "Potential Energy Conservation in Louisiana's Cities Through Traffic Engineering Measures", United States, Compendium of Technical Papers-ITE 48th Annual Meeting, 1978, pp.300-309.
13. EDIE, L.C., "Flow Theories", United States, Traffic Science, Wiley, 1974, pp.1-108.
14. FURTADO, J.B. et alli, "TRANSYT Manual de Utilização", Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, 1982.
15. GARTNER, N.H., "Urban Traffic Control Stratategies: the Generation GAP" , United States, ATTEC Congress Regulation du Trafic Paris, 1980.
16. GARTNER, N.H., LITTLE, J., GABBAY, H., "MITROP: a Computer Program for Simultaneous Optimisation of Offset, Splits and Cycle Time", Traffic Engineering & Control, August/Septem. 1976.
17. GARTNER, N. et alii, "Optimization of Traffic Signal Settings in Network by Mixed - Integer Linear Programming", United States, Operational Research Massachusetts Institute of Technology- Technical Report N° 91, 1978
18. GARTNER, N. , "Constraining Relations Among Offsets in Synchronized Sygnal Networks, United States, Transportation Science, pp.88-93, 1972.
19. GAZIS, D.C., Traffic Control Theory and Application, United States, John Wiley & Sons, 1974.

20. GIPPS, P., "Computer Program MULTISIM for Simulation Output from Vehicle Detectors on a Multi-Lane Signal Controlled Road", Newcastle, University of Newcastle Upon Tyne Department of Civil Engineering Division, Transport Operation Research Grup, Research Report Nº 20, 1976.
21. HENRY, J.J. e PAQUIN, R., "REPPORT FINAL Étude su la Regulation du Trafic Urbain en Saturation TOME 1-ETUDE", França, Department d'Études et de Recherches en Automatique, December 1971.
22. HILLER, J.A. e ROTHERY R., "The Synchronization of Traffic Signal for Minimum Delay", United States, Transportation Research, Vol.1, pp.81-94, 1967.
23. HILLER, J.A., "Glasgow's Experiment in Area Traffic Control", England, Traffic Engineering & Control, Vol.17, Nº 8, 1965.
24. HOGAN, T., Osborne CP/M User Guide, United States, Osborne Mc Graw Hill, 1982.
25. HOLROYD, J. e HILLER J.A., "The Glasgow Experiment: PLIDENT and After", England, RRL Report LR 384, 1971.
26. JUNQUEIRA, B., "O Controle de Tráfego em Área: os Planos de Sinalização", Rio de Janeiro, M.Sc. Tese-Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ, 1981
27. KENZO, J., "Controle de Tráfego Urbano: Avaliação e Desenvolvimento de Sistemas Atuados", Rio de Janeiro, M.Sc.-Tese-Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ, 1983.
28. MELO, A., KENZO, J. e MORA-CAMINO, F., "Validação de um Modelo de Simulação de Tráfego Urbano", São Paulo, II CONDET, 1981.

29. MICROSOFT, Microsoft Fortran 80 Documentation, United States, Microsoft 198.
30. MICROPRO, "Word Start Training Guide", United States, Micropro International Corporation, 1981.
31. MILANI, E.B. e de ALBUQUERQUE, R., "Fundamentos Teóricos do Método COSE II-A Projeto Nº 1", Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1976.
32. MORALES, E.A., "Sistema de Controle de Tráfego, Aplicação do Programa TRANSYT", São Paulo, Companhia de Engenharia de Tráfego-Boletim Técnico Nº 10, 1978.
33. PEAT, MARWICK, LIVINGSTON e COMPANY, "SIGOP: Traffic Signal Optimization Program-User's Manual", United States, Bureau of Public Roads, Clearinhouse Nº PB 182-835, 1968.
34. PEAT, MARWICK, LIVINGSTON e COMPANY, "SIGOP: Traffic Signal Optimization Program, Field Test and Sensitivity Studies", United States, Bureau of Public Roads, Clearinghouse Nº PB 182-836, 1968.
35. PEREIRA, A.L. e MORA-CAMINO, F., "Modelisation des Flux de Traffic Urbain: Definition d'une Approche Operationale", Paris, Applied Modelling and Simulation Conference, AMSE, 1982.
36. ROBERTSON, D.I., "TRANSYT: A Traffic Network Study Tool", England, Ministry of Transport RRL Report 253, 1969.
37. ROBERTSON, D.I. et alii, "Coordinating Traffic Signals to Reduce Fuel Consumption", Crowthorne, Transportation and Road Research Laboratory Report Nº 934, 1980
38. ROBERTSON, D.I., "TRANSYT: Method for Area Traffic Control", England, Traffic Engineering & Control, October 1969, pp.276-281.

39. ROBERTSON, D. I. e GOWER, P., "User Guide to TRANSYT Versi-  
on 6", England, SR 255, Transportation and Road  
Research Laboratory TRRL, 1977.
40. RODRIGUES, J. e NOVAES, A., "Um Modelo para Avaliação Compa-  
rativa do Consumo Energético Urbano de Ônibus e Automô-  
veis", Rio de Janeiro, Seminário sobre Sistemas Urbanos  
e Regionais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de  
São Paulo S.A., 1983.
41. SALTER, J., "Highway Traffic Analysis and Design", England,  
The Macmillan Press Ltd., 1978, pp. 269-371.
42. SHUHL, A., Probability Theory Applied to Vehicle Distribu-  
tions on Two-Lane Highways, United States, Eno Founda-  
tion, 1955, pp.59-75.
43. SEDDON, P.A., "Another Look at the Platoon Dispersion",  
England, 1. The Kinematic Wave Theory, Traffic Eng. &  
Control, Dec.1971, pp.332-336.
44. SEDDON, P.A., "Another Look at the Platoon Dispersion",  
England, 2. The Difusion Theory, Traffic Eng. & Control,  
Jan.1972, pp.388-390.
45. SEDDON, P.A., "Another Look at the Platoon Dispersion",  
England, 3. The Recurrent Relationship, Traffic Eng. &  
Control, Feb.1972, pp. 442-444.
46. SPERRY SYSTEMS MANAGMENT DIVISION, "Urban Traffic Control  
and Bus Priority System Vol.1, United States Sperry  
Rand Corp for Federal Highway Administration, Office  
Research Development under Contact FH 7605, 1972.
47. TOLLE, J.E., "The Lognormal Headway Distribution Model",  
England, Traffic Eng. & Control, 13(1), 1971, pp. 22-24.

48. TRAFFIC CONTROL SYSTEMS HANDBOOK, United States, Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Development Implementation Division, 1976, pp.47-120.
49. TRAFFIC RESEARCH CORPORATION, "SIGOP: Traffic Signal Optimization Program", United States, Bureau of Public Roads, Clearinghouse PB 173-738.
50. WEBSTER, F.V., "Traffic Signal Setting", Road Research Technical Paper n° 39, England, H.M. Stationary Office, 1958.
51. WEBSTER, F.V. e COBBE, B.M., "Traffic Signals", England, Ministry of Transport, Road Research Technical Paper M 56, 1966.