

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

Departamento de Automação

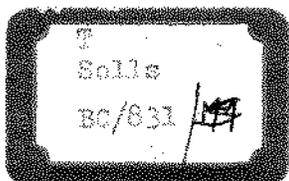
UM SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO

por

Secundino Soares Filho

Tese apresentada à  
Faculdade de Engenharia de  
Campinas da Universidade  
Estadual de Campinas, como  
requisito parcial para a  
obtenção do título de Mes-  
tre em Ciências.

Setembro/1974



UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

## ÍNDICE

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO.....
I.1	- A que se prestam os modelos de simulação de tráfego.....
I.1.1	- Como meios de teste (SIMULADORES).....
I.1.2	- Como meios de otimização (OTIMIZADORES).
I.2	- Os diferentes modelos de simulação de re des.....
I.2.1	- Modelos macroscópicos por fluxos.....
I.2.2	- Modelos com veículos individualizados...
I.2.3	- Modelos baseados numa lei de perseguição entre veículos.....
I.3	- Escolha do tipo de simulação.....
CAPÍTULO II	- O MODELO.....
II.1	- Representação dos veículos.....
II.2	- Representação da rede.....
II.2.1	- Segmentos.....
II.2.2	- Faixas.....
II.2.3	- Cruzamentos.....
II.3	- Simulação do tráfego num segmento.....
II.3.1	- Entradas no segmento.....

## S U M Á R I O

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego urbano baseado no deslocamento de veículos individualizados. Sua finalidade é reproduzir com a máxima fidelidade as condições do tráfego real para que possa vir a ser utilizado como uma maneira rápida e econômica de avaliar os efeitos de diferentes políticas de tráfego.

II.3.1.1	- Escolha da direção.....
II.3.1.2	- Escolha da faixa.....
II.3.1.3	- Hora desejada de chegar ao fim.....
II.3.1.4	- Colocação na "pilha".....
II.3.2	- Saída do segmento.....
II.3.2.1	- Conflitos.....
II.3.2.2	- Intervalo de tempo aceite.....
II.3.2.3	- Intervalo de escoamento.....
II.3.2.4	- Simulação de cruzamentos especiais.....
II.3.2.5	- Simulação de segmentos especiais.....
II.4	- Entradas da rede.....
II.4.1	- Geração.....
II.4.2	- Coeficiente sobre a velocidade.....
II.5	- Saídas da rede.....
II.6	- Funcionamento dos sinais.....
II.7	- Cálculo do critério.....
II.7.1	- Atraso de fila.....
II.7.2	- Atraso de parada.....

CAPITULO III- O PROGRAMA.....

III.1	- Diagrama de Blocos Geral.....
III.2	- Diagramas de Blocos das Subrotinas.....
III.2.1	- Subrotina ENTI.....
III.2.2	- Subrotina TRANS.....

III.2.3	- Subrotina FASE.....
III.2.4	- Subrotina EMPI.....

CAPITULO IV- COMPARAÇÕES E COMENTÁRIOS.....

IV.1	- Introdução.....
IV.2	- Comparação com Webster.....
IV.2.1	- Fluxo Uniforme.....
IV.2.2	- Fluxo aleatório.....
IV.3	- Comparação com COSE I e COSE II.....

ADENDO.....

BIBLICGRAFIA.....

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

## I.1 - A que se prestam os modelos de simulação de tráfego

As simulações quando utilizadas em tráfego urbano encontram 2 aplicações principais.

### I.1.1 - Como meios de teste (SIMULADORES)

Para testar e validar métodos de regulação do tráfego urbano faz-se necessário sua aplicação na prática. Este tipo de procedimento envolve grandes recursos materiais e altos custos. As experiências de campo são comprovações eficientes e é o modo mais realístico de testar comandos de controle do tráfego. Os centros que possuem tal equipamento utilizam esse tipo de solução, por exemplo o Road Research Laboratory (RRL) da Inglaterra.

Um procedimento alternativo é usar simuladores que através da reprodução da realidade conseguem analisar algoritmos de regulação do tráfego.

Em particular os simuladores são usados para:

- a) Estudar fenômenos de tráfego (ação de perturbações, comportamento de cruzamentos).
- b) Testar a eficácia e estabilidade de novos algoritmos.
- c) Testar a viabilidade de modificações na regulação do tráfego (planos de circulação novos, coordenação de semáforos)

- d) Comparar métodos de otimização que utilizem diferentes critérios de performance.

Estas simulações devem retratar os fenômenos reais com a maior precisão possível.

### I.1.2 - Como meios de otimização (OTIMIZADORES)

Há diferenças marcantes entre modelos de simulação propriamente ditos e modelos de otimização (4). Em geral, uma vez que os otimizadores se propõem a encontrar políticas ótimas de funcionamento das redes, a preocupação básica desses programas se expressa na rapidez de simulação. Portanto, existe uma solução de compromisso a se encontrar para os otimizadores entre uma simulação mais elaborada porém lenta e um modelo mais grosseiro porém rápido.

## I.2 - Os diferentes modelos de simulação de redes

### I.2.1 - Modelos macroscópicos por fluxos

Nos modelos macroscópicos por fluxos os veículos não são individualizados. Eles geralmente trabalham com fluxos de veículos agrupados em pelotões que se comportam segundo leis de terminadas. Os modelos COSE I (2) e COSE II (3) usam esse tipo de simulação macroscópica.

Em geral esses modelos por realizarem uma simulação um pouco grosseira, se prestam mais para ser utilizados em otimizadores, que necessitam uma relação tempo de máquina/tempo real muito pequena.

### I.2.2 - Modelos com veículos individualizados.

Nestes modelos os veículos são individualizados com certas características próprias. As velocidades, assim como as entradas na rede e as conversões nos cruzamentos obedecem a distribuições probabilísticas.

Os modelos individualizados ainda podem ser do tipo sequencial, onde a simulação é revista a um intervalo de tempo - constante (  $\Delta t$  ) ou eventual, onde a revisão é feita após cada evento.

Esses modelos, mais sofisticados, não se prestam porém para otimização pois apresentam uma relação tempo de máquina/tempo real muito elevada impingindo custos proibitivos para tal utilização.

### I.2.3 - Modelos baseados numa lei de perseguição entre veículos

Nesses modelos o deslocamento dos veículos é função do carro da frente de acordo com uma certa lei de perseguição. É possível individualizar os veículos ao ponto de atribuir-lhes

CAPÍTULO II - O MODELO

---

parâmetros como aceleração, velocidade e tempo de reação, o que permite realizar uma simulação mais fina. Porém, a lentidão desses modelos é bastante superior aos demais além de exigirem computadores de grande capacidade.

### I.3 - Escolha do tipo de simulação

A escolha da simulação deve ser feita em função do objetivo a que ela se destina, pois a construção de simuladores diferencia-se profundamente quando se trata de estudos (análises) de redes complexas ou de otimizações.

A nossa proposta é desenvolver um simulador de tráfego urbano que sirva para simular fenômenos com precisão, efetuar comparações entre diferentes configurações de faróis, testar algoritmos otimizadores e avaliar políticas de regulação do tráfego.

Dentro desta perspectiva o simulador deve apresentar algumas características:

- a) ser aplicável ao estudo de redes fechadas (com malhas de estrutura geométrica qualquer)
- b) permitir a simulação de regimes não saturados ou saturados (sem restrição quanto ao grau de saturação)
- c) aproximar-se bastante da realidade para que sejam obtidos critérios de performance (índice de desempenho) que avaliem significativamente as propostas de regulação apresentadas.

- d) ser relativamente rápido, ou seja, possuir uma relação tempo de máquina/tempo real menor que 1 que possibilite uma futura implementação em sistemas a tempo real.
- e) ser operacional no que tange à introdução de novos dados.

Tendo em vista os requisitos básicos requeridos pelo simulador, a escolha recaiu num modelo que:

- 1 - trabalhasse com individualização de veículos
- 2 - tratasse o máximo possível, variáveis de simulação com leis de distribuição probabilísticas que se aproximassem da realidade.
- 3 - fosse do tipo sequencial, com revisões da simulação a cada segundo.

## II.1 - Representação dos veículos

Cada veículo é individualizado. No momento em que entra na rede recebe um número NV que o representará durante toda a sua permanência.

O veículo possuirá também um coeficiente sobre a velocidade ( $CVEL(NV)$ ) que representará tanto as características físicas do carro como torque, potência, tamanho, etc., como também as características do motorista: atenção, reflexos, experiência, etc. Esse coeficiente dirá então da rapidez ou lentidão do veículo, considerado como a unidade carro-motorista. Esse coeficiente será calculado no momento da entrada do veículo na rede e permanecerá com ele até a sua saída.

Segundo experiências feitas pelo RRL (Road Research Laboratory) a distribuição das velocidades dos veículos numa rua apresenta uma distribuição quase normal onde as velocidades máxima e mínima devem ser finitas. Essa aproximação da normal pode ser feita por um triângulo, o que corresponderá a uma função distribuição parabólica (fig 1).

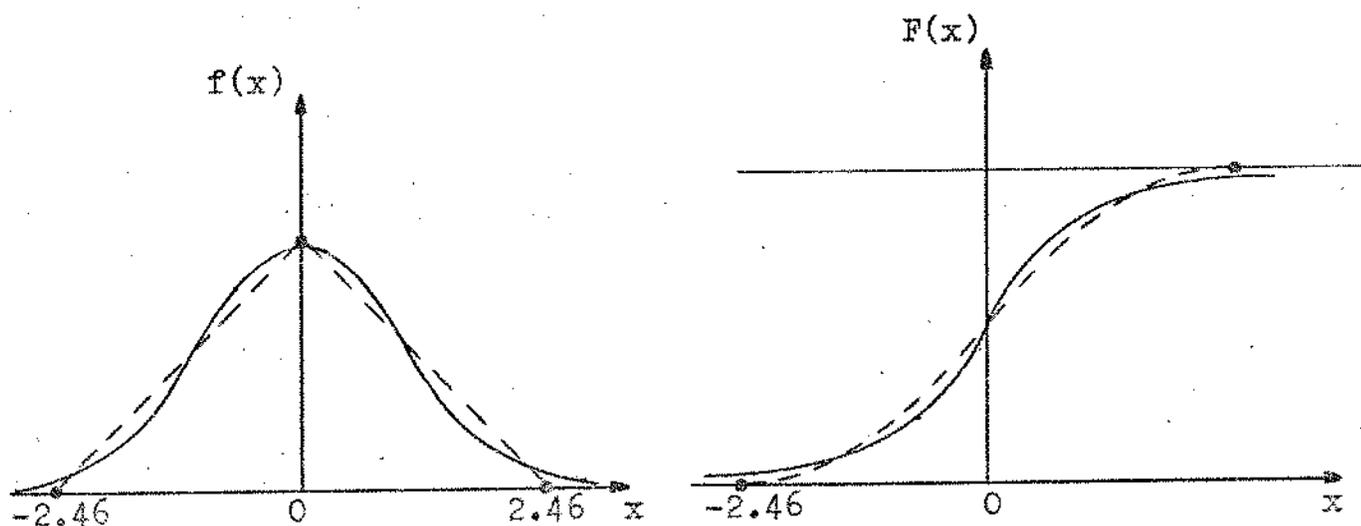


fig. 1

Assim, os veículos podem apresentar um CVEL(NV) no intervalo  $(-2.46, 2.46)$  com valor médio zero (cálculos detalhados ver II.4.2). A distribuição apresentada é uma normal reduzida  $N(0,1)$  sendo necessário, para se conhecer a velocidade do veículo, além do CVEL a velocidade média VELS(NS) e o desvio padrão sobre a velocidade DPVS(NS) no segmento NS (II.3.1.3)

Outras características do veículo, determinadas durante o seu percurso, são a hora desejada de chegada ao fim do segmento em que se encontra (HDJC(NV)), a direção do veículo

ao fim do segmento (IDIR(NV)) e a sua posição relativa aos demais veículos do segmento dado pelo número do veículo à sua retaguarda (NVAT(NV)). Todos esses valores, calculados no instante em que o veículo entra num dado segmento, servem para definir sua posição e seu próximo movimento.

## II.2 - Representação da rede

A rede é representada por segmentos (ramos) que indicam direções de movimentos entre cruzamentos (nós). É feita a hipótese de que não há interação entre os segmentos de uma mesma rua. Os segmentos dividem-se ainda em faixas de acordo com a largura e o tipo de movimentos possíveis.

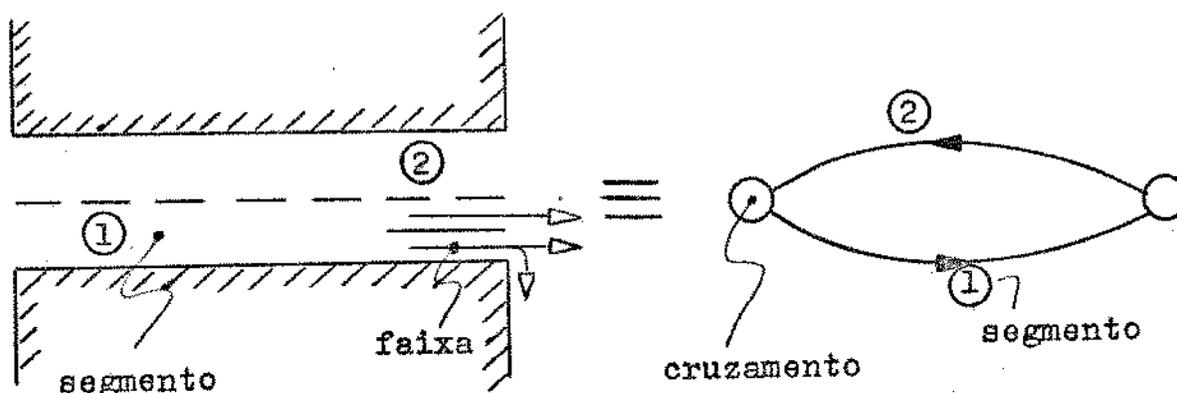


fig. 2

## II.2.1 - Segmentos

Os segmentos são representados por um número inteiro NS. As características que definem os segmentos são:

- Comprimento (dado em metros) :  $ICSG(NS)$
- Número de faixas :  $NFS(NS)$
- Velocidade livre média :  $VELS(NS)$  e  
desvio padrão sobre a velocidade :  $DPVS(NS)$
- Número dos segmentos que saem do cruzamento onde chega NS (esquerda, frente, direita) :  $ISEG(NS,K)$ ,  $K=1,2,3$

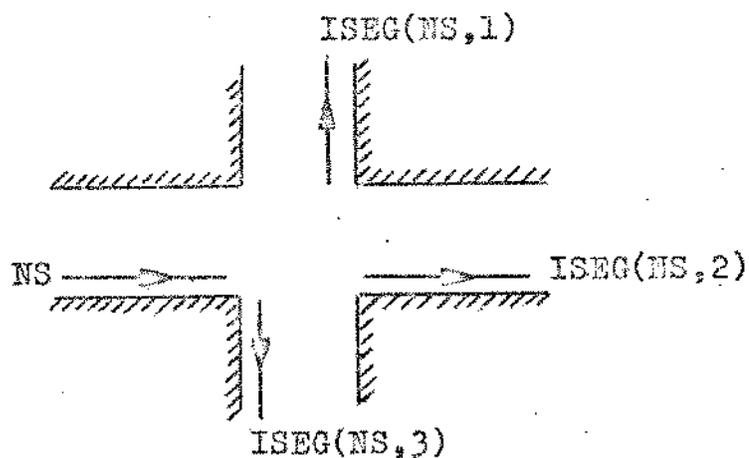


fig. 3

- Número dos segmentos que chegam ao cruzamento onde chega NS (esquerda, frente, direita) :  $NSEG(NS,K)$ ,  $K=1,2,3$

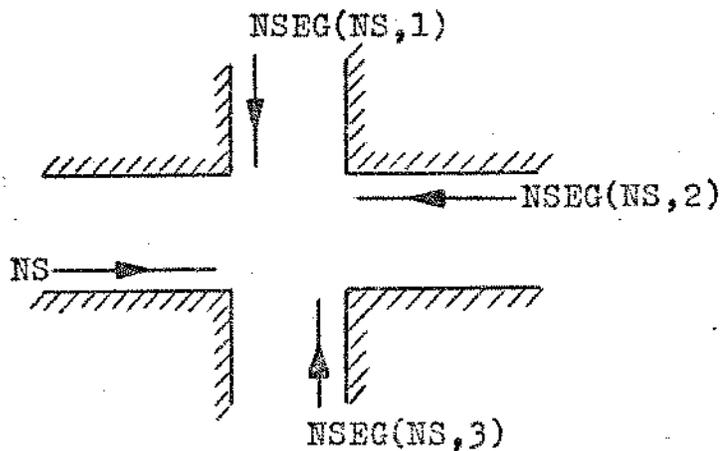


fig. 4

Obs: Caso não exista o segmento chegando ou saindo do cruzamento na direção  $K'$ , fazemos

$$ISEG(NS, K') = 0 \quad \text{ou}$$

$$NSEG(NS, K') = 0$$

- Percentagens de converções ao fim do segmento

PF(NS) : porcentagem em frente

PD(NS) : porcentagem a direita

Servem para determinar a direção que os veículos - vão tomar ao fim do segmento.

- Número da fase ao fim do segmento : IFAS(NS)

Controla o funcionamento do cruzamento de chegada

- Atraso de saída : ATRAS(NS)

Tempo de atraso devido a fase transitória do escoamento da fila. Esse atraso depende das características do segmento (declividade) e do cruzamento (visibilidade).

- Tipo de faixas que compõem um segmento : ITFS(NS)

Neste modelo foram escolhidos 7 tipos possíveis de segmentos:

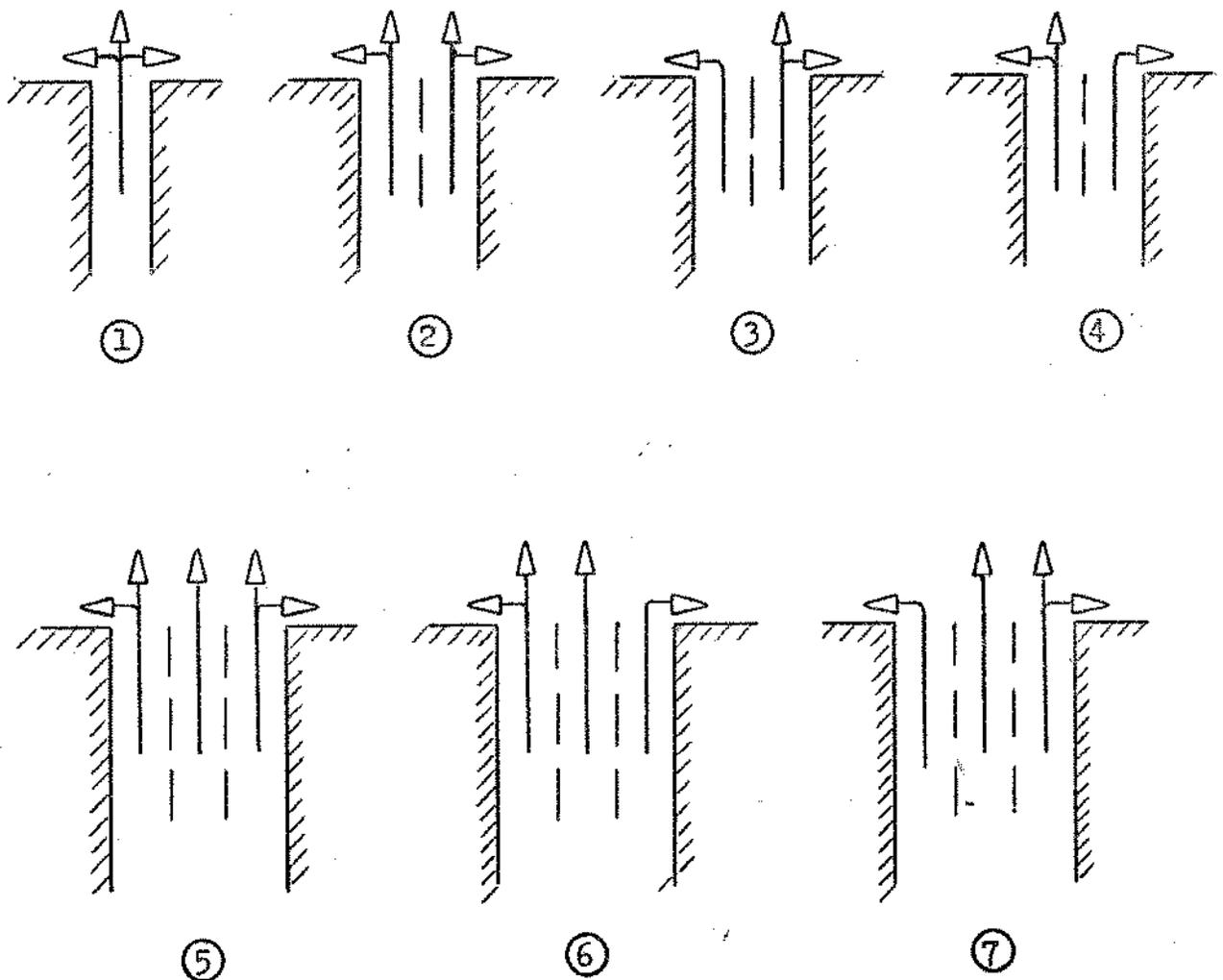


fig. 5

A caracterização de um tipo de segmento é determinada pelo número de faixas que ele comporta (cada faixa utiliza aproximadamente 3 metros) e o tipo de movimento possível em cada faixa. Assim, com os 7 tipos acima (fig.5) conseguimos simular todos os segmentos até 3 faixas de largura.

- Número da faixa mais a esquerda : NPE(NS)

Serve, juntamente com o número de faixas do segmento, para determinar o número das faixas que pertencem ao segmento (NS).

- Tipo do segmento que chega num cruzamento : ITC(NS)

Em relação ao cruzamento, o segmento pode ser sinalizado, preferencial, não preferencial ou ainda sem nenhuma prioridade (II.3.2)

## II.2.2 - Faixas

As faixas são representadas por um número inteiro NF.

Suas características são:

- Número de veículos na faixa : NVF(NF)

Possibilita verificar qual faixa é preferível por um veículo quando ele tem opções. Permite também verificar o grau de concentração da faixa.

- Fluxo de saturação

É o fluxo máximo suportado pela faixa. É função da largura.

DIM(NF) : intervalo de tempo médio entre dois veículos durante o fluxo de saturação.  $DIM = (\text{fluxo de saturação})^{-1}$

- Possibilidade de Ultrapassagem : IPUT(NF)

Define se é possível ou não ultrapassagens na faixa. É função basicamente da largura do segmento e da intensidade de seu fluxo.

- Número do primeiro veículo na faixa : NVPF (NF) e

Número do último veículo na faixa : NVUF (NF)

Esses dois valores, juntamente com o número do veículo a retaguarda de cada um (NVAT, II.1), permitem definir completamente a "pilha" de veículos (ver II.3.3.1).

- Hora da próxima saída possível de veículo : HPSV(NF)

É determinado em função da hora desejada de chegada (HDJC) do primeiro veículo na faixa (NVPF) e do intervalo de escoamento admissível entre dois veículos consecutivos (função do DIM) (ver II.3.2.2).

### II.2.3 - Cruzamentos

Os cruzamentos dentro da rede recebem um número inteiro NC e caracterizam-se por:

- Número de índices do cruzamento : MSEQ(NC)  
Define o número máximo de combinações das fases do cruza  
mento.
- Instante da próxima modificação da fase : IHMF(NC)
- Número da fase que se modifica : NFASE(K,NC)  
K = 1, ..., MSEQ
- Duração da mudança : DUR(K,NC)      K = 1, ..., MSEQ  
Para melhor compreensão ver II.6

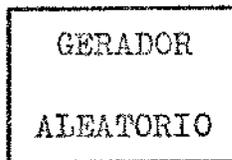
### II.3 - Simulação do tráfego num segmento

#### II.3.1 - Entradas no segmento

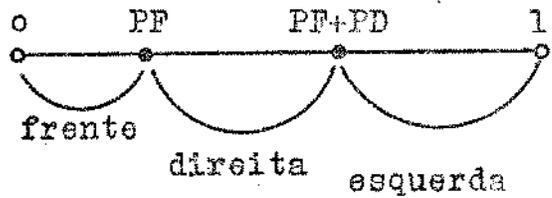
A entrada de um veículo NV num segmento NS dá-se a  
través de 4 etapas

##### II.3.1.1 - Escolha da direção

Através das percentagens de conversão ao fim do seg  
mento determina-se a direção que o veículo tomará. Gera-se um  
número aleatório com distribuição uniforme no intervalo (0,1) e  
associa-se uma direção.



$$\rightarrow 0 < x < 1$$



$$x \leq PF(NS) \rightarrow IDIR(NV) = 0 \quad (\text{frente})$$

$$PF(NS) < x \leq PF(NS) + PD(NS) \rightarrow IDIR(NV) = 1 \quad (\text{direita})$$

$$PF(NS) + PD(NS) < x \rightarrow IDIR(NV) = -1 \quad (\text{esquerda})$$

### II.3.1.2 - Escolha da faixa

Determinada a direção do veículo, passa-se à escolha da faixa (NF). Caso a direção desejada seja esquerda ou direita, o veículo não pode escolher faixa, dadas as configurações de movimentos possíveis que foram adotadas (fig.5). Assim:

$$IDIR(NV) = 1 \rightarrow NF = NFE(NS) + NFS(NS) - 1$$

$$IDIR(NV) = -1 \rightarrow NF = NFE(NS)$$

Porém, se a direção desejada do veículo for em frente ( $IDIR(NV)=0$ ) dependendo do tipo do segmento, deverá haver uma escolha. Assim:

ITFS(NS) = 1,3,4  $\rightarrow$  NF = NFE(NS) (não há escolha)

ITFS(NS) = 2,5,6,7  $\rightarrow$  (ê $\hat{e}$  escolherá)

Para o tipo de faixa ITFS(NS)=2 (sem faixa reserva da), basta comparar o número de veículos nas faixas e escolher a menor.

No caso de se apresentar duas faixas alternativas com uma delas reservada para o movimento em frente, o que ocorre para ITFS(NS)=6,7, a faixa reservada será escolhida se:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Comprimento da fila} \\ \text{na faixa reservada} \end{array} \right] \leq \left[ \begin{array}{l} \text{Comprimento da fila} \\ \text{na faixa não reser-} \\ \text{vada} \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{l} \text{fator de} \\ \text{preferência} \end{array} \right]$$

Esse fator de preferência, que não é o mesmo para os diferentes tipos de segmentos, procura dar peso à preferência do veículo pela faixa reservada ao seu movimento. Esta preferência tem apoio no fato de que os veículos virando à esquerda e direita causam um atraso ao fazerem a conversão.

fator de preferência > 1

No caso de três faixas possíveis (ITFS(NS)=5) inicialmente escolhe-se entre as duas faixas não reservadas aquela

que apresenta menor fila, caindo em seguida no caso anterior.

#### II.3.1.3 - Hora desejada de chegar ao fim do segmento

A hora desejada pelo veículo NV chegar ao fim do segmento NS corresponde a hora corrente em que ele entra no segmento mais o tempo de percurso estimado.

HCOR : hora corrente

HDJC(NV) = HCOR + tempo de percurso estimado

O tempo de percurso estimado é  $ICSG(NS)/V$

Para determiná-lo calcula-se inicialmente a velocidade do veículo que é função da velocidade livre no segmento, desvio padrão sobre a velocidade e o coeficiente sobre a velocidade. Assim:

$$V = f(VELS(NS) , DPVS(NS) , CVEL(NV))$$

$$V = VELS(NS) + DPVS(NS) * CVEL(NV)$$

#### II.3.1.4 - Colocação na "pilha"

A pilha corresponde à sequência de veículos na faixa, parados ou não. É determinável a partir do número do primeiro

meiro veículo na faixa (NVPF(NF)), do número do último veículo na faixa (NVUF(NF)) e do número do veículo à retaguarda de cada um (NVAT). Assim, exemplificando, a situação instantânea da faixa abaixo seria representada pela seguinte pilha:

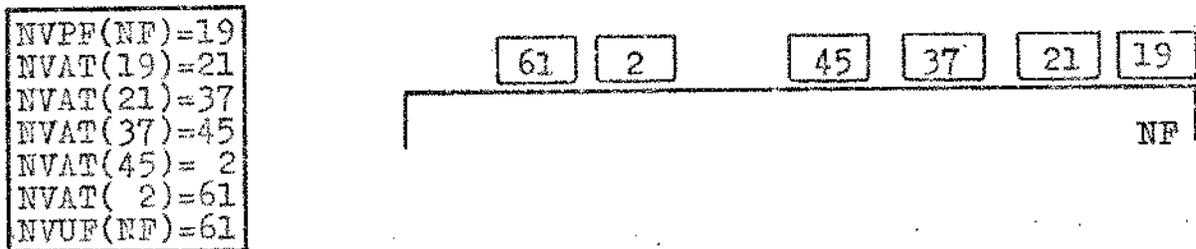


fig. 6

O nosso veículo NV será "empilhado" de acordo com sua hora desejada de chegada ao fim (HDJC(NV)) e da possibilidade ou não de ultrapassagem (IPUT(NF)).

- Sem possibilidade de ultrapassagem : IPUT(NF)=0

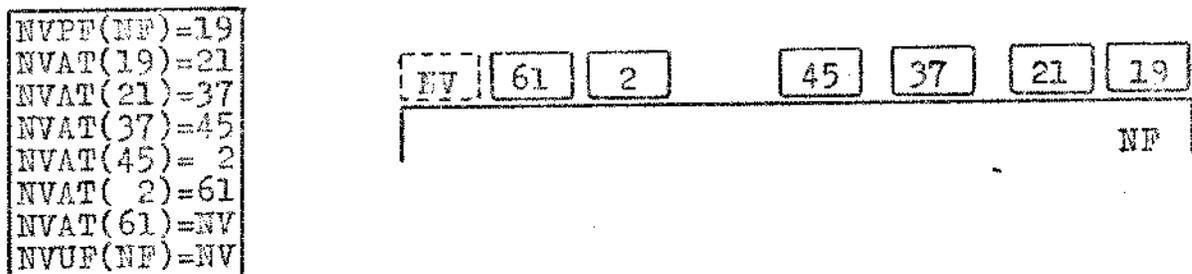
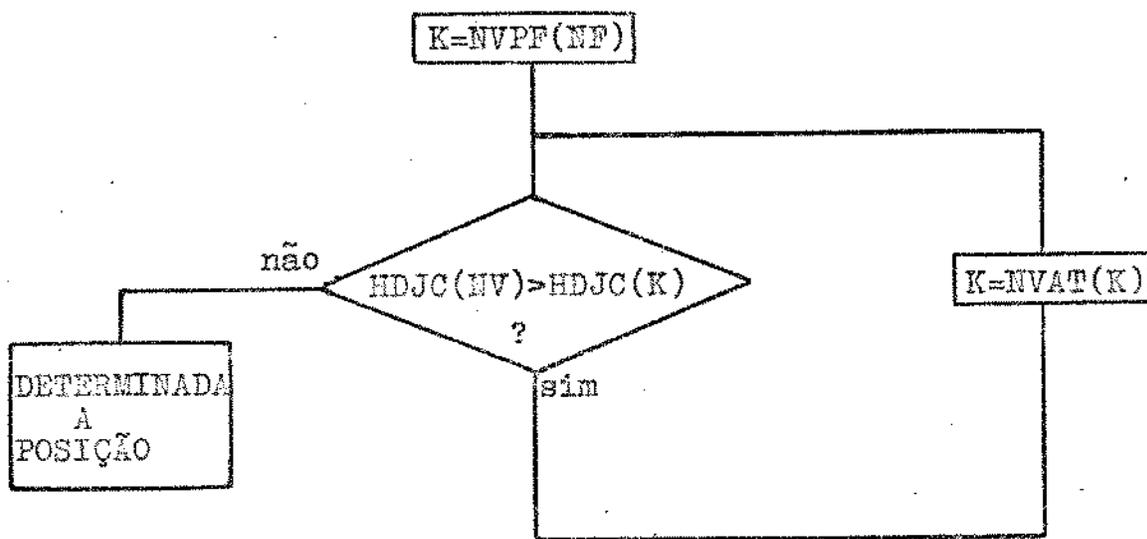


fig. 7

- Com possibilidade de ultrapassagem :  $IPUT(NF)=1$

O veículo comparará sua hora desejada de chegada ao fim com as horas desejadas dos demais a partir do primeiro veículo na faixa e determinará assim seu lugar. O diagrama abaixo explica o mecanismo de procura:



A pilha ficará então modificada:

```

NVPF(NF)=19
NVAT(19)=21
NVAT(21)=37
NVAT(37)=45
NVAT(45)=NV
NVAT(NV)= 2
NVAT( 2)=61
NVUF(NF)=61
  
```

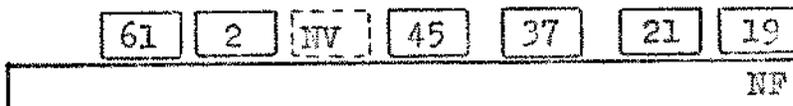


fig. 8

### II.3.2 - Saída do segmento

A simulação prevê a existência de quatro (4) tipos de segmentos diferentes quanto a natureza do cruzamento onde de sembocam. Assim temos:

- Segmentos que chegam em cruzamento sinalizado :  $ITC(NS)=0$
- Segmentos que chegam em cruzamento não sinalizado na di reção preferencial :  $ITC(NS) = 0$
- Segmentos que chegam em cruzamento não sinalizado na di reção não preferencial :  $ITC(NS) = 1$
- Segmentos que chegam em cruzamento não sinalizado e sem preferencial :  $ITC(NS) = -1$

Os dois primeiros casos para efeito de simulação são equivalentes, ou seja, um cruzamento sinalizado funciona como um cruzamento não sinalizado onde a direção preferencial se al terna de acordo com a modificação do estado das fases.

#### II.3.2.1 - Conflitos

Supondo ser possível a saída de um determinado veícu lo de um dado segmento, por exemplo, se o segmento chega a um cruzamento sinalizado e sua fase está verde, configura-se uma situação de conflito quando a direção que o veículo deseja to mar implica em atravessar fluxos que são preferenciais em rela

ção a êle.

Os conflitos dependem, portanto, tanto do tipo de segmento onde o veículo se encontra (sinalizado, preferencial, etc.) quanto da direção desejada por êle.

Existindo três direções possíveis e três tipos de segmentos diferentes quanto ao cruzamento onde chegam (lembrar que sinalizado é equivalente a preferencial) totalizam-se nove situações diferentes.

- Segmento tipo :  $\boxed{\text{ITC}(\text{NS}) = 0}$

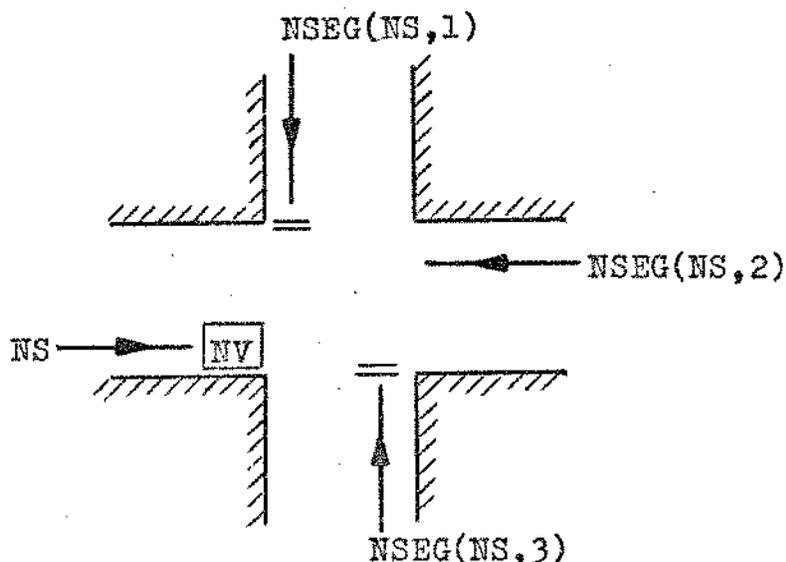


fig. 9

Neste caso, em que a direção do segmento NS é a preferencial, qualquer que seja o rumo desejado pelo veículo, os

segmentos  $NSEG(NS,1)$  e  $NSEG(NS,3)$  não interferirão no seu movimento. Porém, se seu movimento for para a esquerda, haverá um conflito com o segmento  $NSEG(NS,2)$ . Assim:

Se  $IDIR(NV) = 0,1 \rightarrow$  não há conflito  
 $IDIR(NV) = -1 \rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,2)$

- Segmento tipo :  $I\boxed{TC(NS) = -1}$

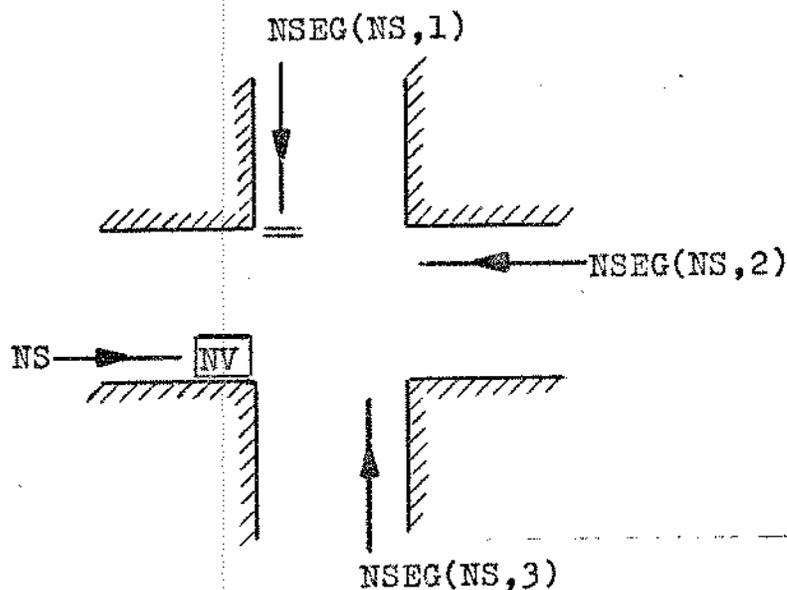


fig. 10

De acordo com as leis de trânsito, e mesmo em geral na prática, quando um veículo chega a um cruzamento sem preferências, a não ser que a sua direção desejada seja a direita, sempre haverá conflito com o segmento que chega a sua direita  $NSEG(NS,3)$ .

Se  $IDIR(NV) = 1$   $\rightarrow$  não há conflito  
 $IDIR(NV) = 0$   $\rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,3)$   
 $IDIR(NV) = -1$   $\rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,2)$ ,  $NSEG(NS,3)$

- Segmento tipo :  $I\boxed{TC(NS) = 1}$

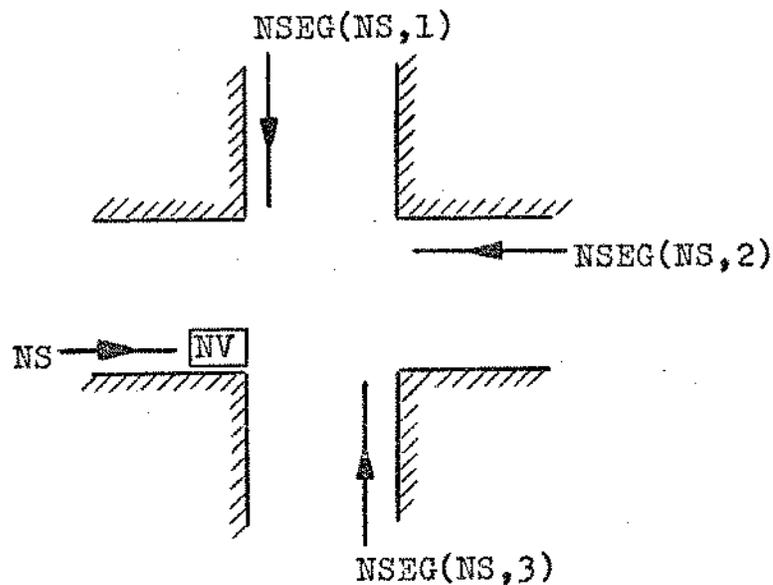


fig. 11

Neste caso, em que o segmento NS é não preferencial, qualquer que seja a direção desejada pelo veículo NV, haverá conflitos. Assim:

Se  $IDIR(NV) = 1$   $\rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,1)$   
 $IDIR(NV) = 0$   $\rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,1)$  e  $NSEG(NS,3)$   
 $IDIR(NV) = -1$   $\rightarrow$  conflito com  $NSEG(NS,1)$ ,  $NSEG(NS,2)$   
e  $NSEG(NS,3)$

### II.3.2.2 - Intervalo de tempo aceito

Quando o veículo NV estando prestes a sair do segmento NS deteta um conflito com um segmento NSEG(NS,K), precisará calcular se o intervalo de tempo até a chegada do primeiro veículo desse segmento ao cruzamento é ou não aceitável, isto é, se é ou não suficientemente grande para que atravesse esse segmento.

O intervalo aceitável pelo veículo deve ser função tanto das características do veículo (torque, desempenho, aptidão do motorista) como da largura do segmento a ser atravessado. Como não dispomos de medidas de tráfego nesse sentido, consideraremos que para uma largura padrão (ALP) o intervalo aceitável pelo veículo apresenta uma distribuição quase normal em função do seu coeficiente de velocidade CVEL(NV) (ver II.4.2), com média TM e desvio padrão SG.

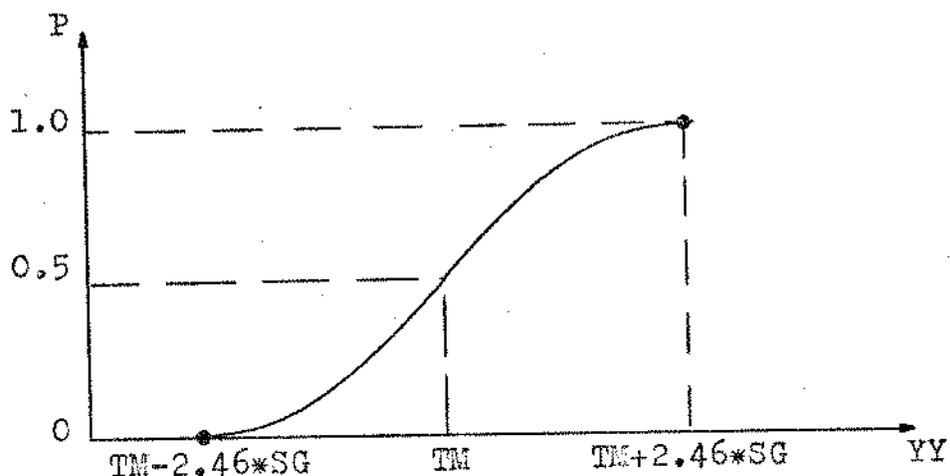


fig. 12

$P = \text{prob} (\text{aceitar um intervalo} < YY)$

Assim, teremos:

$$YY = (TM - SG * CVEL(NV)) * \frac{AL(NS, IDIR(NV) + 2)}{ALP}$$

onde  $AL(NS, K)$  : largura das faixas a serem ultrapassadas por um veículo que vem do segmento NS e tem direção K.

$K = 1 \rightarrow$  esquerda

$K = 2 \rightarrow$  frente

$K = 3 \rightarrow$  direita

Porém, é de se supor que o intervalo médio aceito  $TM$  varie conforme o tempo de espera do veículo, procurando representar o declínio da paciência do motorista e o conseqüente aumento de sua audácia. Assim:

$$TM = f (\text{tempo de espera})$$

A variação do intervalo médio aceito ( $TM$ ) com o tempo de espera será considerada linear levando-se em conta, porém, que existe um limitante inferior representando a impossibilidade física de se aceitar intervalos muito pequenos. Além disso, a medida que o tempo médio aceito diminua, o desvio padrão sobre o intervalo ( $SG$ ) também deve diminuir representando uma suavização das diferenças entre os veículos.

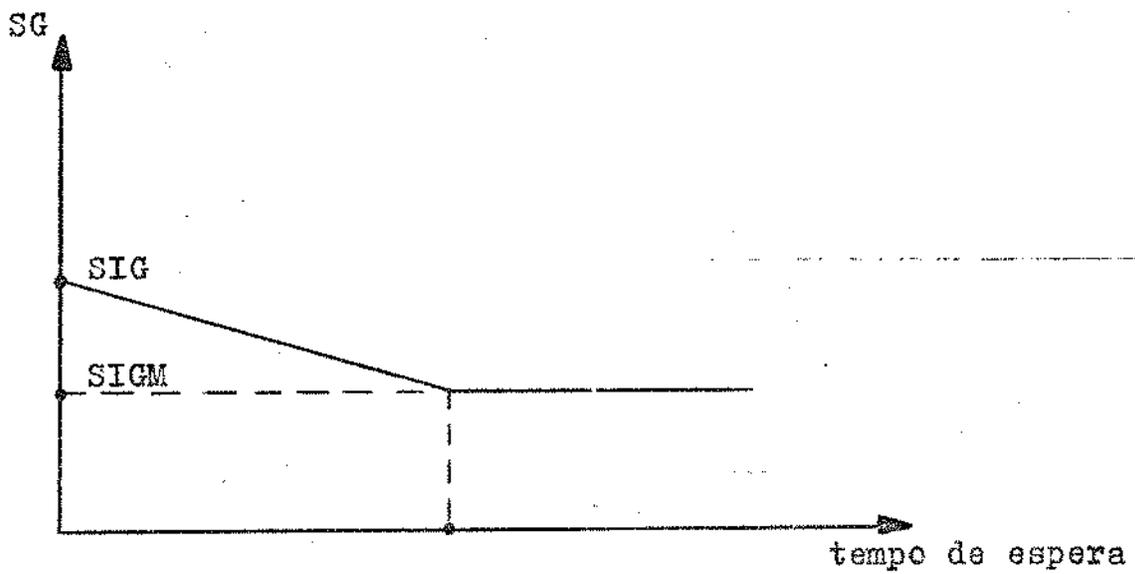
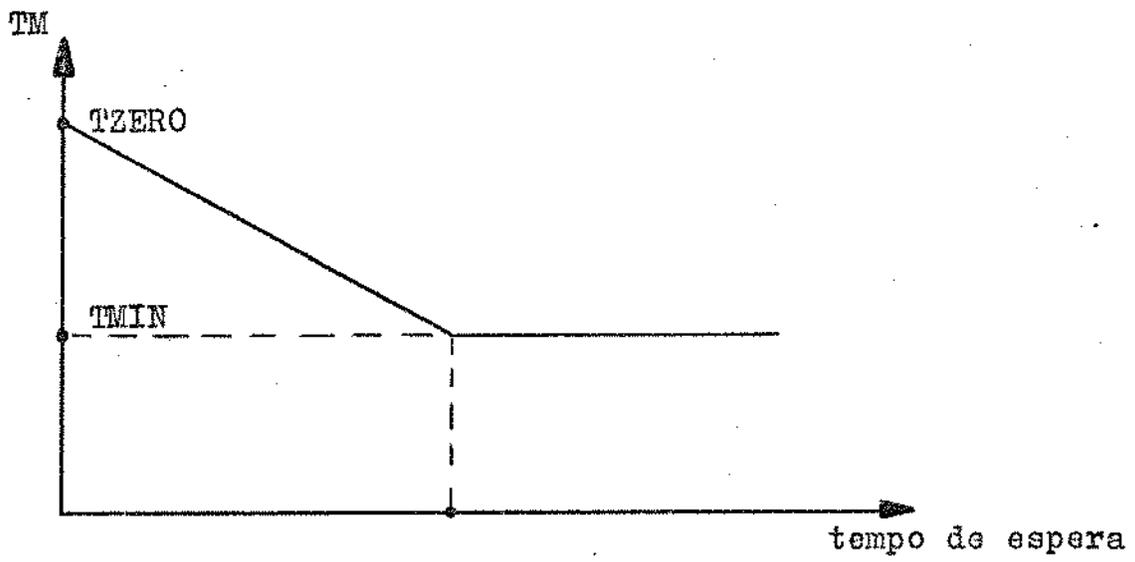


fig. 13

$$TM = \max \quad TZERO(NS) + (1 - FPE + (HCOR - HDJC(NV))) , TMIN$$

$$SG = \max \quad SIG(NS) + (1 - CPE + (HCOR - HDJC(NV))) , SIGM$$

$$\text{onde } CPE = FPE + \left(1 - \frac{SIGM}{SIG(NS)}\right) / \left(1 - \frac{TMIN}{TZERO(NS)}\right)$$

TZERO(NS) = intervalo médio aceito com espera zero

FPE = fator de peso sobre a espera

TMIN = intervalo médio mínimo

SIG(NS) = desvio padrão sobre o intervalo com espera zero

SIGM = desvio padrão mínimo

Na verdade não dispomos de nenhuma medida de campo que possa conferir o modelo acima proposto para a variação do intervalo de tempo aceito (YY). Dessa maneira, nossas suposições foram no sentido de simplificar o modelo considerando líneares as variações dos parâmetros da normal.

Temos então, na figura abaixo, a variação da distribuição do intervalo aceito com o tempo de espera.

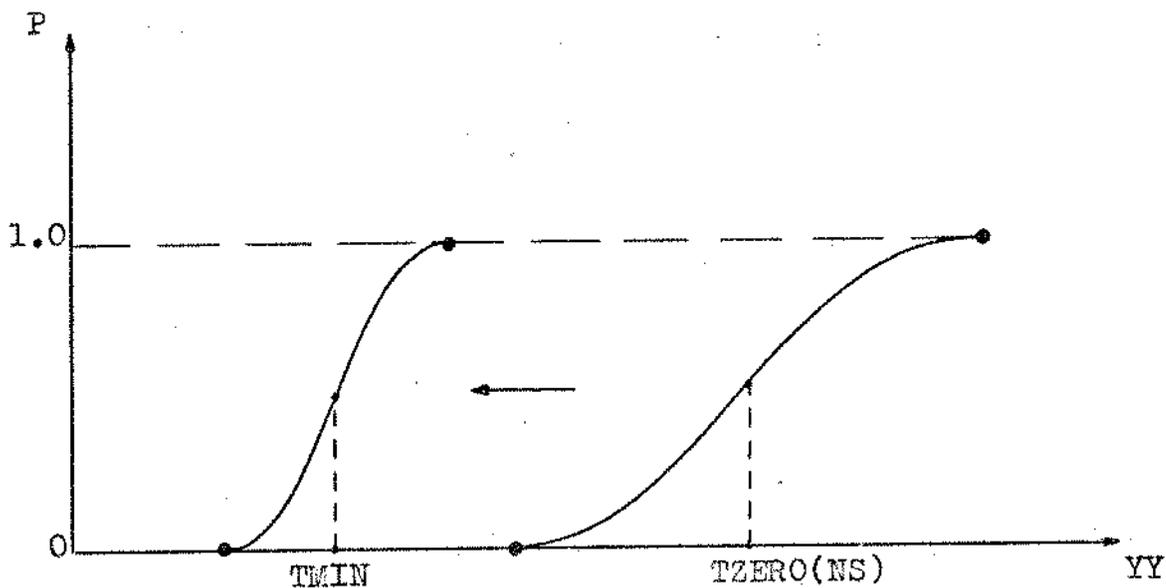


fig. 14

O veículo que deseja sair de um segmento e deteta um conflito deve, portanto, calcular qual o seu intervalo de tempo aceitável e então testar, para todas as faixas do segmento a atravessar se existem veículos que chegarão ao cruzamento a um tempo menor que esse intervalo.

Caso não cheguem veículos nestas condições, o nosso veículo (NV) sairá. Caso cheguem, ele esperará.

Um cuidado importante a se tomar é a previsão de situações de impasse. Assim, por exemplo, num cruzamento sem preferências onde chegam quatro (4) veículos simultaneamente (ou quase), nenhum veículo poderá sair.

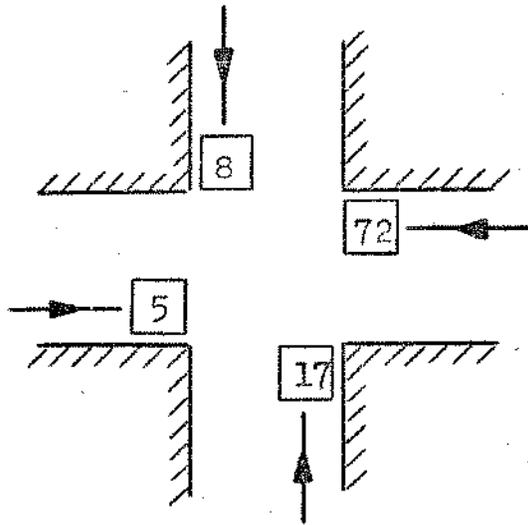


fig. 15

O veículo 5 não sai por causa do 17. Este por sua vez respeitará a preferência do 72 que espera a saída do 8 e este finalmente ficará parado por causa do 5.

É importante a detecção desses impasses e nesses casos quebrar o círculo vicioso. Para isso, um critério possível é dar preferência de saída ao veículo de maior coeficiente de velocidade (CVEL).

### II.3.2.3 - Intervalo de escoamento

A transferência dos veículos de uma faixa NF, como todos os outros eventos da simulação (entradas, mudança de fase, etc.) só é possível em intervalos inteiros de tempo (HCOR).

Porém, apesar das transferências ocorrerem em instantes inteiros, o cálculo dos intervalos de saída deve ser feito com números reais para que seja mantida numa boa precisão.

O intervalo de tempo do escoamento de uma fila é em média o intervalo mínimo entre dois veículos ou o inverso do fluxo máximo na faixa (DIM(NF)). A distribuição segue uma lei quase normal, função do coeficiente sobre a velocidade - CVEL. (ver II.4.2)

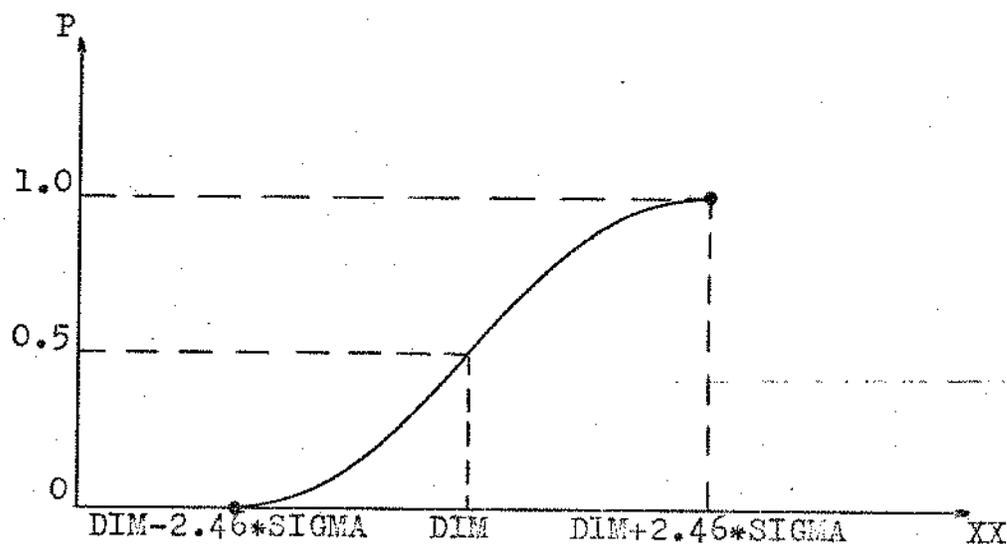
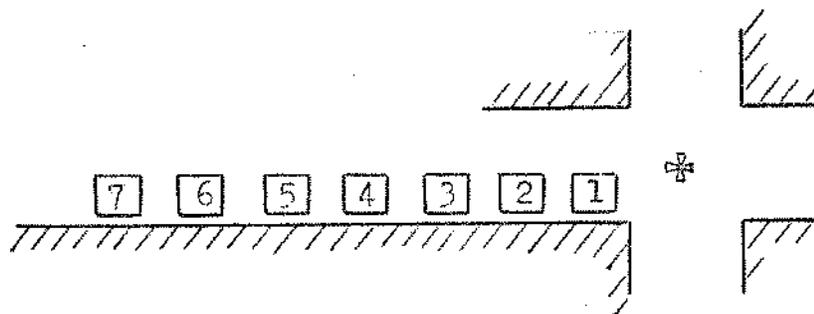
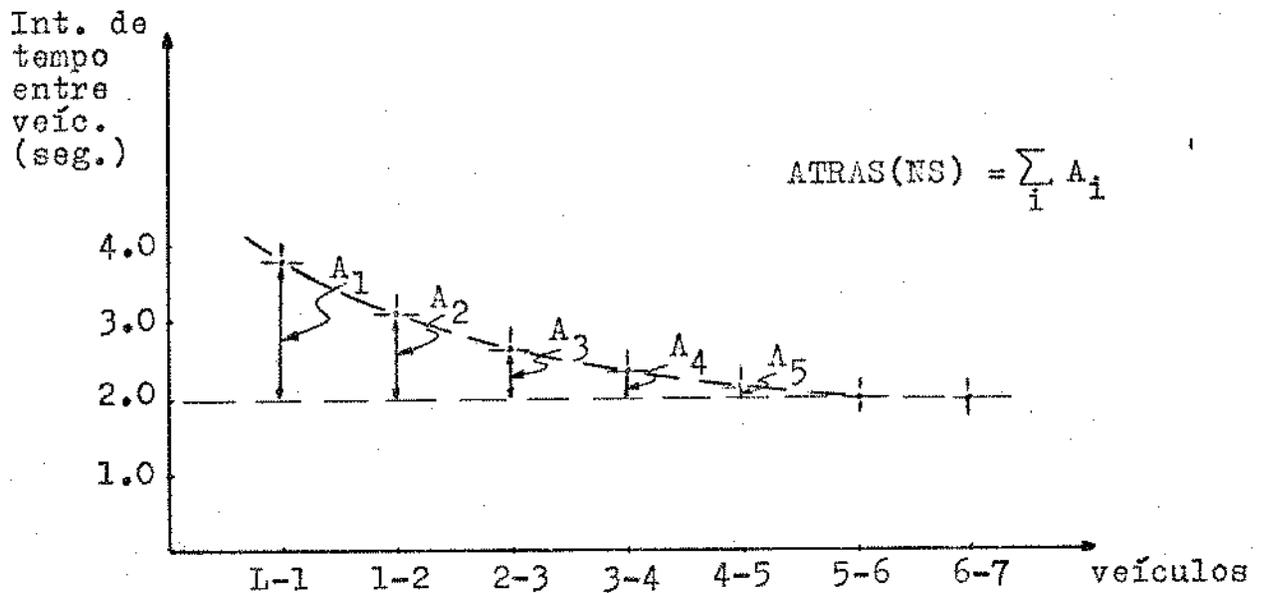


fig. 16

$P = \text{prob} (\text{ocorrer intervalo} < XX)$

$XX = \text{DIM}(\text{NF}) - \text{SIGMA}(\text{NS}) * \text{CVEL}(\text{NV})$

Ao se iniciar o escoamento da fila, quando o sinal é aberto, percebe-se uma fase transitória em que o fluxo é crescente para depois estabilizar-se num fluxo de regime (5).



Em termos de fluxo teríamos:

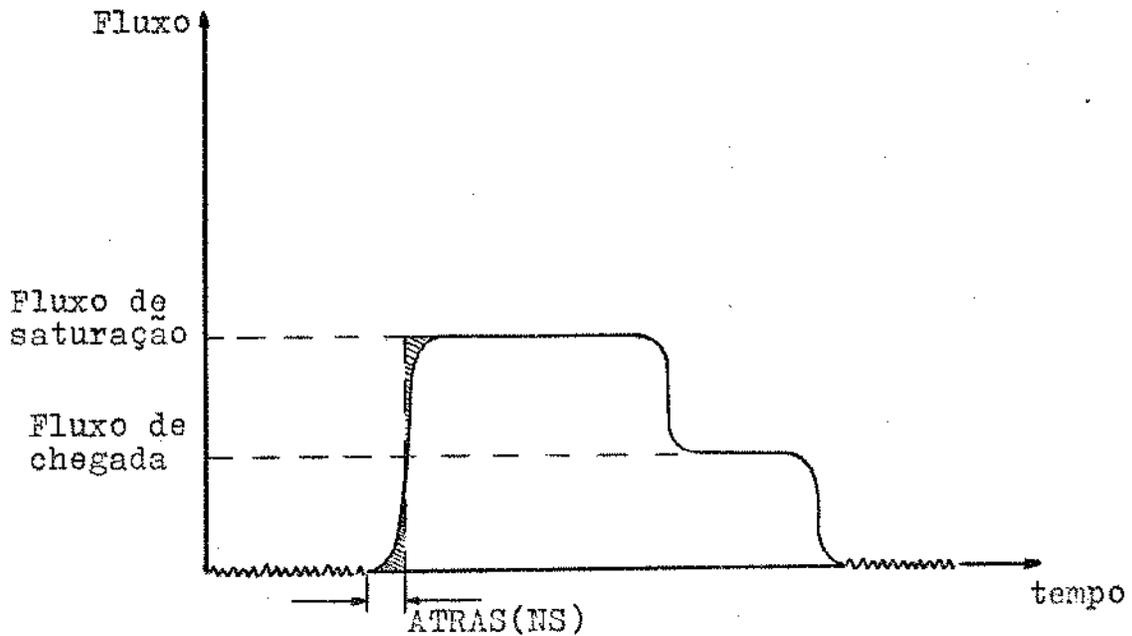


fig. 18

Esse transitório acarreta um atraso que representa o custo de colocar a fila em movimento e está distribuído entre os primeiros veículos da fila de uma forma decrescente. Para efeito de simplificação do modelo de simulação, nós atribuiremos este atraso totalmente ao primeiro veículo. Assim,

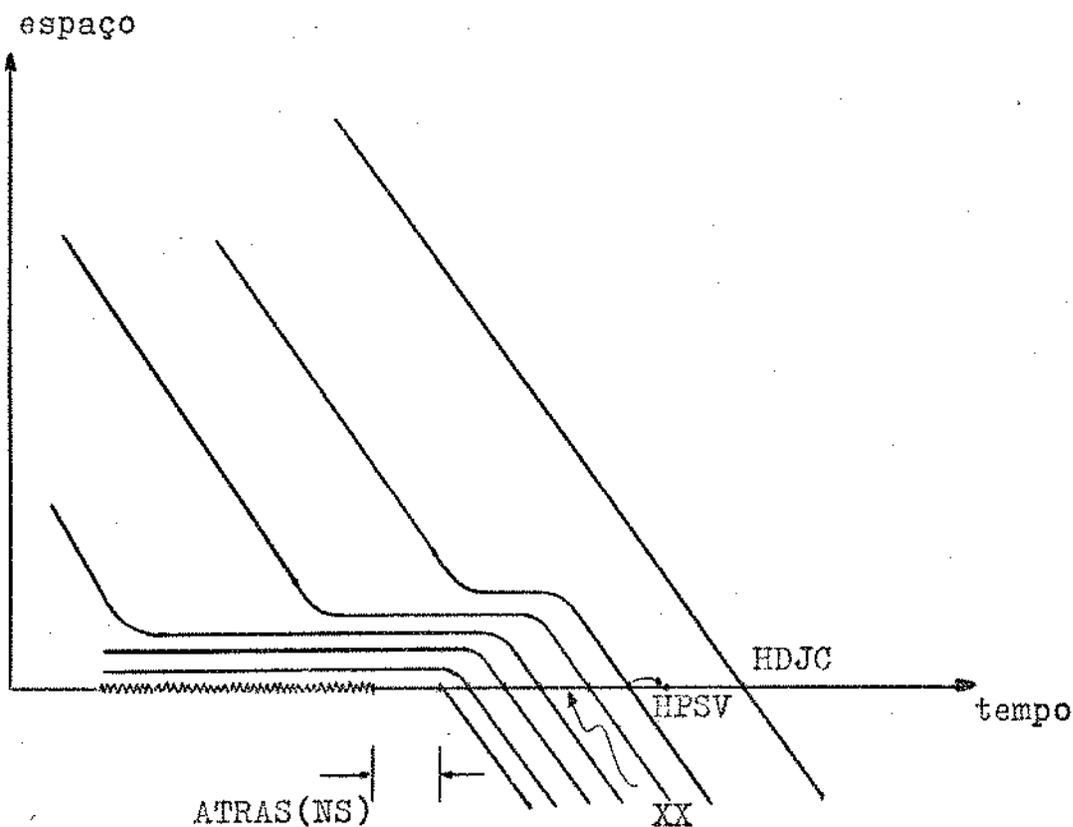


fig. 17

Quando o sinal abre, a hora possível de saída de veículo será

$$\text{HPSV(NF)} = \text{HCOR} + \text{ATRAS(NS)}$$

Em seguida, seu valor é calculado pelo intervalo de escoamento

$$\text{HPSV(NF)} = \text{HPSV(NF)} + \text{XX}$$

Nem sempre o veículo sairá a hora possível de saída. Caso tenha numa hora desejada de chegada maior, esta será sua hora de saída.

$$\text{Hora de saída do veículo} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{Hora possível} \\ \text{de saída} \end{array} ; \begin{array}{l} \text{Hora desejada} \\ \text{de saída} \end{array} \right\}$$

$$\text{Hora de saída do veículo} = \text{Max} \left\{ \text{HPSV(NF)} ; \text{HDJC(NV)} \right\}$$

#### II.3.2.4 - Simulação de cruzamentos especiais

Se na eminência de sair do segmento NS, o veículo defrontar-se com mais de tres direções possíveis, estará frente a um cruzamento especial.

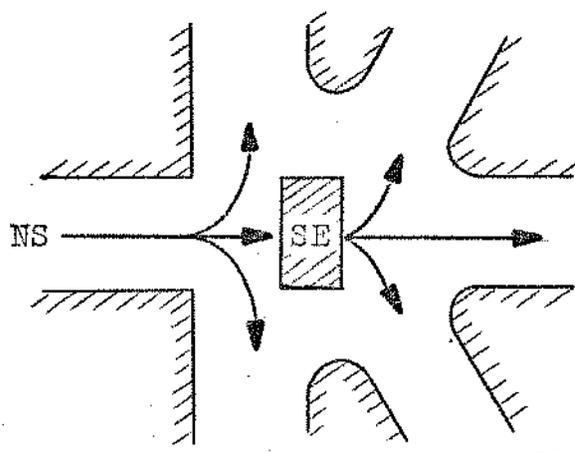


fig. 18

A simulação de tais cruzamentos é possível através da introdução de segmentos fictícios que permitem a reorientação

do fluxo com mais de tres movimentos.

### II.3.2.5 - Simulação de Segmentos especiais

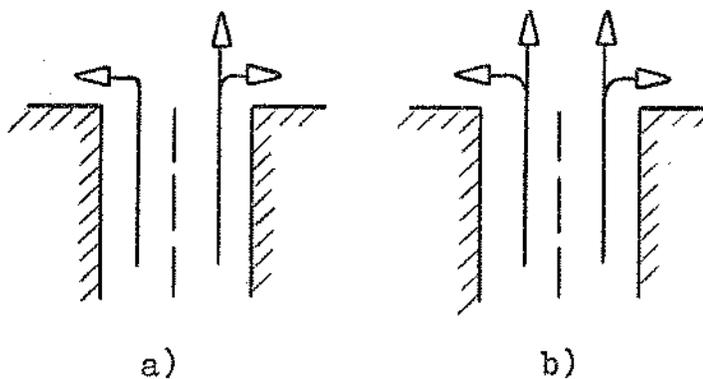


fig. 19

As conversões à esquerda num cruzamento podem ser simuladas por 2 tipos de faixas (fig.19):

- a) reservada exclusiva para este tipo de movimento .
- b) reservada, porém que admite também o movimento em frente.

Se houver fluxo contrário conflitando com este movimento à esquerda, os veículos que quiserem efetuá-lo deverão a ceitar um intervalo de tempo.

No caso a , se um veículo querendo virar a esquer da não o consegue, os que o seguem também deverão esperar.

Porém no caso b não é muito realístico fazer com que os veículos indo em frente esperem os que devam virar a esquerda. Na realidade os veículos que do<sup>br</sup>am à esquerda agrupam-se em posições intermediárias aguardando um intervalo para cruzar o fluxo contrário (fig.20)

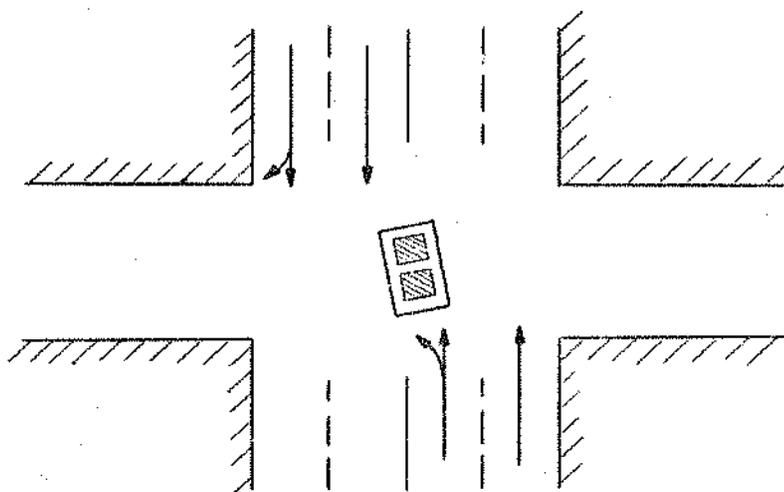


fig. 20

Para simularmos esta situação criamos um segmento especial com capacidade para 2 ou 3 carros cuja principal finalidade é permitir que a faixa fique desimpedida para os movimentos em frente.

Quando da montagem da matriz das interferências - (ISEG(NS,K) , NSEG(NS,K) , K = 1,2,3) o segmento especial deve estar coerente com o tipo de interferência que sofre ou que provoca na realidade.

## II.4 - Entradas na rede

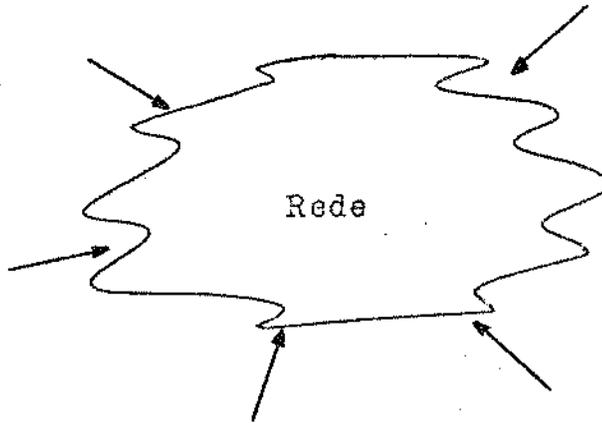


fig. 21

O método de simulação consiste em gerar entradas de veículos na rede, inicialmente vazia, passando por transitório de carregamento até que o número de veículos na rede atinja o regime permanente, estabilizando-se com uma média constante.

Nestas condições inicia-se o cálculo do critério a ser obtido. Entenda-se por critério uma ou mais variáveis do modelo que dão uma medida do desempenho de determinada política - (estrutura global).

### II.4.1 - Geração

A geração da entrada de veículos será aleatória com uma distribuição qualquer  $F(x)$ . A obtenção dessa variável aleatória será feita mediante o princípio da Transformação in

versa (1).

É facilmente obtível nos computadores, geradores de números pseudo-aleatórios no intervalo (0,1) com distribuição uniforme.



$$F(y) = P(Y \leq y) = y \Rightarrow f(y) = \frac{dF(y)}{dy} = 1$$

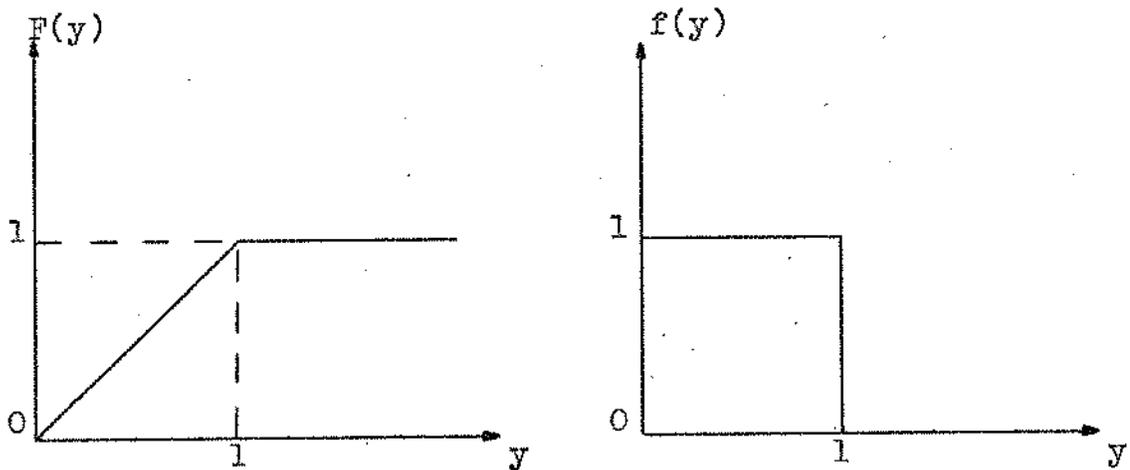


fig. 22

Suponhamos que se deseja obter uma variável aleatória  $X$  com função densidade  $f(x)$  e função distribuição  $F(x)$ , contínuas.

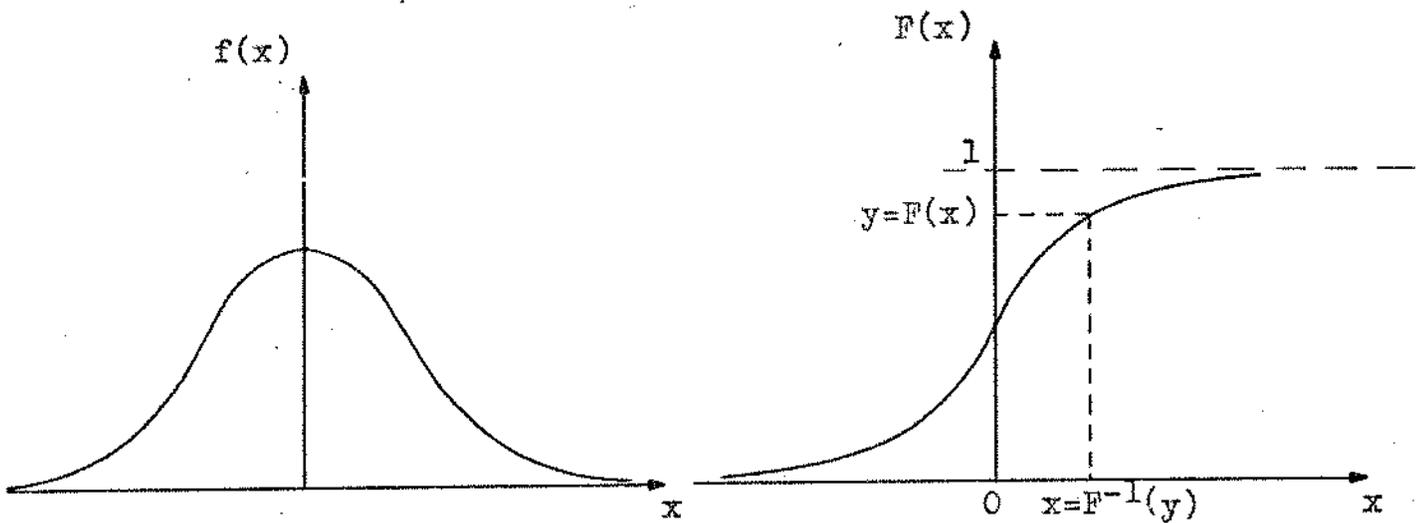


fig. 23

Temos então, considerando  $Y$  um número aleatório com distribuição uniforme em  $(0,1)$

$$P(X \leq x) = F(x) = y = P(Y \leq F(x)) = P(F^{-1}(Y) \leq x)$$

$$\therefore X = F^{-1}(Y)$$

Ou seja,  $X$  e  $F^{-1}(Y)$  serão variáveis aleatórias idênticas, se  $Y$  for uma variável aleatória com distribuição uniforme no intervalo  $(0,1)$ . Fazendo portanto  $X = F^{-1}(Y)$  podemos obter amostras de  $X$  a partir de amostras de  $Y$  através da transformação  $F^{-1}$ .

No caso da geração nas entradas, quando as fronteiras

da rede são escolhidas convenientemente (segmentos de entrada longos, fluxos longe da saturação) prevê-se que o processo de entrada de veículos seja Poisson, isto é:

- 1 - O número de veículos entrando durante intervalos de tempo não sobrepostos constituem variáveis aleatórias independentes.
- 2 - A distribuição do número de veículos entrando durante qualquer intervalo depende apenas do comprimento desse intervalo e não de seus pontos extremos.
- 3 - Se um intervalo for suficientemente pequeno, a probabilidade de ocorrer uma entrada é diretamente proporcional ao comprimento do intervalo.
- 4 - A probabilidade de ocorrer duas ou mais entradas durante um intervalo suficientemente pequeno é desprezível.

A distribuição de Poisson é

$$F(x) = 1 - e^{-ax} \quad \text{com média}$$

$$E(x) = 1/a$$

No caso do tráfego, é necessário considerar que existe um intervalo de tempo mínimo entre a entrada de 2 veículos (b) (No programa chama-se DTMIN). Precisamos então alterar a função de distribuição  $F(x)$  mantendo porém a mesma média  $1/a$  (no programa chama-se DTMED).

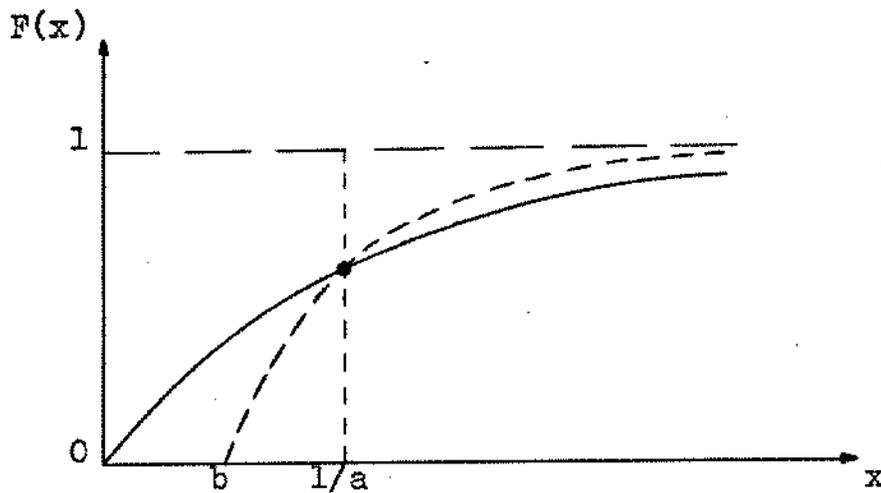


fig. 24

A nova função de distribuição fica

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x-b}{1/a-b}} \quad \text{com}$$

$$E(x) = 1/a$$

Para se obter o valor de  $b$  o procedimento deveria ser de medi-lo na prática. Porém podemos considerá-lo como um valor abaixo do DIM (inverso de fluxo máximo), que por sua vez é um valor médio de uma distribuição. O  $b$  deve ser o mínimo valor desta distribuição.

Outras distribuições podem ser usadas para a geração de veículos nas entradas da rede, conforme os problemas especí

ficos que são estudados. Em nossos exemplos, descritos no capítulo IV, utilizamos a geração de veículos com distribuição de Poisson.

#### II.4.2 - Coeficiente sobre a velocidade

A velocidade dos veículos numa rua apresenta, segundo experiências do RRL, uma distribuição quase normal. O coeficiente sobre a velocidade  $CVEL(NV)$  dos veículos representará essa distribuição reduzida. Portanto, o problema que se apresenta é determinar inicialmente a distribuição do  $CVEL(NV)$  para em seguida aplicar a transformação inversa.

Seja uma normal reduzida :  $N(0,1)$

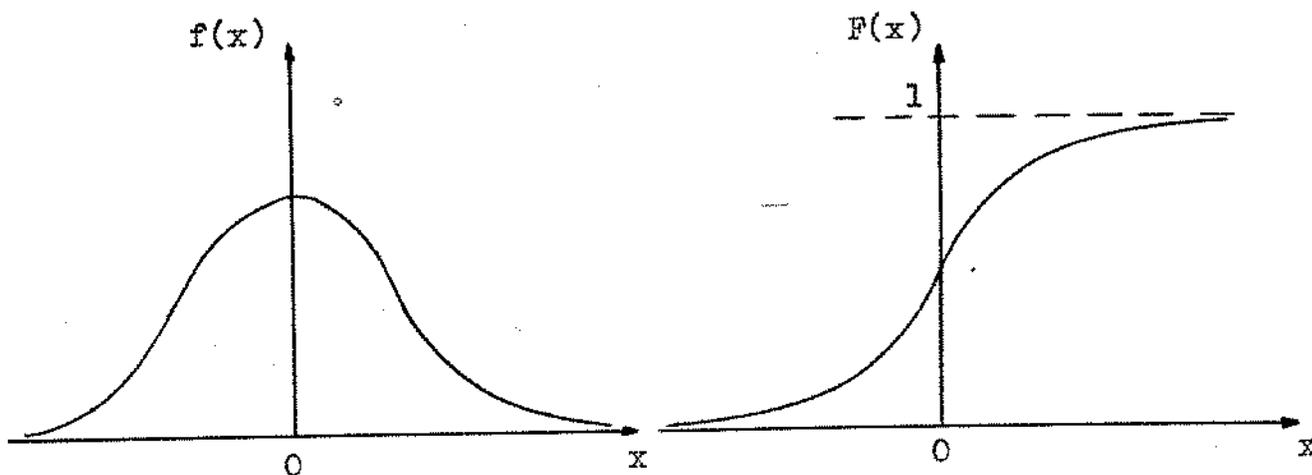


fig. 25

Deseja-se aproximar a função de densidade da normal pelo melhor triângulo cuja área sobre a curva continue sendo 1, isto é,  $P(X \leq \infty) = 1$ .

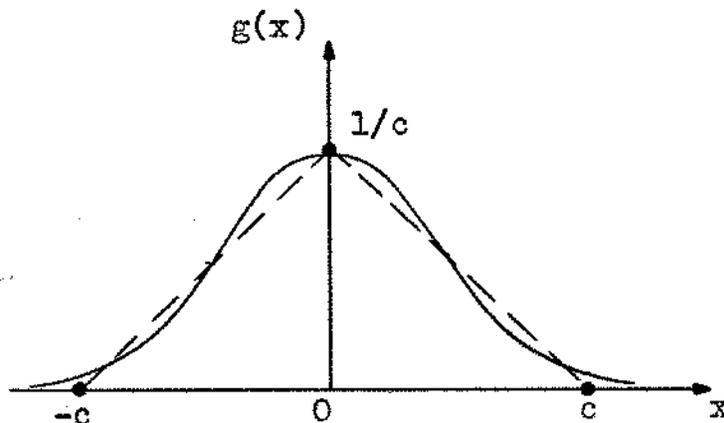


fig. 26

A simetria do triângulo satisfaz a condição de mé dia zero (fig.26)

$$E(x) = 0$$

Com a condição de área unitária o problema se reduz a determinação do parâmetro C.

Resta-nos portanto impor a condição de variância unitária.

$$\text{VAR}(x) = E(x^2) - E(x)^2$$

$$\text{VAR}(x) = E(x^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 g(x) dx = \int_{-c}^0 x^2 g_1(x) dx + \int_0^c x^2 g_2(x) dx$$

$$\int_{-c}^0 x^2 \left( \frac{x+c}{c^2} \right) dx + \int_0^c x^2 \left( \frac{c-x}{c^2} \right) dx = \frac{c^2}{6} = 1$$

$$\therefore c = 2.46$$

A função de distribuição  $G(x)$  será então:

$$G(x) = \int_{-\infty}^x g(t) dt$$

$$G(x) = \int_{-c}^x g_1(t) dt \quad \text{para } x \leq 0$$

$$\int_{-c}^0 g_1(t) dt + \int_0^x g_2(t) dt \quad \text{para } x > 0$$

$$G_1(x) = \int_{-c}^x g_1(t) dt = \frac{(x+c)^2}{2c^2}$$

$$G_2(x) = \int_{-c}^0 g_1(t) dt + \int_0^x g_2(t) dt = 1 - \frac{(c-x)^2}{2c^2}$$

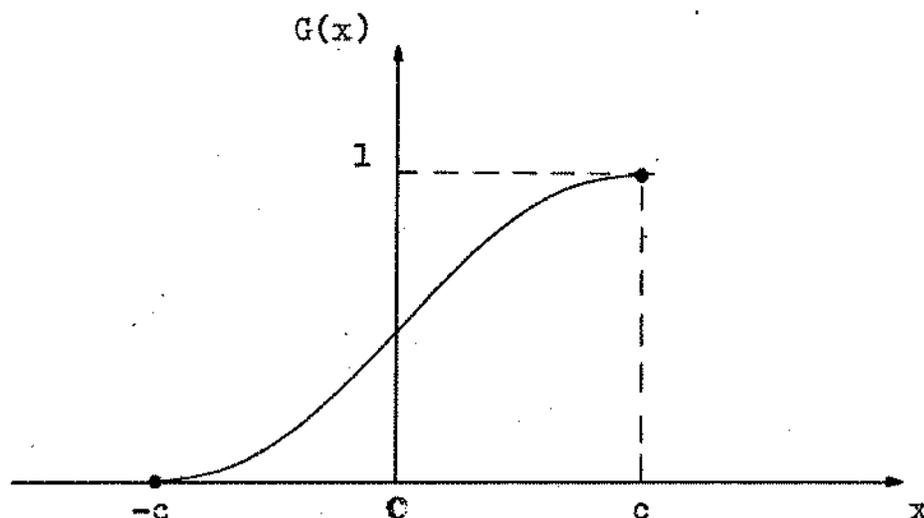


fig. 27

Aplicando a transformação, gera-se números aleatórios  $y$  com distribuição uniforme no intervalo  $(0,1)$  e determina-se  $-CVEL(NV)$  com distribuição quase normal no intervalo  $(-c, c)$ .

## II.5 - Saídas da rede

A saída de um veículo da rede ocorre quando este é transferido para um segmento NS de saída, os quais são identificados por  $NS = 0$ .

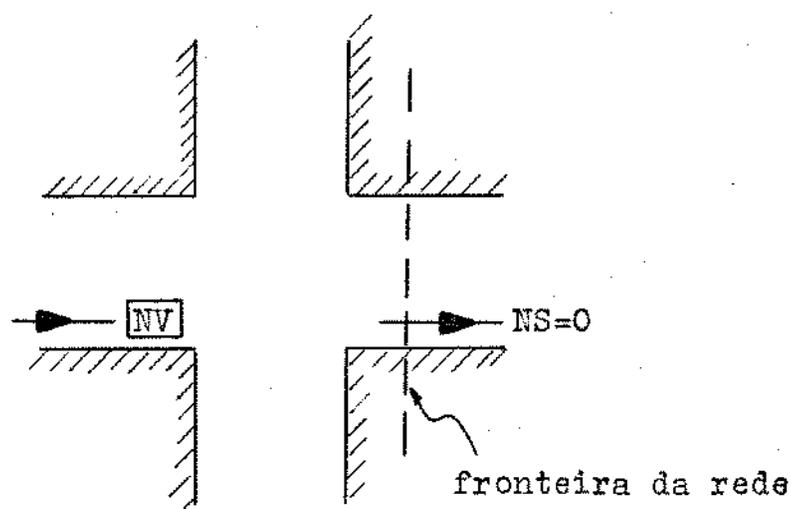
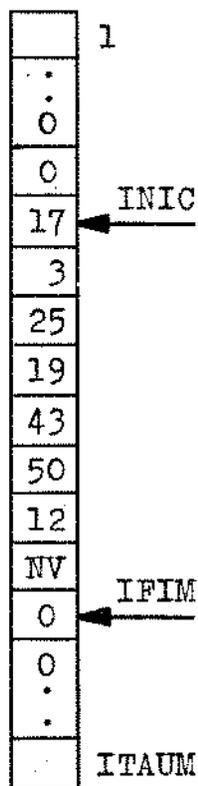


fig. 28

Para efeito de economia de memória no computador, ao sair um veículo NV da rede guardaremos seu número em uma tabela auxiliar, deixando-o disponível para ser utilizado por novos veículos que entram na rede. Com isso permitiremos simular redes de grandes dimensões utilizando pouca memória. A simulação prolongada de uma rede, que implica na passagem de um grande número de veículos, será possível utilizando somente a memória necessária para o número de veículos que a rede contiver em regime.



ITAU(K): número do veículo disponível na tabela auxiliar na posição K.

ITAU(K)=0 : não há número disponível.

fig. 29

O ponteiro INIC aponta para o primeiro número de veículo disponível, de modo que, quando entrar um veículo na rede ele receberá o número ITAU(INIC) e o ponteiro se deslocará (  $INIC = INIC + 1$  )

O ponteiro IFIM indica o primeiro lugar vago na tabela auxiliar de modo que quando sair um veículo NV da rede sem número será guardado na tabela fazendo  $ITAU(IFIM) = NV$  e o ponteiro se deslocará (  $IFIM = IFIM + 1$  ).

A tabela auxiliar é rotativa, isto é, quando algum ponteiro chega ao fim (  $K = ITAUM$  ), ele deve retornar ao início (  $K = 1$  ).

Caso a tabela auxiliar esteja totalmente ocupada e mais um veículo saia, fatalmente seu número será perdido. A dimensão da tabela auxiliar, bem como a dimensão dos vetores característicos dos veículos (IDIR, NVAT, CVEL, HDJC) são função da dimensão da rede.

## II.6 - Funcionamento dos sinais

O funcionamento dos cruzamentos é controlado pelas fases que os compõem. Assim, um cruzamento padrão NC como o da figura abaixo, tem seu funcionamento regido pelas fases NFZ1 e NFZ2.

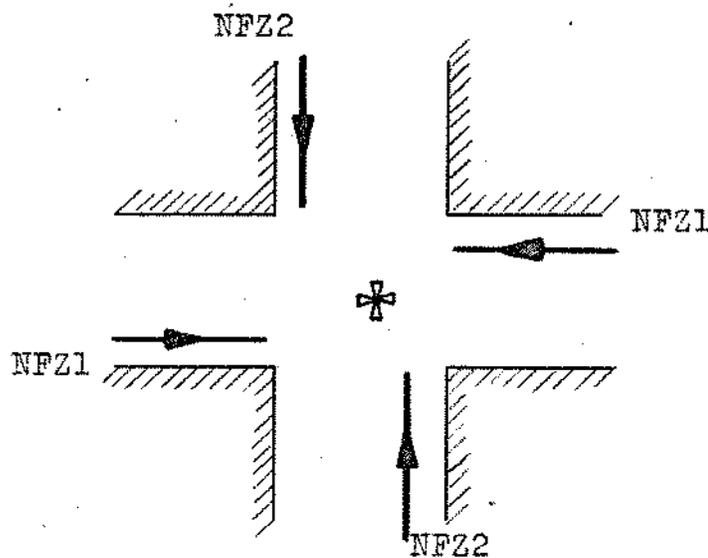


fig. 30

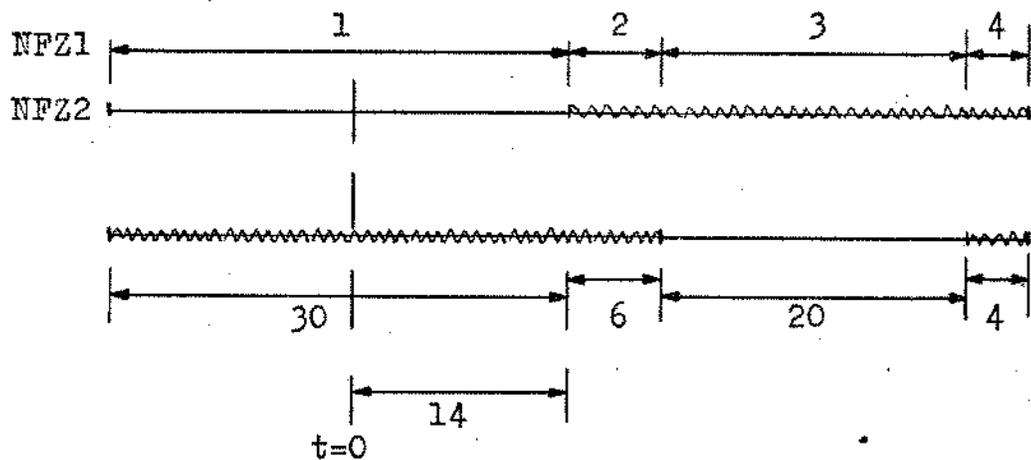


fig. 31

Distingue-se uma seqüência de 4 combinações entre NFZ1 e NFZ2 que podem ter durações diferentes. A simulação da mudança das fases é feito pela tabela das seqüências (tab.1) que mostra: O índice em que se está (IND(NC)), a fase que mudou (NFASE(IND(NC),NC)) e a duração da mudança (DUR(IND(NC),NC)).

IND	NFASE	DUR
1	NFZ1	30
2	NFZ1	6
3	NFZ2	20
4	NFZ2	4

Tab. 1 - Tabela das seqüências

Conhecendo-se essa sequência é possível determinar a hora da próxima modificação de fase e qual a fase que deve mudar. Inicializa-se o funcionamento de algum ponto da sequência ( $t = 0$ ), função da defasagem absoluta do cruzamento. Assim,

$IEST(NFZ1) = 1 \rightarrow$  estado da fase 1 : verde

$IEST(NFZ2) = 0 \rightarrow$  estado da fase 2 : vermelho

$IHPMF(NC) = 14 \rightarrow$  hora da próxima modificação de fase:  
14 segundos.

$IND(NC) = 1 \rightarrow$  índice no qual está contido a origem  
dos tempos : 1

Após 14 segundos ocorrerá uma mudança. O índice  $IND(NC)$  será incrementado ( $IND(NC)=2$ ), a fase que mudará a correspondente ao novo índice ( $NFZ1$ ) e a hora da próxima modificação será calculada pela soma da duração da mudança

$$IHPMF(NC) = IHPMF(NC) + DUR(IND,NC)$$

No nosso caso

$$IHPMF(NC) = 14 + 6 = 20$$

Ao ser atingido o instante 20 seg. nova modificação o correrá e assim por diante.

O controle dos cruzamentos pelas fases obriga necessariamente uma relação de correspondência entre esses dois elementos. Desse modo, a numeração das fases deverá ser sequencial forçando uma correspondência unívoca entre fase e cruzamento. Além disso, é necessário conhecer quais as faixas que

dependem da fase  $NFZ((NSRF(NFZK), K=1, \dots, 8))$  para que ela possa regular os seus funcionamentos.

Caso o cruzamento tenha tres fases o procedimento é análogo com o aumento da tabela das sequencias que é regulada pela variável

$$\left. \begin{array}{l} MSEQ(NC) = 4 \rightarrow 2 \text{ fases} \\ MSEQ(NC) = 6 \rightarrow 3 \text{ fases} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{n}^\circ \text{ de combinações entre} \\ \text{as fases} \end{array}$$

Se o cruzamento NC não for sinalizado, sua simulação consistirá em inicializar o estado das duas fases com verde , procedendo-se como se o cruzamento tivesse semáforo.

$$IEST(NFZ1) = 1$$

$$IEST(NFZ2) = 1$$

$$IEST(NFZ) : \text{estado da fase NFZ} \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{vermelho} \\ 1 - \text{verde} \end{array} \right.$$

Além disso, não se deve permitir que haja mudanças nessas fases durante a simulação, inicializando-se a hora da próxima modificação de fase no cruzamento  $NC(IHPMF(NC))$  com um valor grande o suficiente a ponto de superar o tempo total de simulação.

$$IHPMF(NC) > HCORM$$

HCORM: tempo total de simulação (em segundos)

Com esse procedimento as fases NFZ1 e NFZ2 estarão verdes durante toda a simulação, fazendo com que o cruzamento

NC funcione como não sinalizado.

## II.7 - Cálculo do critério

Simulado o funcionamento da rede falta-nos agora medir um determinado critério. As variáveis a serem medidas podem ser de natureza as mais diversas de acordo com os objetivos de uma política de planejamento.

Assim, pode-se querer medir o tempo médio de percurso nas ruas, o atraso de fila em ruas ou na rede toda, o número de paradas (mede o desconforto e perigo de uma parada). Pode-se, também, ponderar diferentemente determinadas ruas como por exemplo as que são usadas como trajeto de veículos coletivos.

No nosso caso, o critério adotado é uma combinação do a traso de fila global da rede e do número de paradas.

### II.7.1 - Atraso de fila

O atraso dos veículos na rede é determinado pela soma tória dos atrasos dos segmentos

$$AF = \sum_{NS} ATR(NS)$$

Quando num certo instante HCOR um veículo é transferido de um segmento, seu atraso é calculado e adicionado ao atraso do segmento

$$ATR(NS) = \sum A_i$$

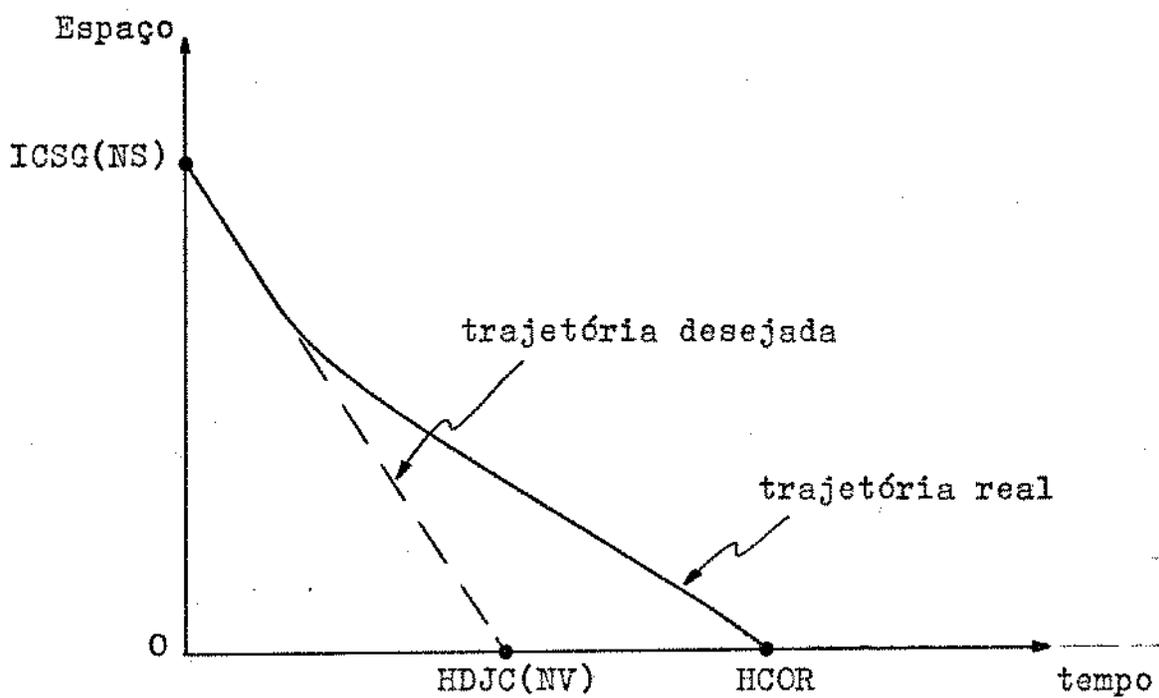


fig. 32

O atraso do veículo NV é:

$$A_i = HCOR - HDJC(NV)$$

## II.7.2 - Atraso de parada

Para um veículo que para em algum ponto da rede, além de se computar seu atraso  $A_i$ , é necessário computar sua para da pois não é equivalente, do ponto de vista do conforto e se gurança do motorista, parar uma vez  $x$  segundos ou efetuar  $x$  paradas de um segundo. O atraso de parada é função do número - de paradas que ocorreram na rede.

$$AP = CP * \sum NUPAR(NS)$$

O custo de parada (CP) é o tempo de atraso equiva lente a uma parada e NUPAR(NS) é o número de paradas que o correram num segmento NS. A possibilidade de acontecer ou não uma parada de veículo é função da existência ou não de confli tos (exceto quando da ocorrência de sinal vermelho) que por sua vez dependem do tipo de cruzamento onde o segmento NS es tá chegando (ITC(NS)) e da direção desejada pelo veículo - (IDIR(NV)) (II.3.2.1).

O algoritmo mostrado na fig. 33 permite detetar a pa rada de um veículo que sai de um certo segmento.

Evidentemente, se o veículo considerado não se atra sou durante o seu percurso, isto é, sua saída do segmento se deu a hora desejada, ele não parou (fig.34a). Caso tenha se a trasado e seja possível ultrapassar ele só pode ter se atrasa- do devido a encontrar o sinal fechado ou existir um confli to

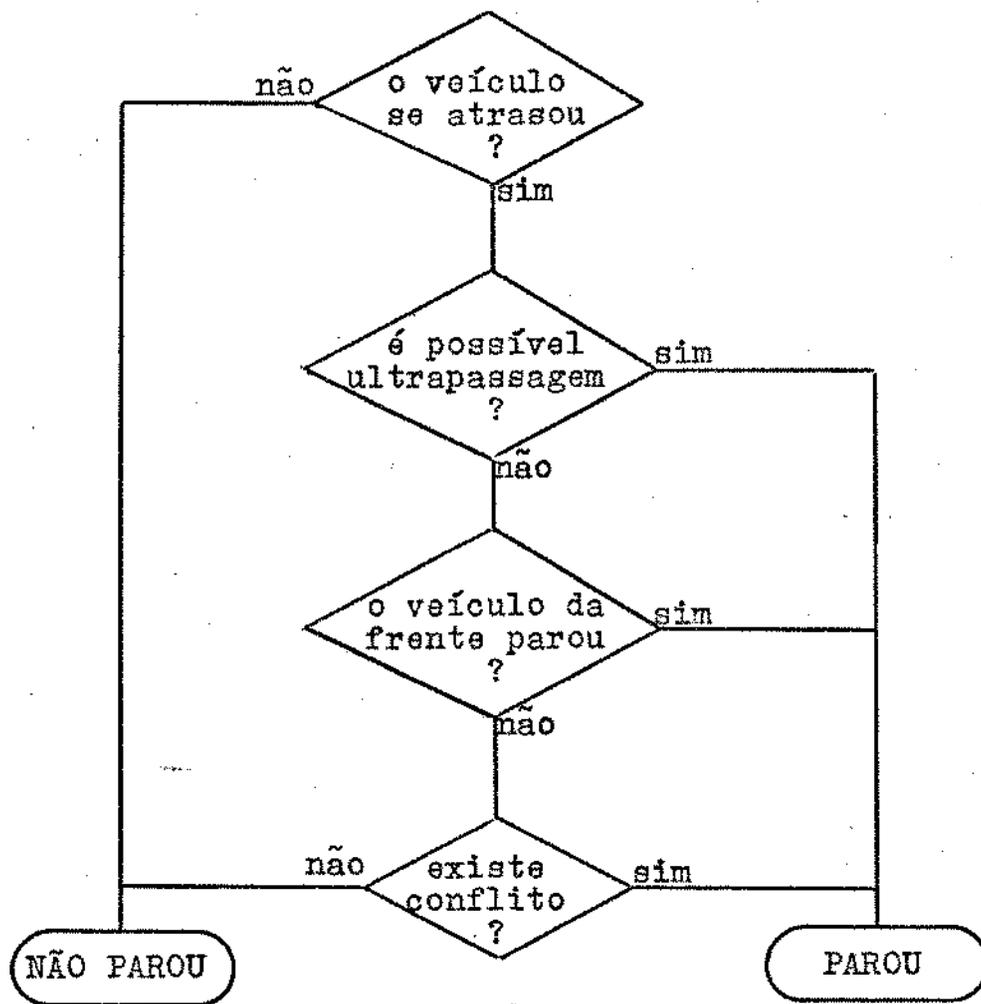


fig. 33

Diagrama de paradas

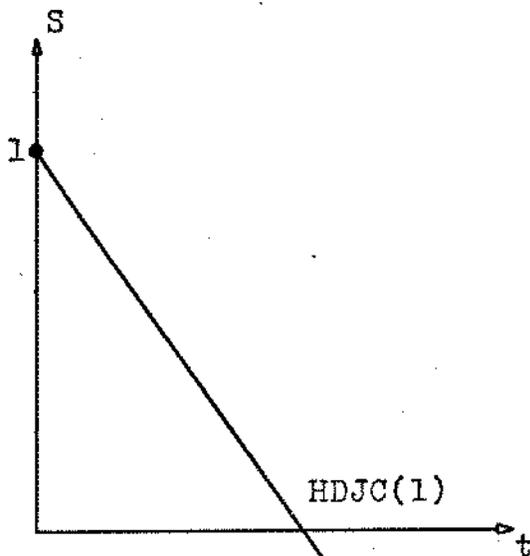
(fig.34b). Portanto, de qualquer maneira, o veículo deve ter parado.

Agora, se êle se atrasou e não é possível ultrapassar, pode ocorrer que o atraso se deva ao veículo da frente. Nesse caso, deve-se perguntar se o veículo da frente parou. Caso tenha parado, o nosso veículo com certeza também parou, seja devi

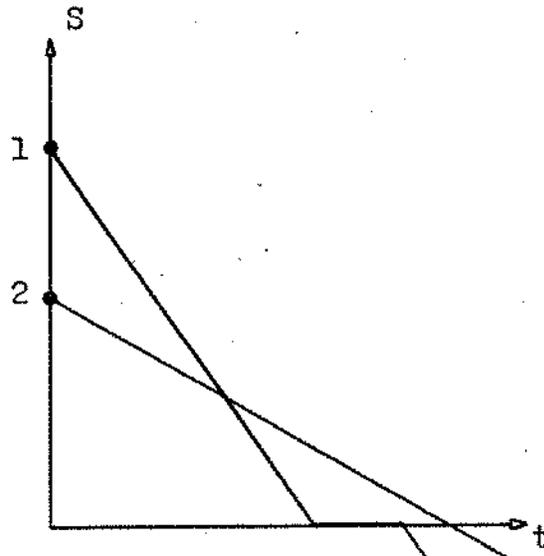
do ao veículo da frente (fig.34c) ou não (fig.34d).

Porém, se o veículo da frente não parou, o nosso veículo pode não ter parado se seu atraso for devido a esse veículo (fig.34e). Mas, se existir conflito à sua saída, ele terá parado (fig.34f).

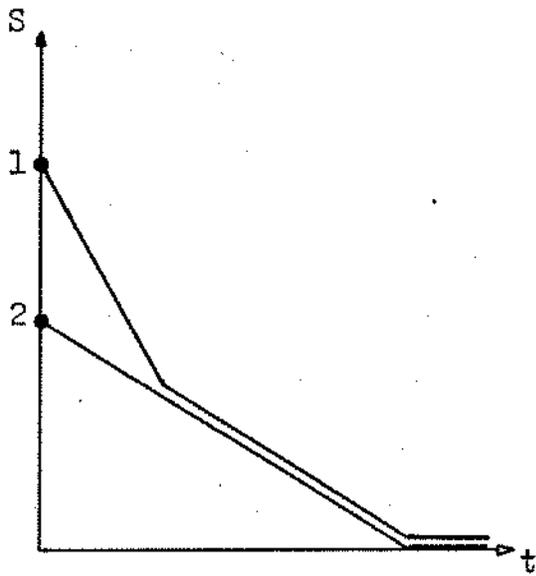
Na figura 34, são representadas as diferentes situações do deslocamento do veículo considerado (veículo 1) e eventualmente do veículo a sua frente (veículo 2).



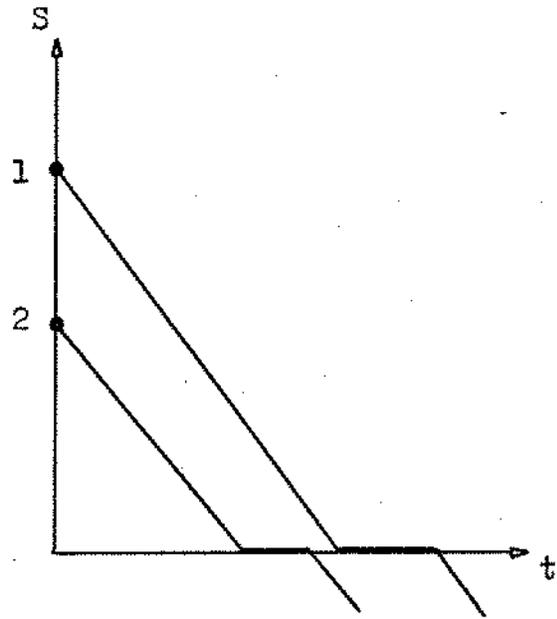
(a)



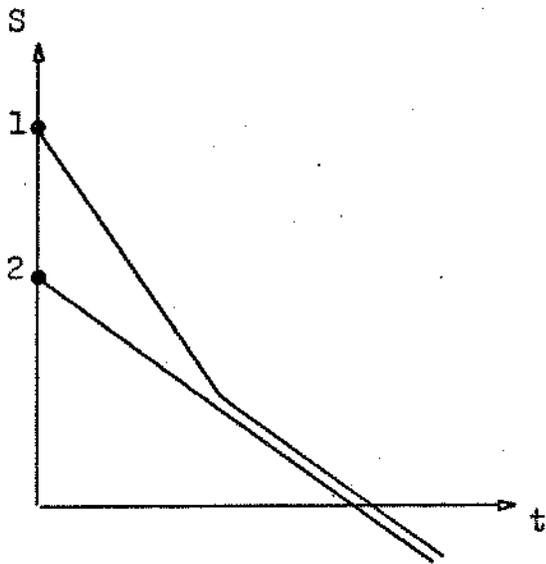
(b)



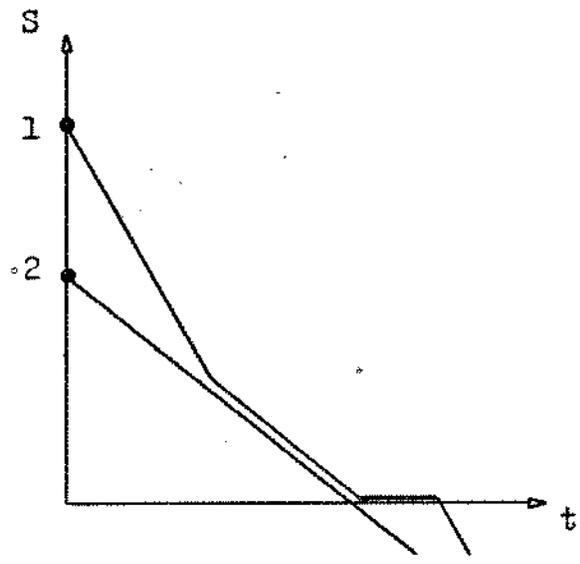
(c)



(d)



(e)



(f)

fig. 34

CAPÍTULO III - O PROGRAMA

### III.I - Diagrama de Blocos Geral

O programa foi desenvolvido em linguagem FORTRAN e de purado nos computadores IBM-1130 (32K de memória) e PDP-10.

O diagrama de blocos geral (fig.35) apresenta a sequência das operações do programa distinguindo-se a entrada dos dados, a seguir a inicialização da rede, em terceiro o "loop" da simulação onde a variável ITRAN representa o tempo de simulação suficiente para atingir o regime de equilíbrio (carregamento da rede) e por fim a saída dos resultados.

A quantidade de memória utilizada pelo programa é uma função das dimensões da rede e do seu grau de ocupação. Assim, o número de palavras gasto é:

$$33.NSM+10.IEM+6.NVM+11.NFMAX+(3+4.K).NCM+4.NMFAS+ITAUM$$

onde:

NSM - número de segmentos da rede

IEM - número de entradas da rede

NVM - número máximo de veículos na rede

NFMAX - número de faixas da rede

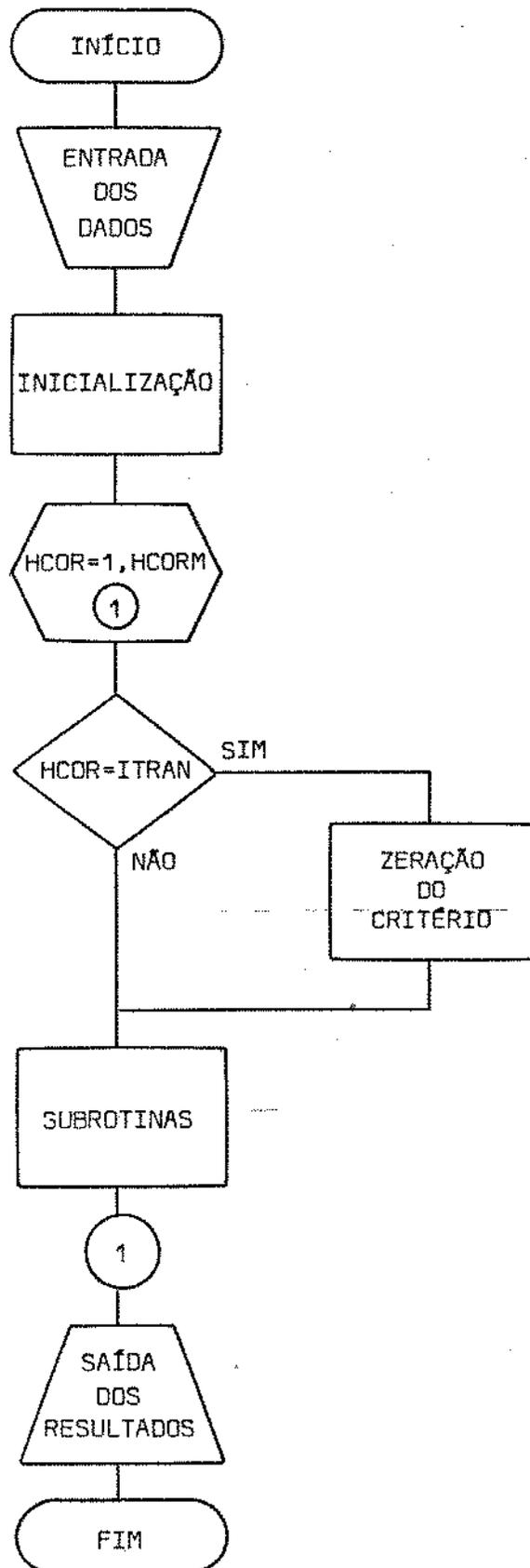
K - número médio de fases por cruzamento

NCM - número de cruzamentos da rede

NMFAS - número de fases da rede

ITAUM - dimensão da tabela auxiliar

Fig. 35 - Diagrama de Blocos Geral



### III.2 - Diagramas de Blocos das Subrotinas

A simulação da rede consiste num "loop" onde cada passada corresponde a um segundo de tempo real (fig.36). A sequência de operações executadas a cada vez é constituída por um bloco de subrotinas, onde a primeira (SUBROTINA ENTI) executa todas as injeções de veículos nas entradas naquele instante, a segunda (SUBROTINA TRANS) realiza as transferências de veículos de segmentos para segmentos ou para fora da rede e a terceira (SUBROTINA FASE) muda o estado das fases que por ventura devem mudar naquele instante.

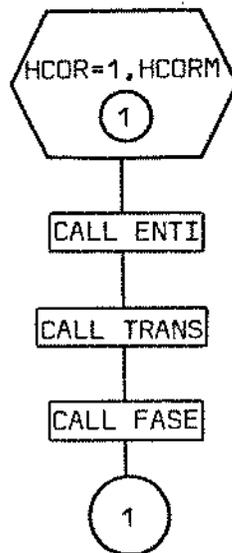


fig. 36

ceira (SUBROTINA FASE) muda o estado das fases que por ventura devem mudar naquele instante.

Existe ainda uma quarta subrotina (SUBROTINA EMPI) que

é chamada pelas duas primeiras e que empilha os veículos nos segmentos.

### III.2.1 - Subrotina ENTI

A subrotina ENTI é a responsável pelas injeções de veículos na rede. Na figura 37, temos um diagrama de Blocos - condensado das operações da subrotina e na fig. 38 um diagrama detalhado.

Dentro de um "loop" de entradas (IE) a subrotina inicialmente analisa se é ou não hora de injetar veículo e, caso não seja, passa a outra entrada. Porém, se for hora de entrar um veículo, a subrotina primeiramente calculará a hora da próxima injeção naquela entrada (IHEN(IE)). Esse cálculo é função do tipo de lei de entrada que se desejar. No nosso caso utilizamos uma lei de distribuição poissoniana para os intervalos de entrada (fig.38).

Em seguida, passa-se a caracterização do veículo injetado através da sua numeração. O veículo receberá um número (NING) da sequência normal de numeração a menos que a tabela auxiliar (ITAU) não esteja vazia (II.5), pois nesse caso existe pelo menos um número, já utilizado e agora disponível, para a numeração desse novo veículo. Caso a numeração normal atinja o número máximo de veículos na rede (NVM) a simulação será

interrompida.

Numerado o veículo, a subrotina calcula um coeficiente de velocidade (CVEL) . Para facilidade de utilização o CVEL , que deveria variar entre -2.46 e 2.46 (II.4.2), é integralizado, variando de -100 a 100.

Finalmente o veículo é empilhado no segmento correspondente a sua entrada (SEGM(IE)).

fig. 37 - Diagrama de Blocos condensado : SUB. ENTI

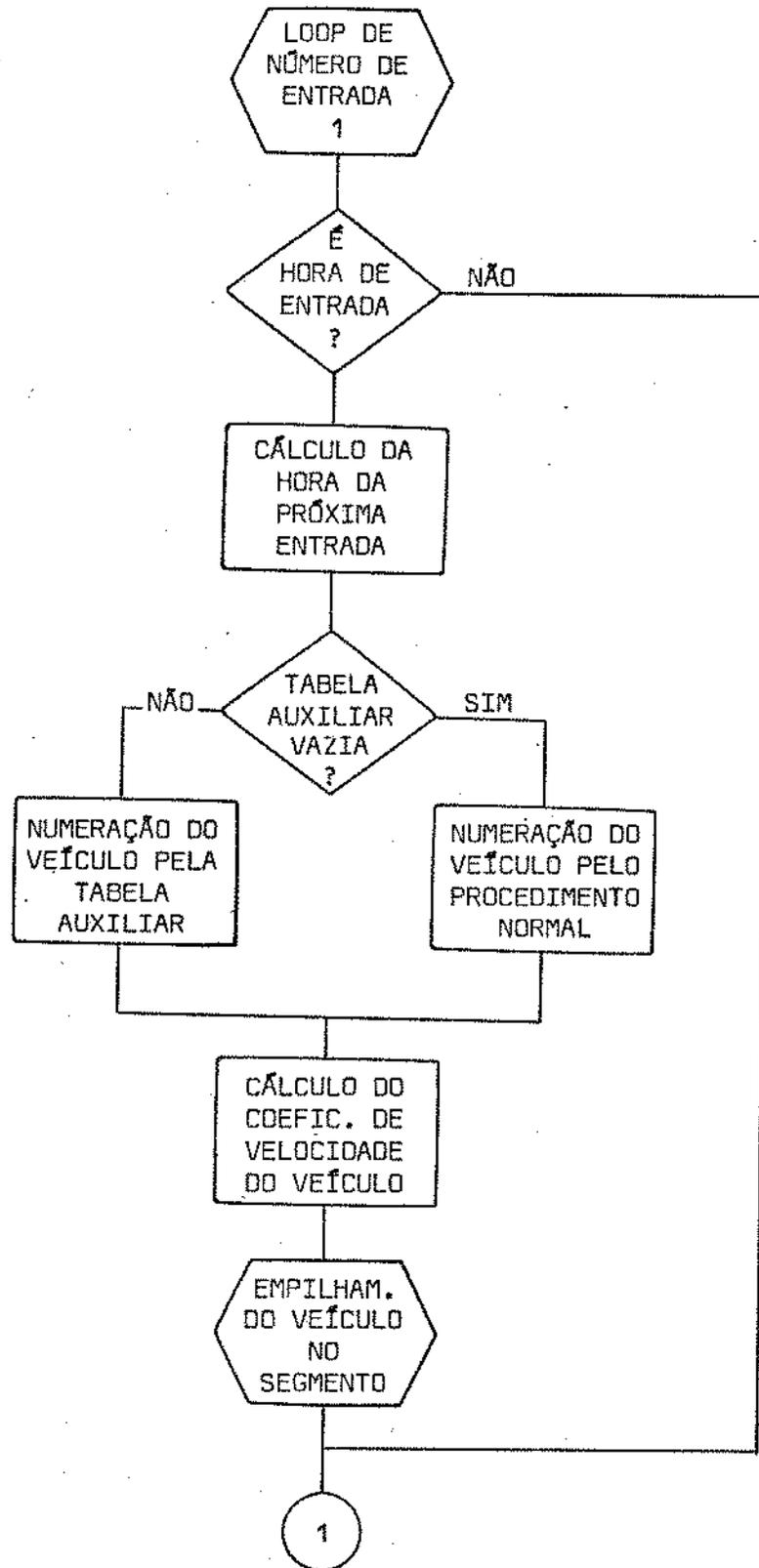
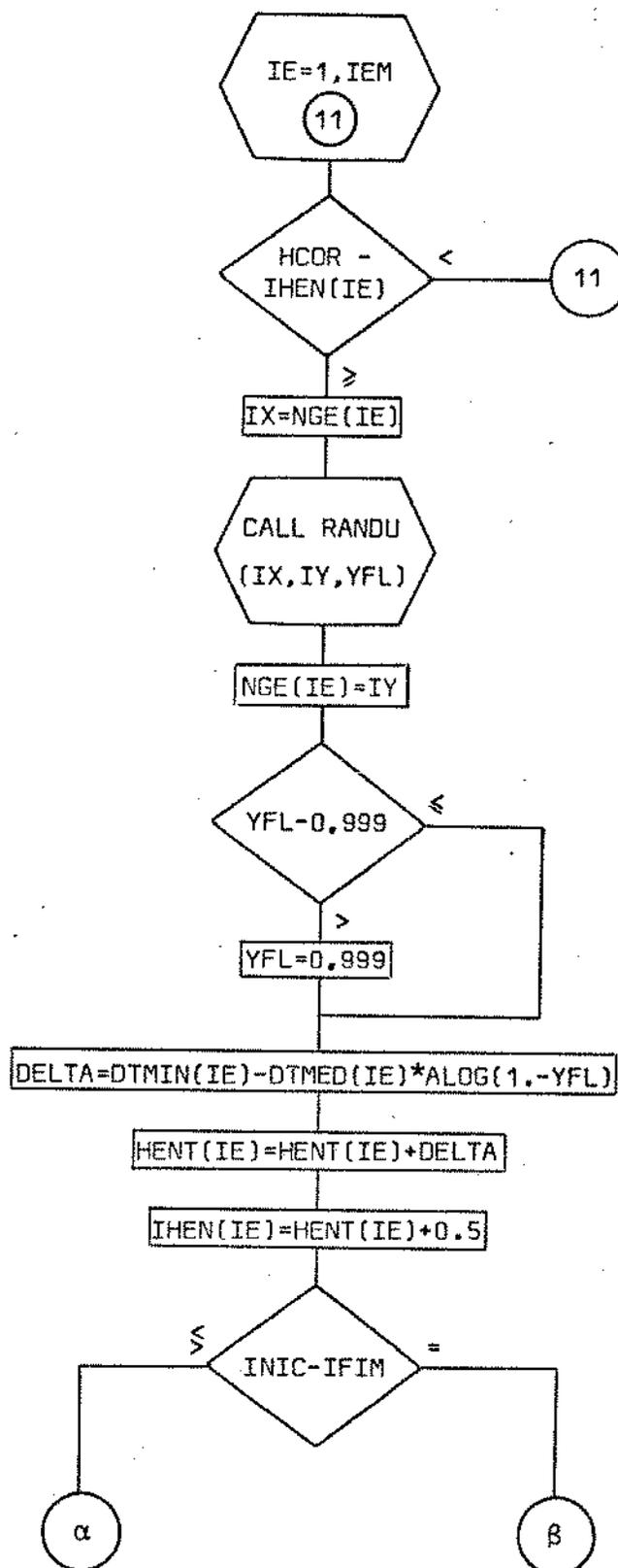
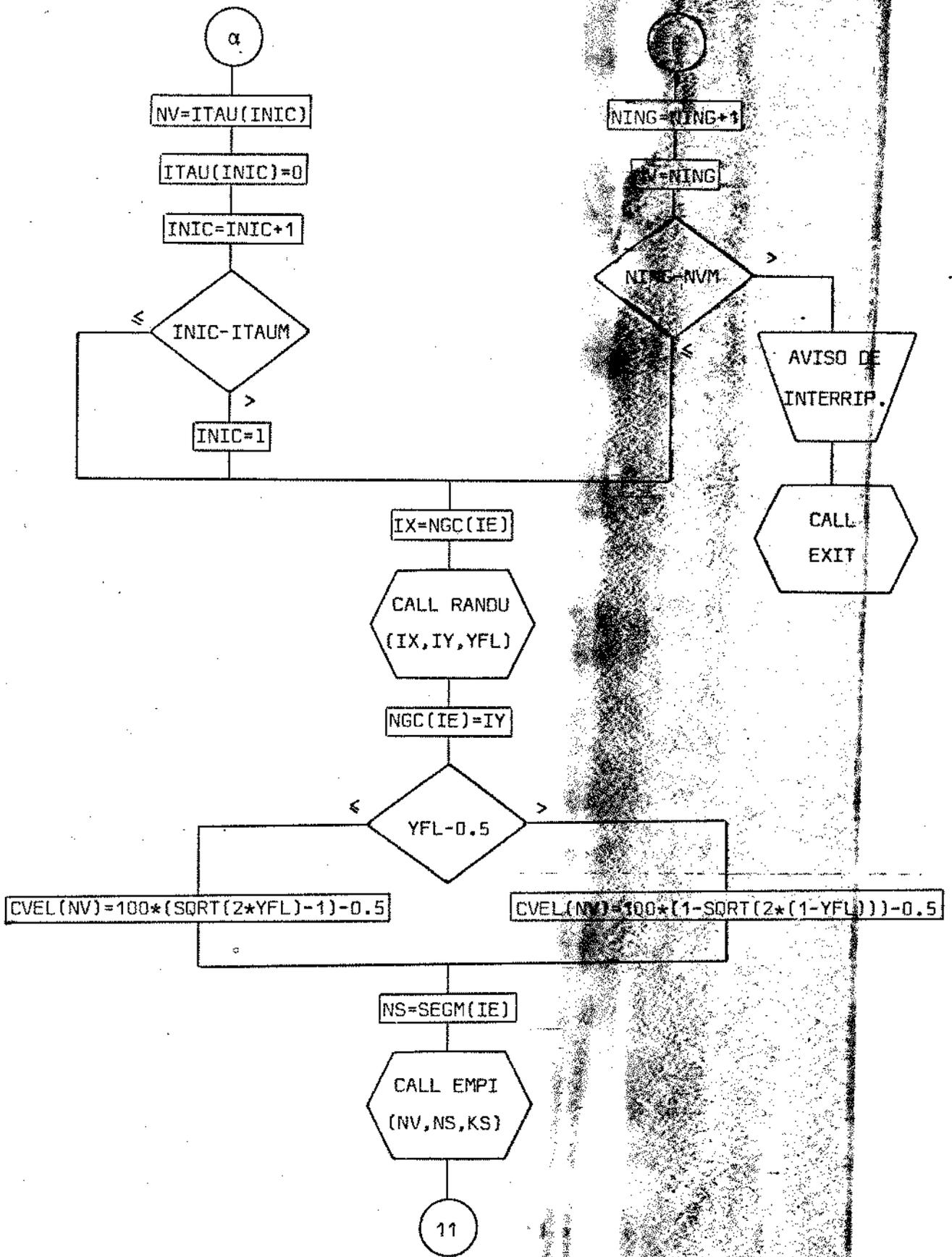


fig. 38 - Diagrama de Blocos Detalhado : SUB. ENTI





### III.2.2 - Subrotina TRANS

A subrotina TRANS é responsável pelas transferências de veículos de segmentos para outros segmentos ou para fora da rede. As figuras 39 e 40 mostram os diagramas de blocos condensado e detalhado, respectivamente.

A subrotina consiste num "loop" de segmentos (NS) onde, para cada segmento é analisada a possibilidade ou não de transferência. Inicia-se verificando o estado (IEST) da fase que controla o segmento (IFAS(NS)). Se for vermelho não é possível transferências passando-se então para o segmento seguinte. Caso seja verde entra-se num novo "loop", agora de faixas, onde para cada faixa (NF) é testado se existe veículo (IS) e se é possível a sua saída (IHPSV(NF)). Caso não exista ou não seja possível, passa-se a outra faixa.

Se existir um veículo na eminência de sair é necessário analisar a possibilidade de um conflito. Para tanto, com a sua direção (IDIR) e com o tipo de cruzamento onde o segmento chega (ITC) determina-se os segmentos que lhe são potencialmente conflitantes (LV). Determinando-se o seu intervalo aceitável (YY) em função do seu tempo de espera, passa-se a procurar em cada faixa (NUF) de cada um dos segmentos que lhe podem causar conflito (NUS) um veículo cuja hora possível de saída seja menor que a hora corrente mais o intervalo aceitável. Caso não ha

ja nenhum veículo nessas condições, passamos a transferência de fato.

No entanto, se for detetado um conflito com uma certa faixa (NUF) será necessário testar a possibilidade de um impasse. Caso exista o impasse ele deverá ser solucionado liberando-se (transferindo-se) o veículo de maior coeficiente de velocidade (CVEL). Caso não exista impasse o veículo esperará uma nova oportunidade de se transferir e o programa passará a analisar uma nova faixa do mesmo segmento ou um novo segmento.

A transferência propriamente dita ocorrerá, então, no caso de não haver conflito ou no caso do conflito redundar em impasse. Conhecida a direção desejada pelo veículo (IDIR) e o seu segmento de origem (NS) é conhecido o seu futuro segmento (ISEG). Nestas condições cabe saber se a transferência será interna (segmento para segmento) ou não (segmento para fora), e isto é obtido através do número do segmento de destino (J = 0 transferência interna).

Caso o veículo venha a sair da rede, basta guardar seu número na tabela auxiliar (ITAU). Se, por outro lado, sua transferência é interna basta chamar a subrotina EMPI.

Empilhado o veículo em novo segmento, resta agora computar a sua contribuição para o critério do segmento de origem anotando seu atraso em ATRAS, sua possível parada em NUPAR e sua passagem em NUFAS. O número de veículos na faixa diminui da unidade (NVP) e o novo primeiro veículo na faixa será o seu su

cessor (NVAT).

Finalmente é calculada a próxima hora possível de saída de veículo nesta faixa (IHFSV(NF)) que é dada pela hora desejada de chegada do primeiro veículo na faixa (IHDJC), limitado inferiormente pelo intervalo de escoamento de fila.

Nestas condições, repetem-se as operações até terminarem todas as faixas de todos os segmentos.

fig. 39 - Diagrama de Blocos Condensado: SUB. TRANS

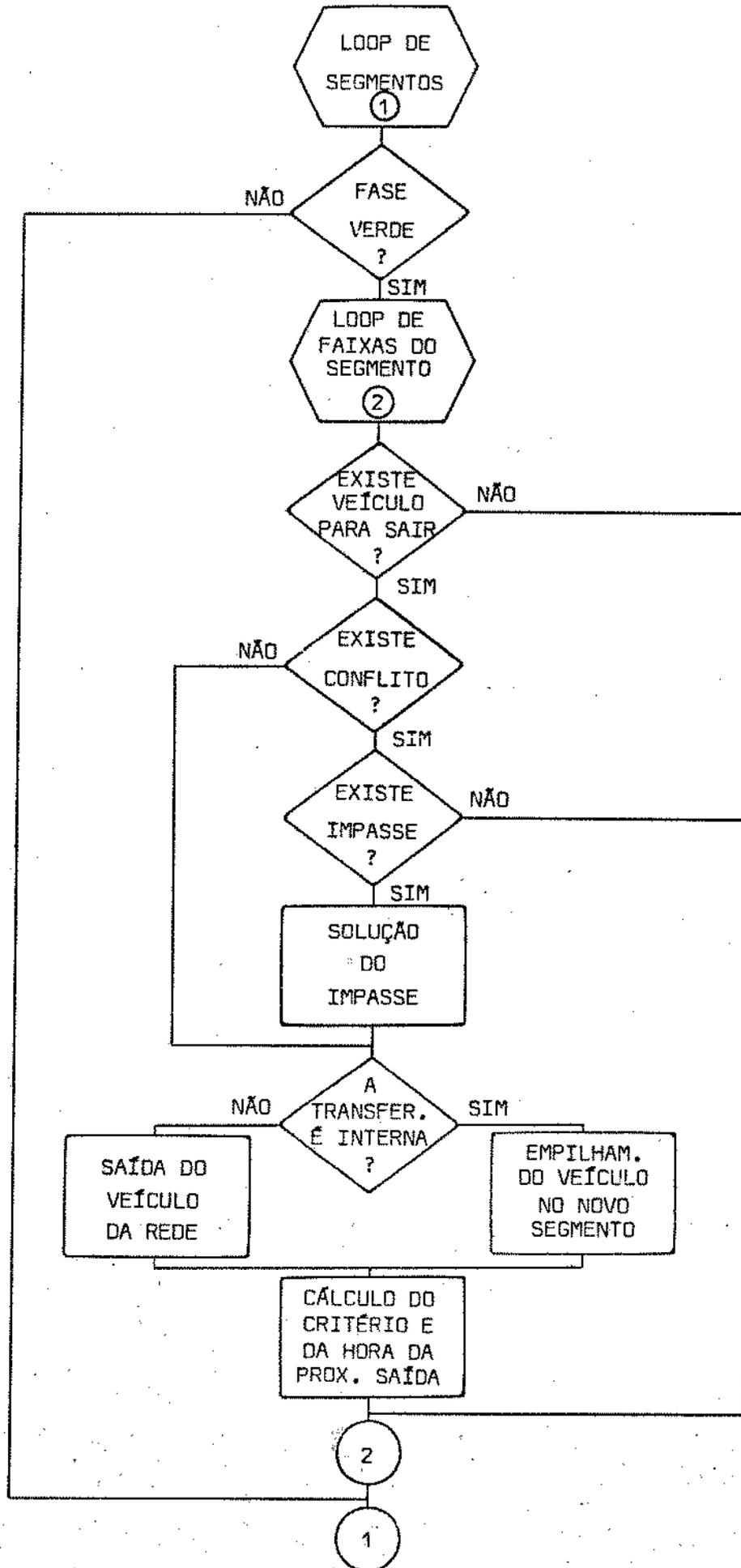
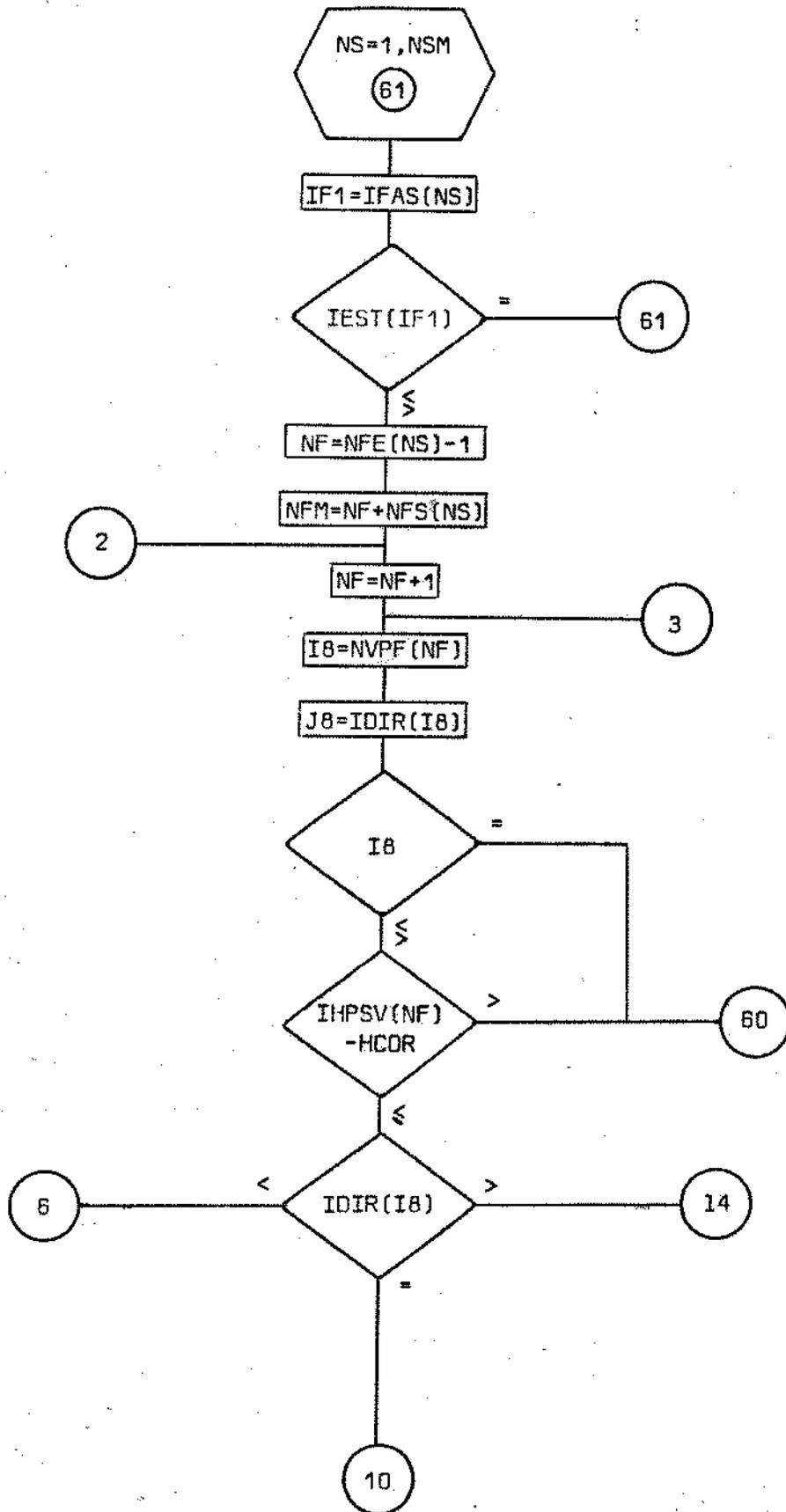
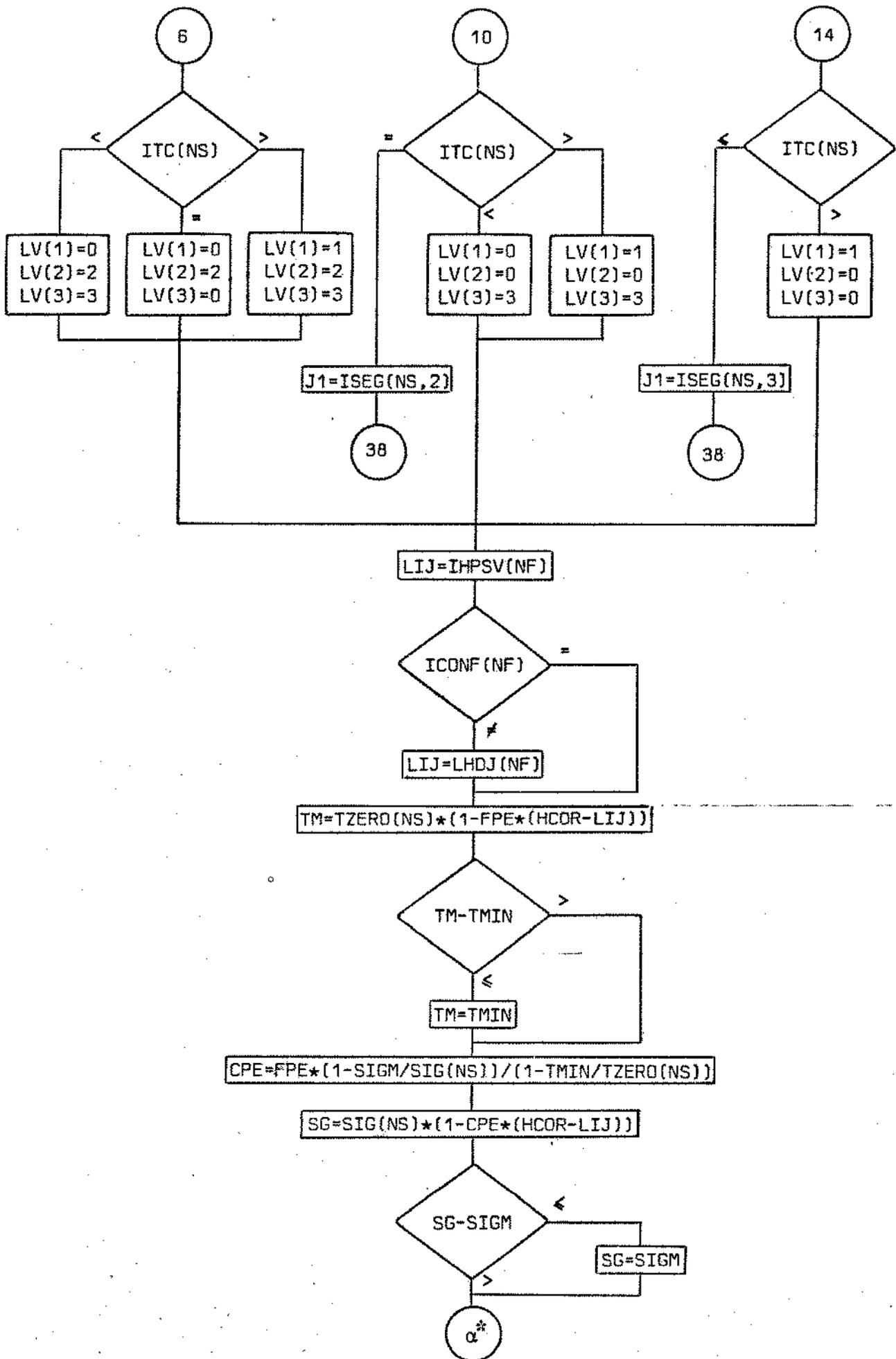
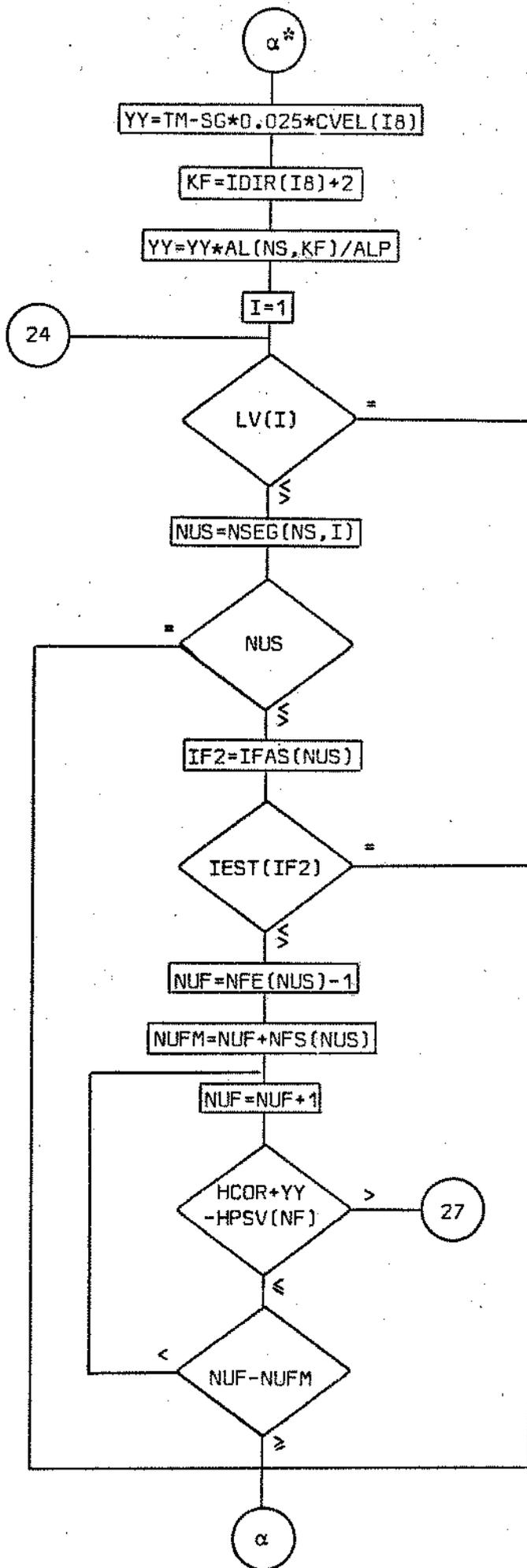
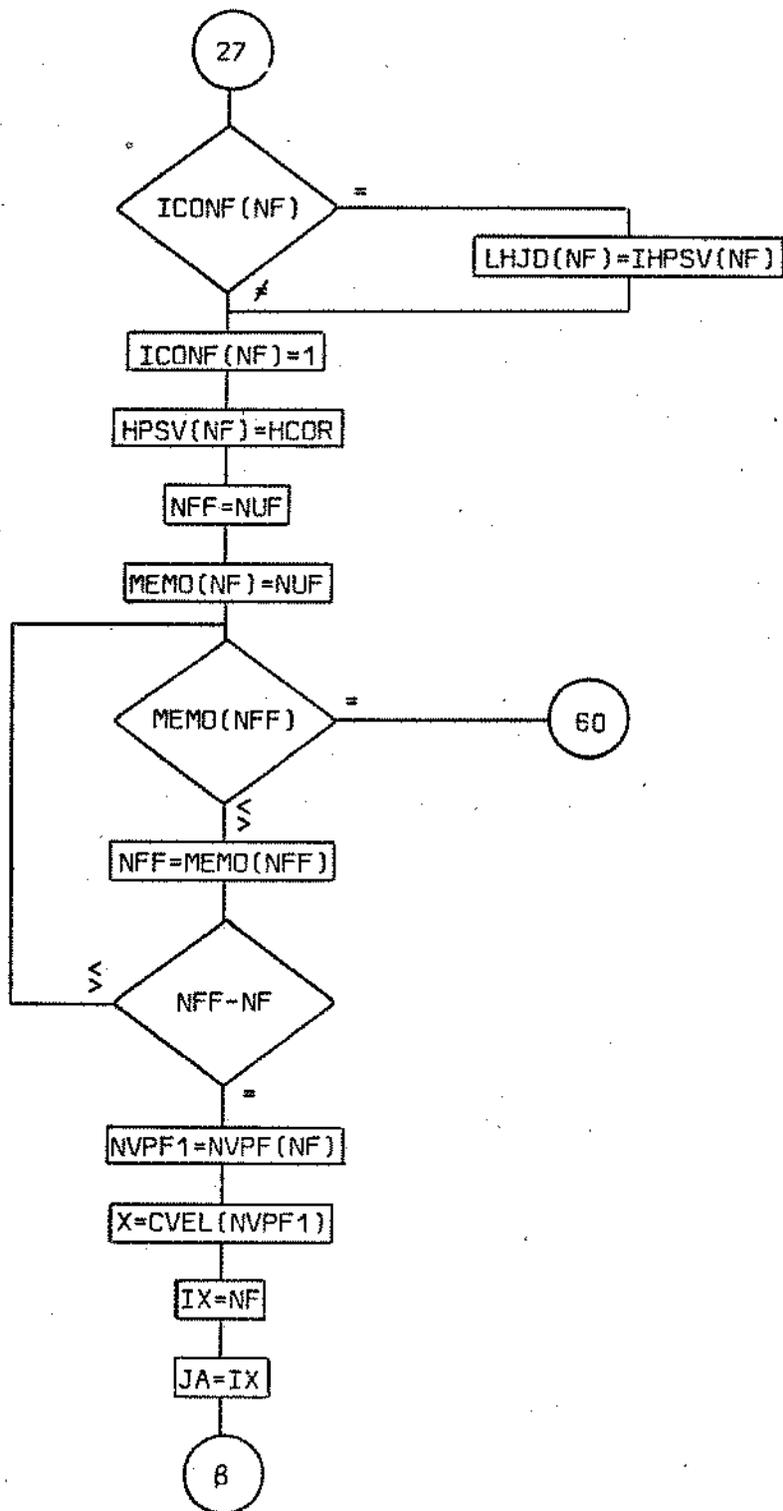
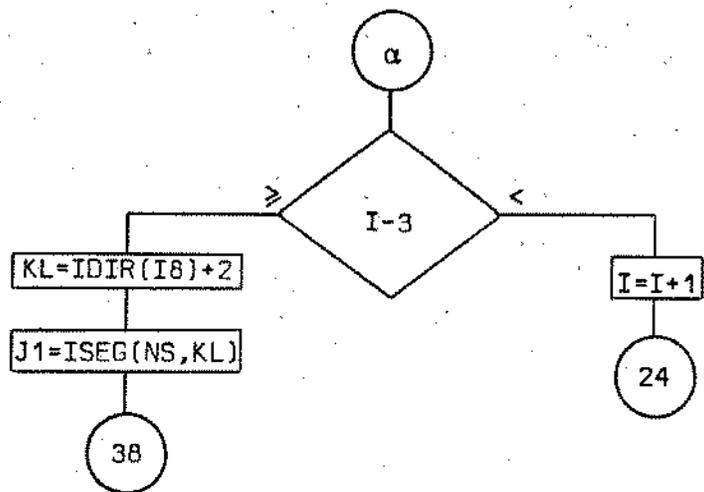


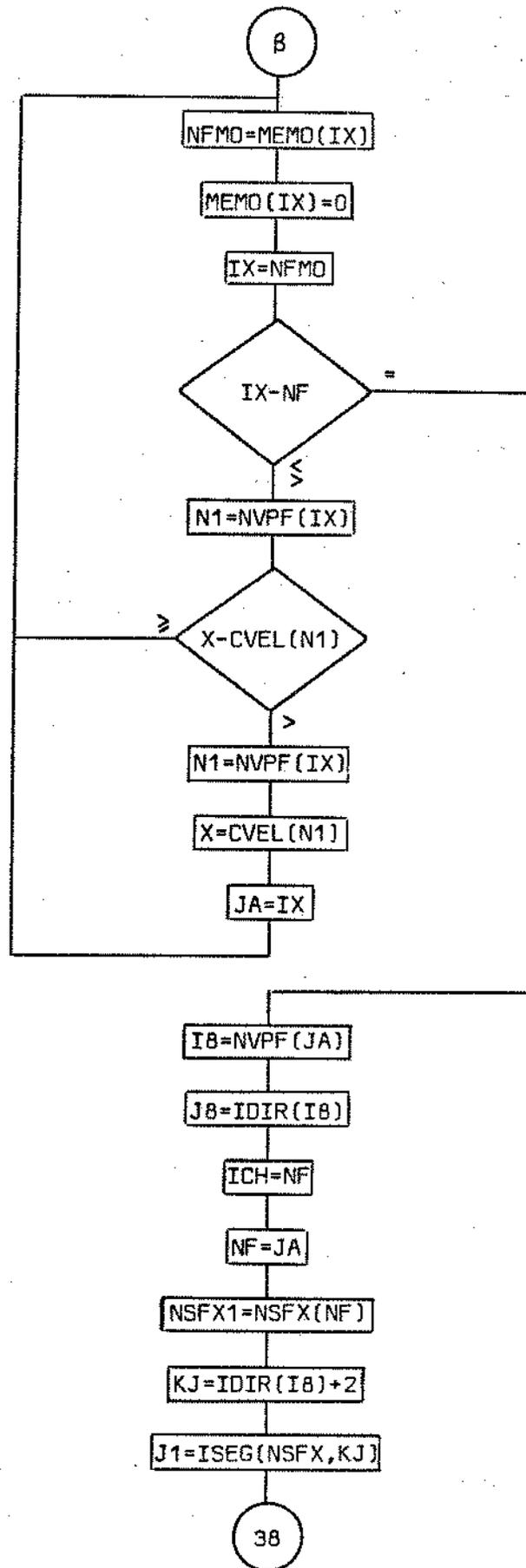
fig. 40 - Diagrama de Blocos Detalhado: SUB. TRANS

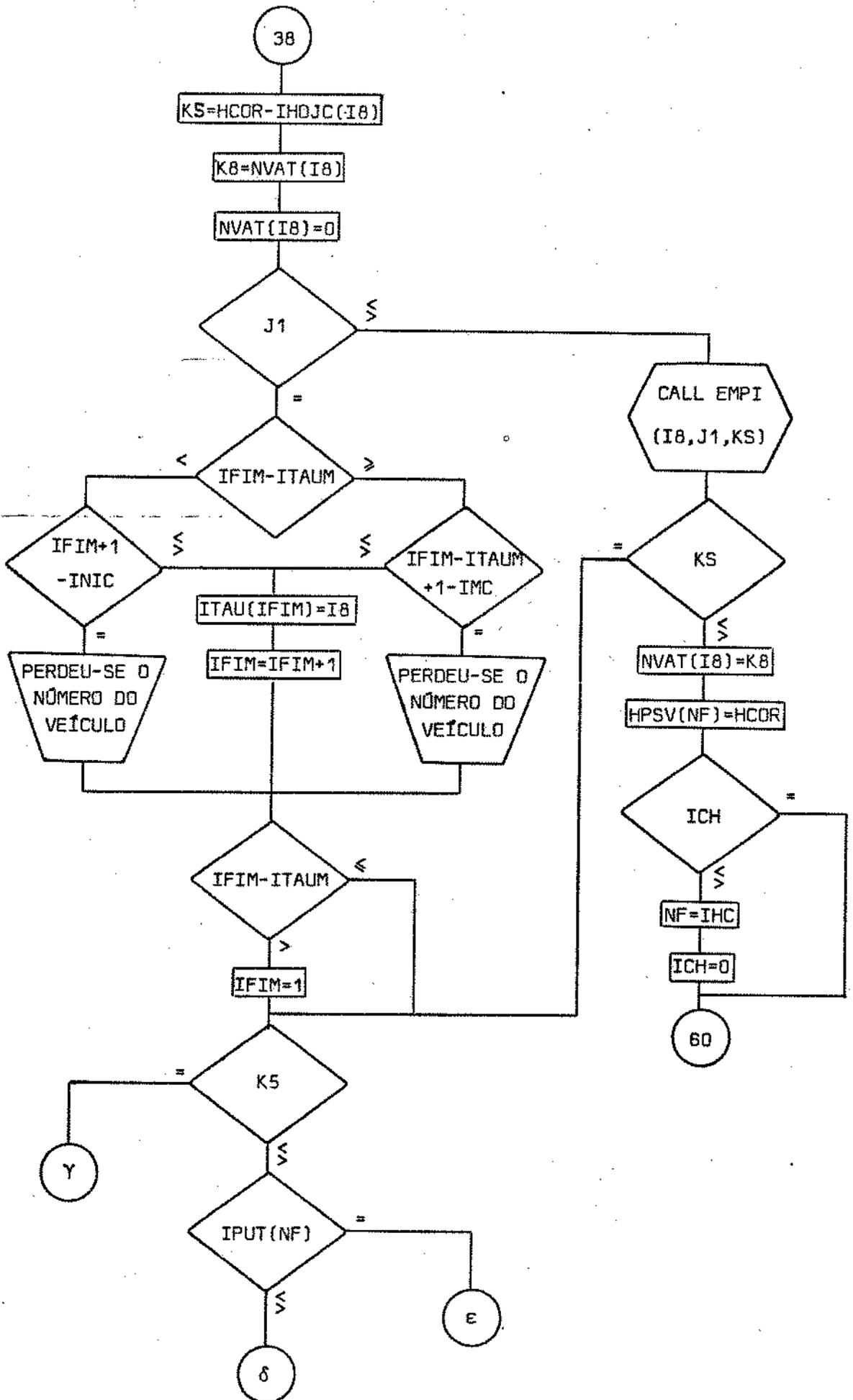




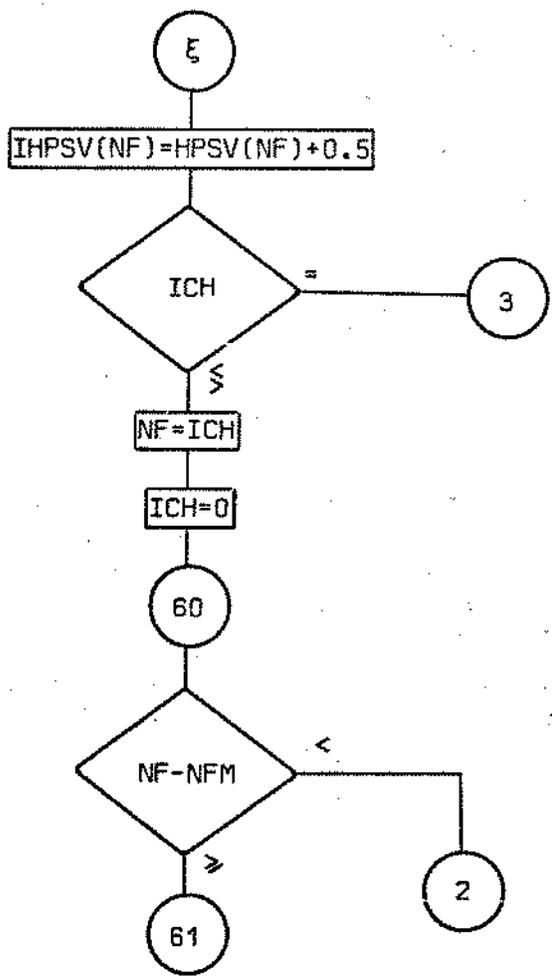












### III.2.3 - Subrotina FASE

A subrotina FASE tem por finalidade controlar o funcionamento dos cruzamentos. Seus diagramas de Blocos se encontram nas figuras 41 e 42.

Dentro de um "loop" de cruzamentos (NC), a subrotina verifica inicialmente se é ou não hora de modificar alguma fase (IHPMF(NC)). Se não for, passa-se ao cruzamento seguinte.

Se, no entanto, é hora de modificar uma fase no cruzamento NC, o primeiro passo consiste em calcular a hora da próxima modificação. Isso é feito conhecendo-se o índice (IND) da tabela das sequencias do cruzamento (II.6) e portanto a duração (DUR) da presente modificação.

Em seguida, conhecendo-se a fase que deve mudar (NFASE), também pela tabela das sequencias, verifica-se qual o seu estado (verde ou vermelho).

Caso o estado da fase seja verde executa-se a sua mudança e passa-se ao cruzamento seguinte. Se a fase estiver vermelha além de mudar seu estado é necessário, para cada faixa de todos os segmentos que dependem da fase modificada, inicializar a chave MMK que controla se o veículo da frente parou. Evidentemente, se o sinal "abriu" para todas essas faixas, é preciso simular que os veículos da frente pararam, para que se calcule convenientemente o número de paradas (ver III.2.2 fig.40). Além

disso, como o sinal abriu é necessário calcular a hora da próxima saída de veículo em cada uma dessas faixas sendo que o seu valor mínimo será igual a hora corrente (HCOR) mais o atraso de saída (ATRAS) (ver II.3.2.3)

fig. 41 - Diagrama de Blocos Condensado: SUB. FASE

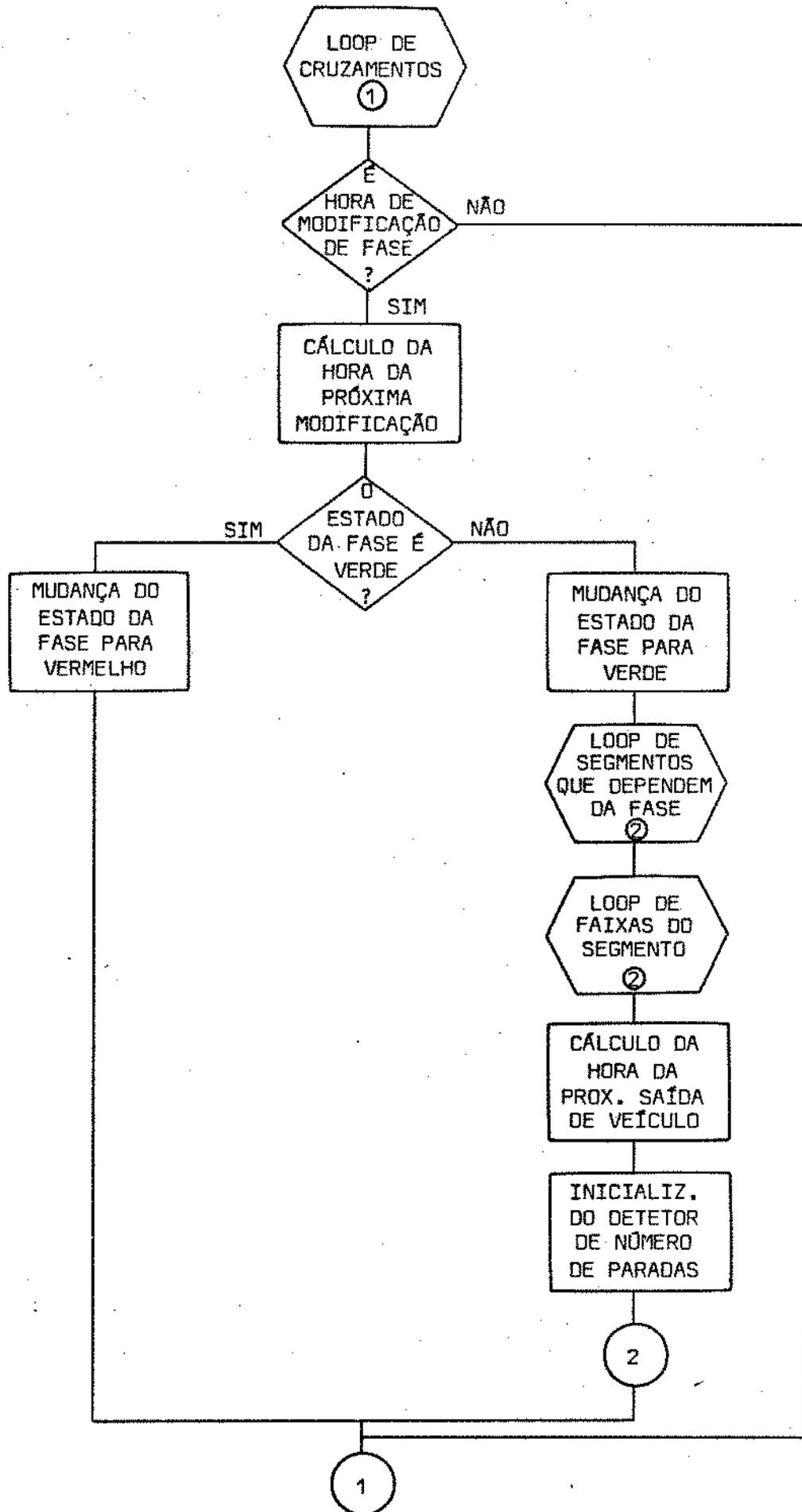
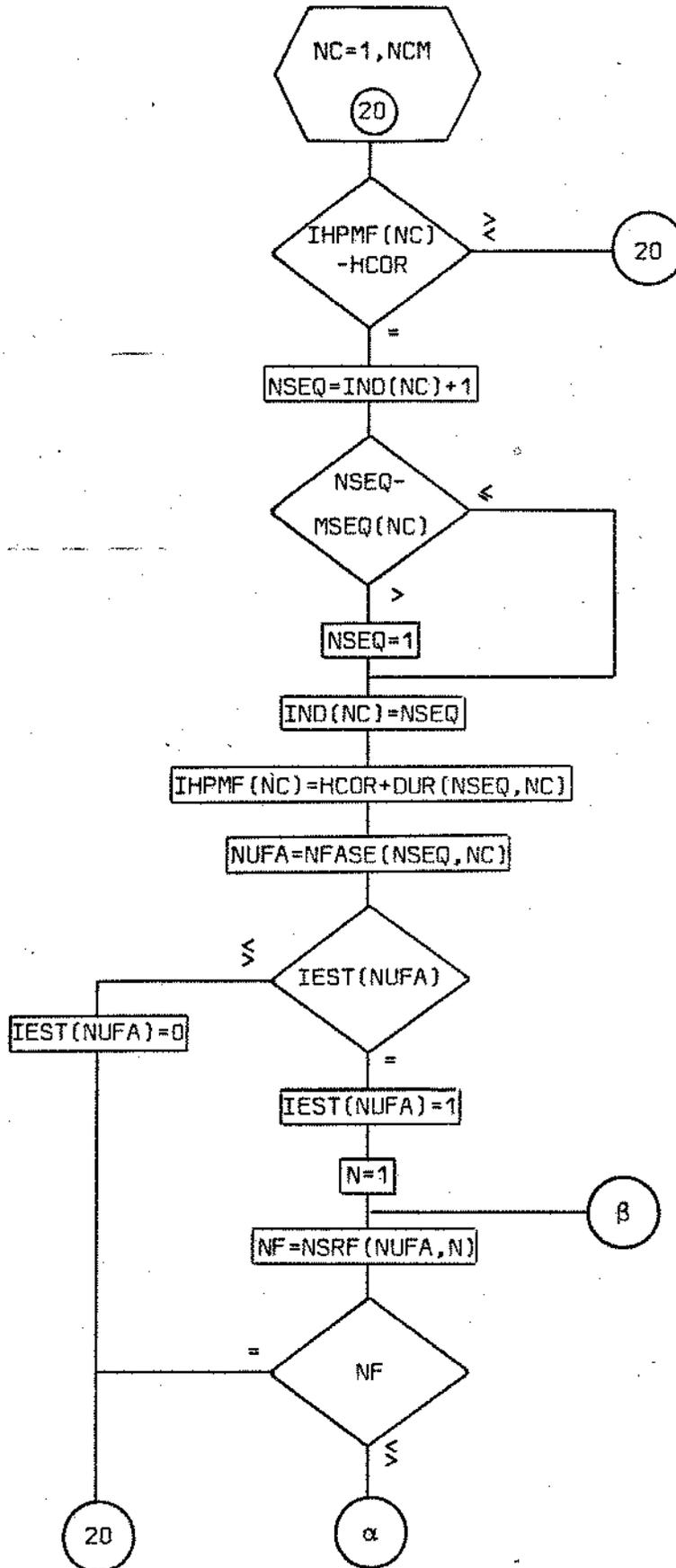
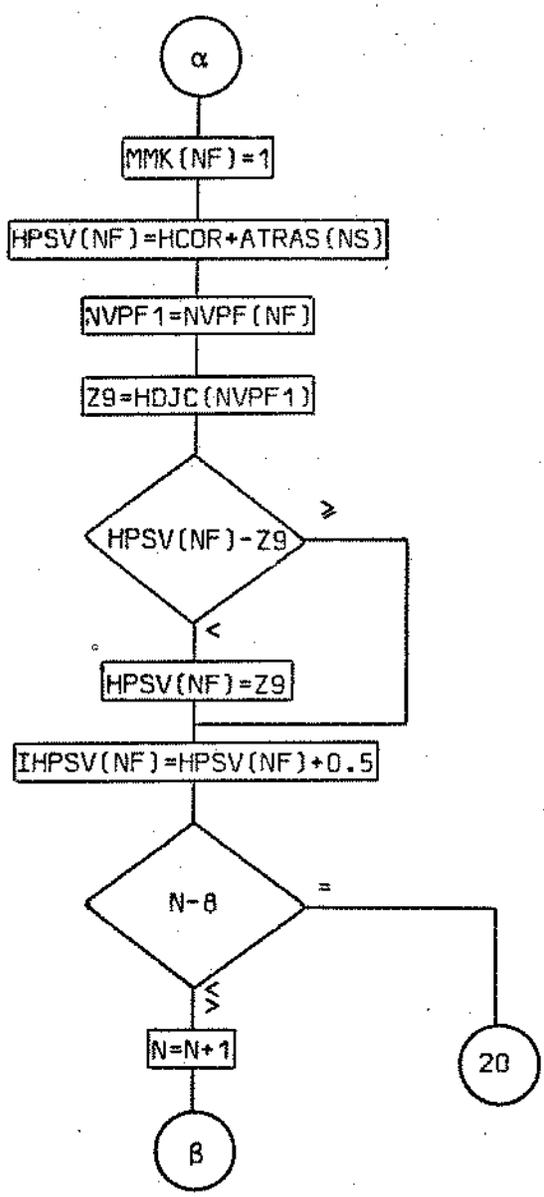


fig. 42 - Diagrama de Blocos Detalhado: SUB. FASE





### III.2.4 - Subrotina EMPI

A subrotina EMPI é responsável pelo empilhamento dos veículos nos segmentos. Ela é usada tanto nas entradas da rede (EMPI) quanto nas transferências internas (TRANS). Nas figuras 43 e 44 temos os diagramas condensado e detalhado da subrotina.

Dados o número do veículo (NV) e do segmento, a subrotina EMPI trata de colocar (empilhar) o veículo na sua posição correta. O primeiro passo é determinar a direção (IDIR) que o veículo vai tomar no fim do segmento. Com esse dado mais o tipo de faixas do segmento (ITFS) é possível escolher a faixa que o veículo utilizará (NF). O critério de escolha é o menor número de veículos na faixa (NVF). Se por acaso a faixa escolhida estiver completa e existir outra faixa alternativa, é tentado o empilhamento nessa outra faixa. Não sendo possível empilhar em nenhuma faixa a chave KS o indicará.

Tendo escolhido a sua faixa o veículo será nela empilhado, calculando-se a sua hora desejada de chegada (HDJC) em função de seu coeficiente de velocidade (CVEL) e dos parâmetros do segmento (VELS, DPVS).

Finalmente, de acordo com a "pilha" existente e a possibilidade de ultrapassagem (IPUT), o veículo será colocado na posição que lhe couber, levando-se em conta as horas desejadas de chegadas dos diversos veículos.

fig. 43 - Diagrama de Blocos Condensado: SUB. EMPI

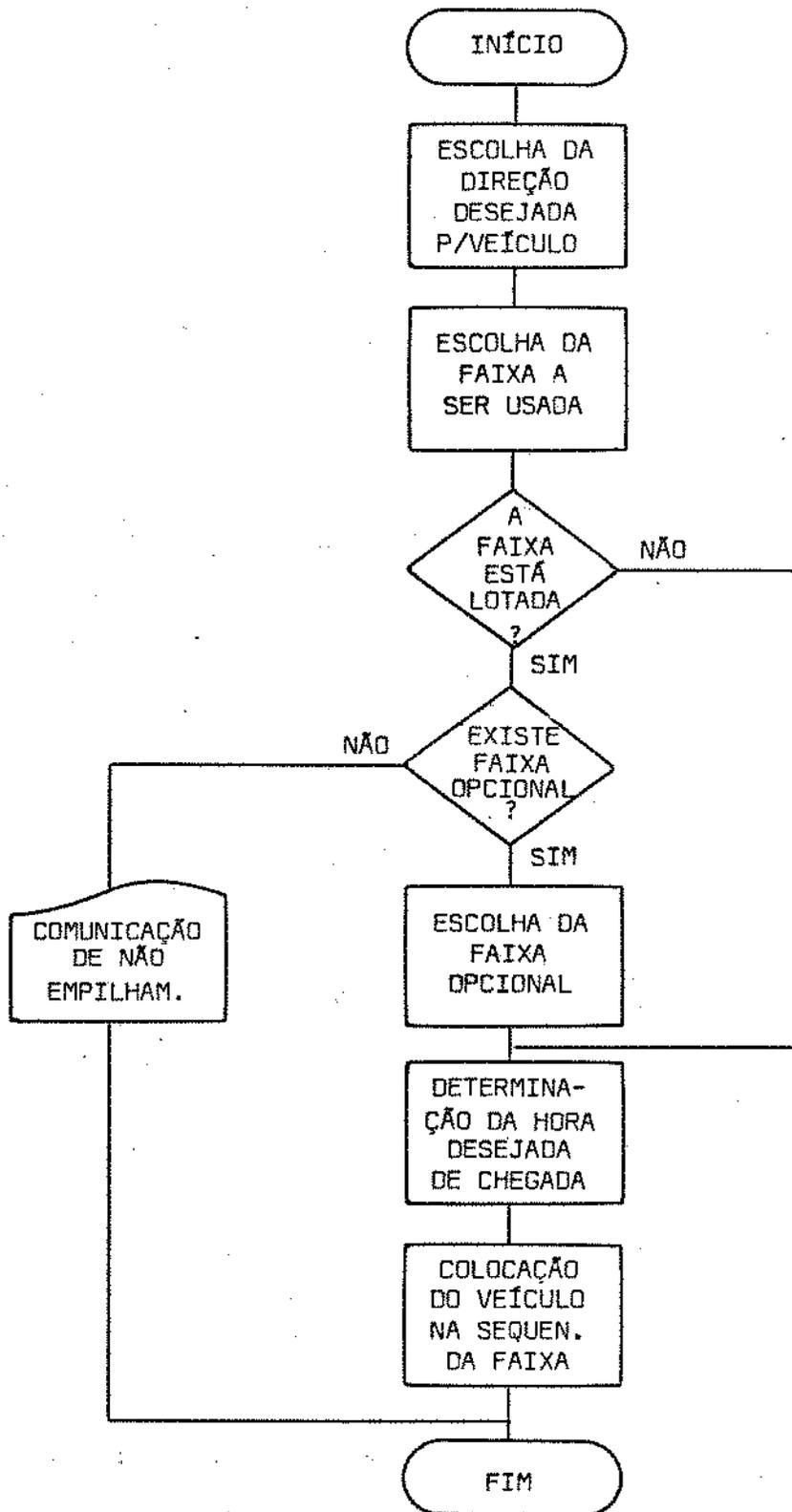
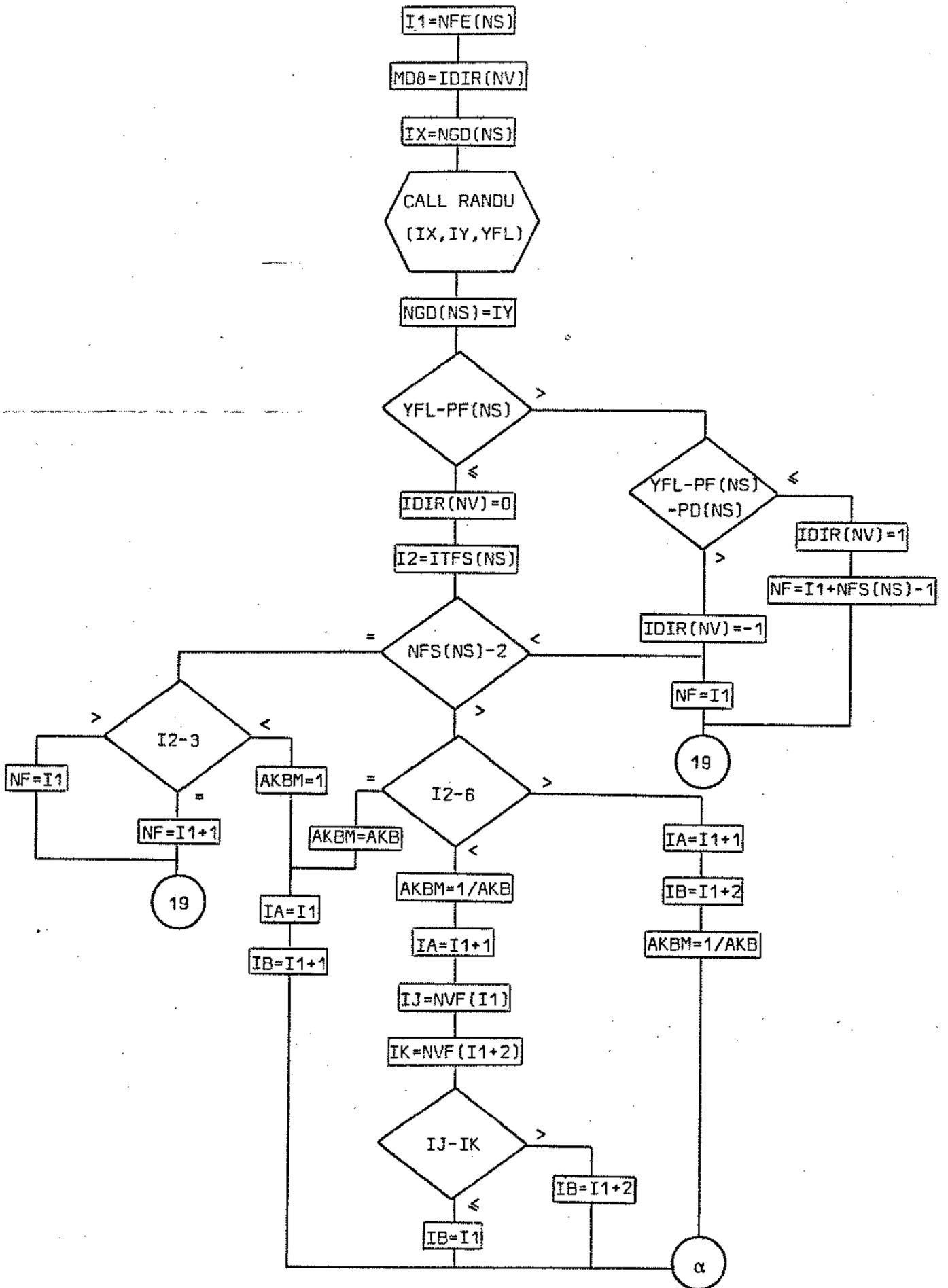
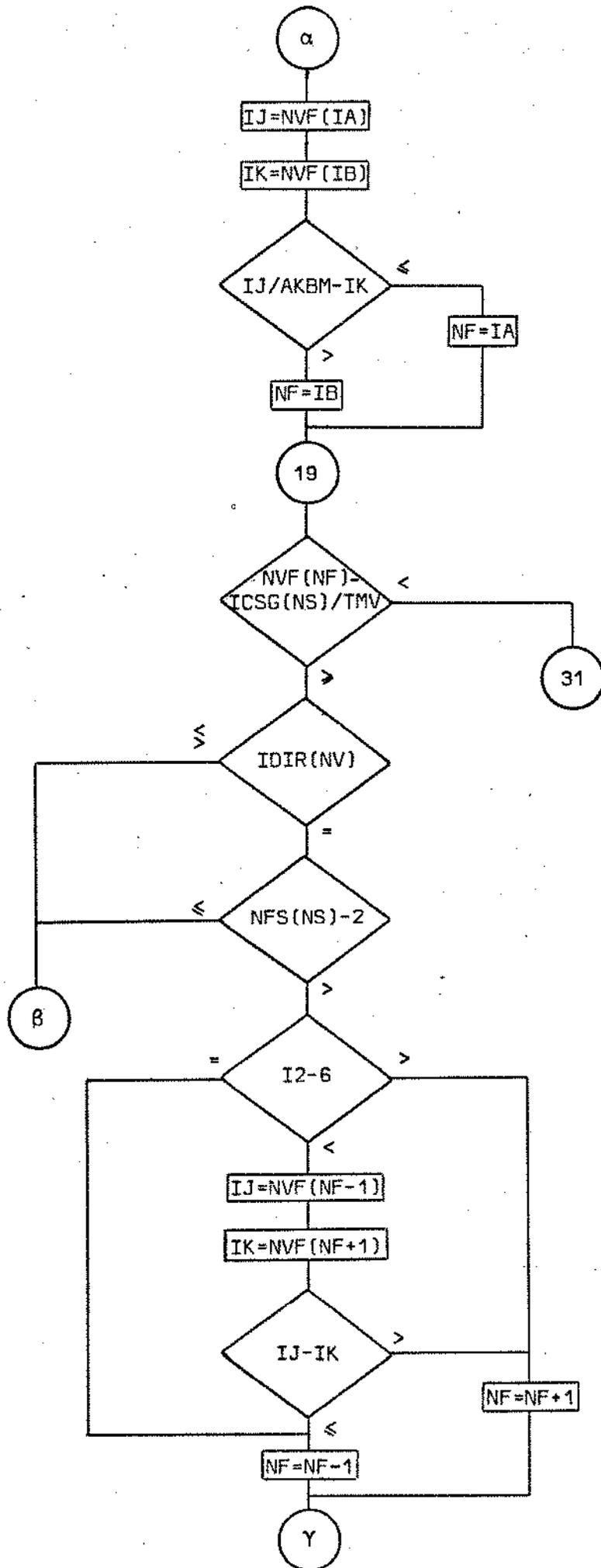
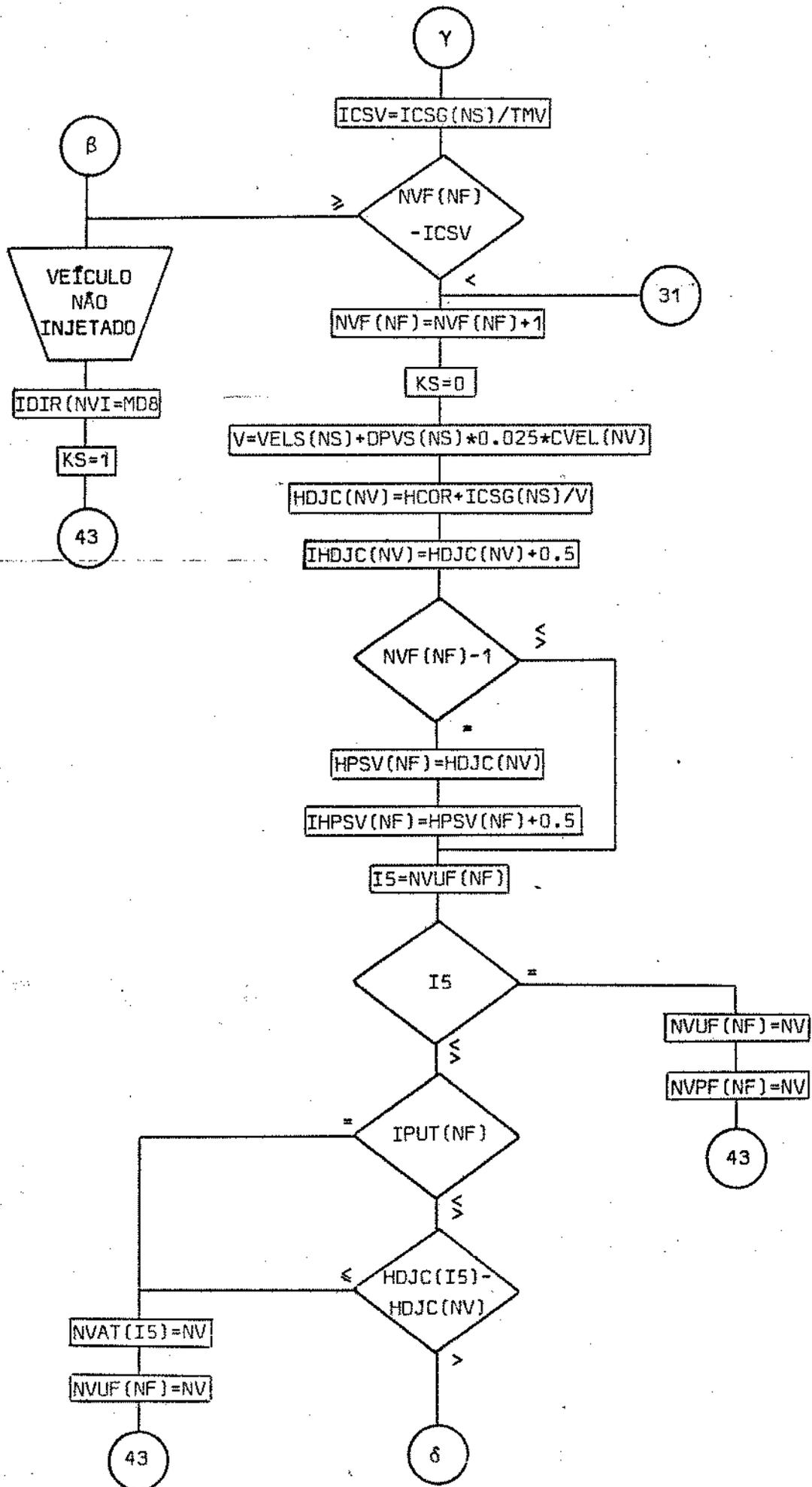
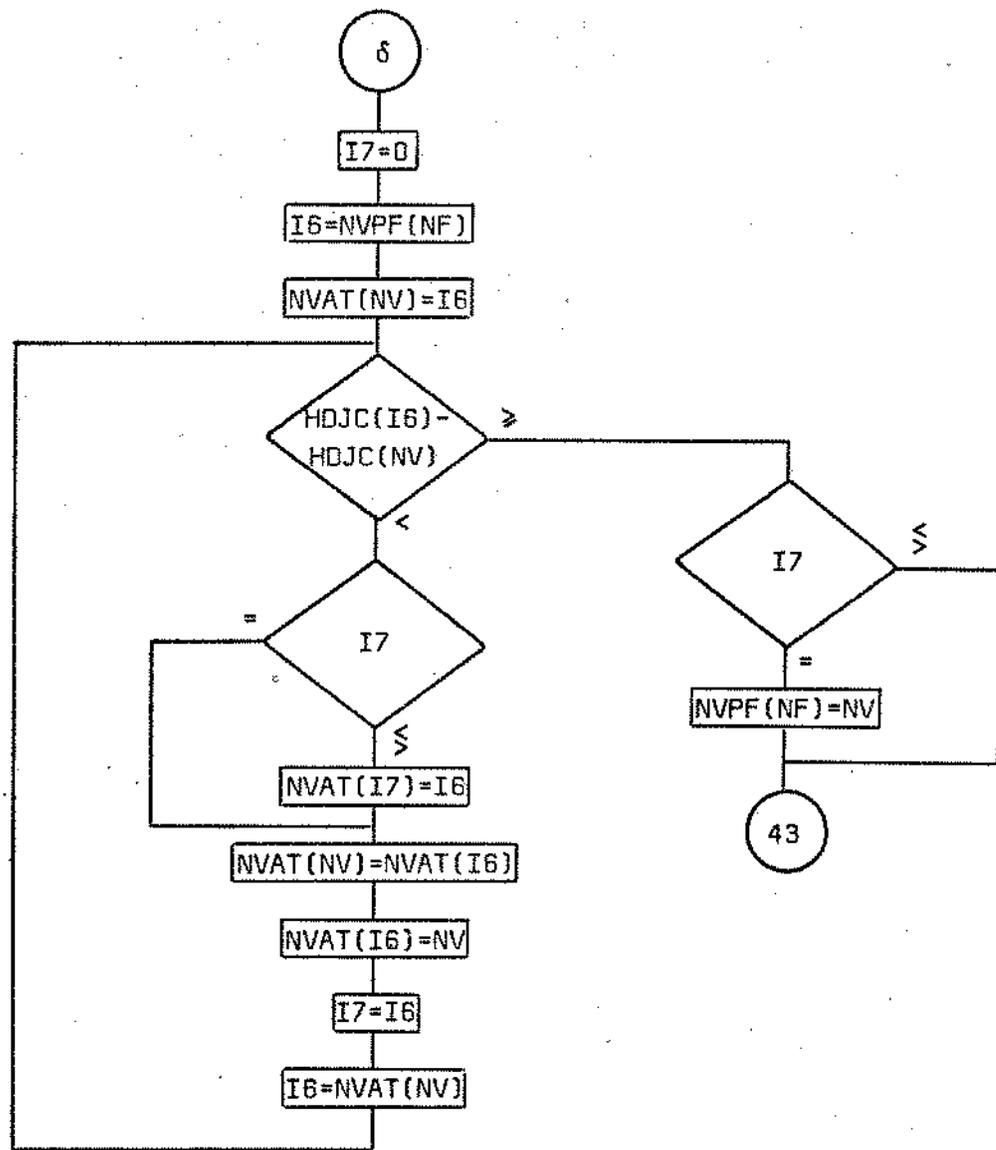


fig. 44 - Diagrama de Blocos Detalhado: SUB. EMPI









CAPÍTULO IV - COMPARAÇÕES E COMENTÁRIOS

---

#### IV.1 - Introdução

Pretendemos neste capítulo fazer algumas comparações com o modelo de simulação desenvolvido utilizando outros modelos já testados. A validação de um modelo de simulação é um problema complexo que não se restringe a comparações do tipo que desenvolveremos. Nossa pretensão neste trabalho, no entanto, não é validar o modelo proposto mas compará-lo, de uma maneira global, com alguns modelos já testados.

A primeira comparação que faremos será com o modelo de Webster (6), analisando neste caso o comportamento de um cruzamento isolado.

Em seguida compararemos o modelo SITRA com os modelos COSE I (2) e COSE II (3), analisando uma rede de tráfego com 8 cruzamentos sinalizados.

Finalmente serão feitos alguns comentários e sugestões sobre o trabalho realizado.

#### IV.2 - Comparação com Webster (6)

Webster propõe um modelo matemático de cruzamento que permite calcular o atraso médio por veículo em função do ciclo, da duração de verde e do grau de saturação da rua.

O atraso médio por veículo é dado pela relação:

$$A_w = \frac{C (1 - \lambda)^2}{2 (1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q (1 - x)} - 0.65 \left(\frac{C}{q}\right)^{1/3} x^{2+5\lambda}$$

onde,

$A_w$  = atraso médio por veículo (seg)

$C$  = duração do ciclo (seg)

$\lambda$  =  $V/C$  com  $V$  duração do verde efetivo

$q$  = fluxo na rua (veic./seg.)

$x$  = grau de saturação da rua

A expressão a que Webster chegou compõe-se de tres termos onde o primeiro representa o atraso médio por veículo para fluxo uniforme. O segundo termo representa o acréscimo que se deve adicionar ao atraso uniforme ocasionado pelas perturbações aleatórias do fluxo. O terceiro termo, finalmente, representa uma correção para adequar o modelo aos dados reais conhecidos.

#### IV.2.1 - Fluxo Uniforme

O modelo de Webster para fluxo uniforme, dado pelo primeiro termo da expressão vista acima, supõe fluxos de veículos contínuos. Entretanto o fluxo na realidade é discreto, o que ocasiona diferenças em relação a esse modelo.

Seja, por exemplo, um cruzamento isolado com duração de ciclo e vermelho efetivo  $R$ . Supondo fluxo de chegada  $q$  e

e fluxo de saturação  $q_M$  podemos representar o histograma de fila "paralela" desse cruzamento pelo gráfico da figura 45.

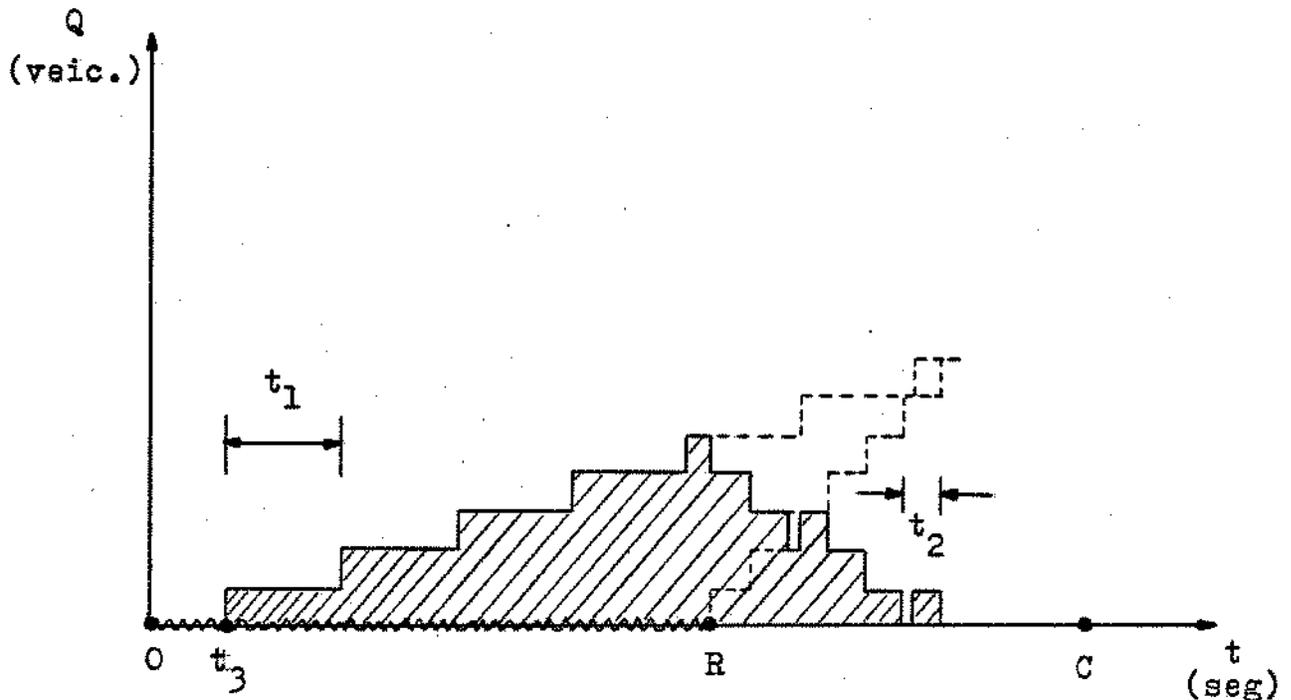


fig. 45

Onde

$$t_1 = \frac{1}{q} = \text{intervalo entre veículos na chegada}$$

$$t_2 = \frac{1}{q_M} = \text{intervalo entre veículos na saída}$$

$$t_3 = \text{intervalo de chegada do primeiro veículo}$$

Vê-se imediatamente que o atraso médio representado pela área hachurada é função do instante em que chega o primeiro veículo ( $t_3$ ) e pode-se demonstrar que só é função desse tempo, uma vez dados o ciclo (C) o vermelho integral (R) e os fluxos de chegada (q) e saída ( $q_M$ ).

Pode-se deduzir a expressão do atraso por veículo do

modelo discreto ( $A_d$ ):

$$A_d = \frac{K}{L} \cdot (R - t_3 + \frac{(K - 1)(t_3 - t_1)}{2})$$

onde

$$K = 1 + \text{INT} \left\{ \frac{R - t_3}{t_1 - t_2} \right\} = \text{número de veículos que pararam na fila durante o ciclo}$$

$$L = 1 + \text{INT} \left\{ \frac{C - t_3}{t_1} \right\} = \text{número de veículos que passaram durante o ciclo}$$

Na figura 46 a nuvem de pontos representa o atraso médio por veículo ( $A_d$ ) em função do grau de saturação da rua, para diferentes valores de  $t_3$ .

$$t_3 = \frac{J}{10} t_1 \quad J = 0,1, \dots, 9$$

A curva contínua representa o primeiro termo do modelo de Webster também em função do grau de saturação e finalmente - os pontos interligados por retas representam os resultados do modelo SITRA.

Foi simulado pelos diferentes modelos um cruzamento de

$$C = 90 \text{ seg.}$$

$$\lambda = 0,5$$

$$q_M = 1500 \text{ v/h} \quad t_2 = 2,4 \text{ seg}$$

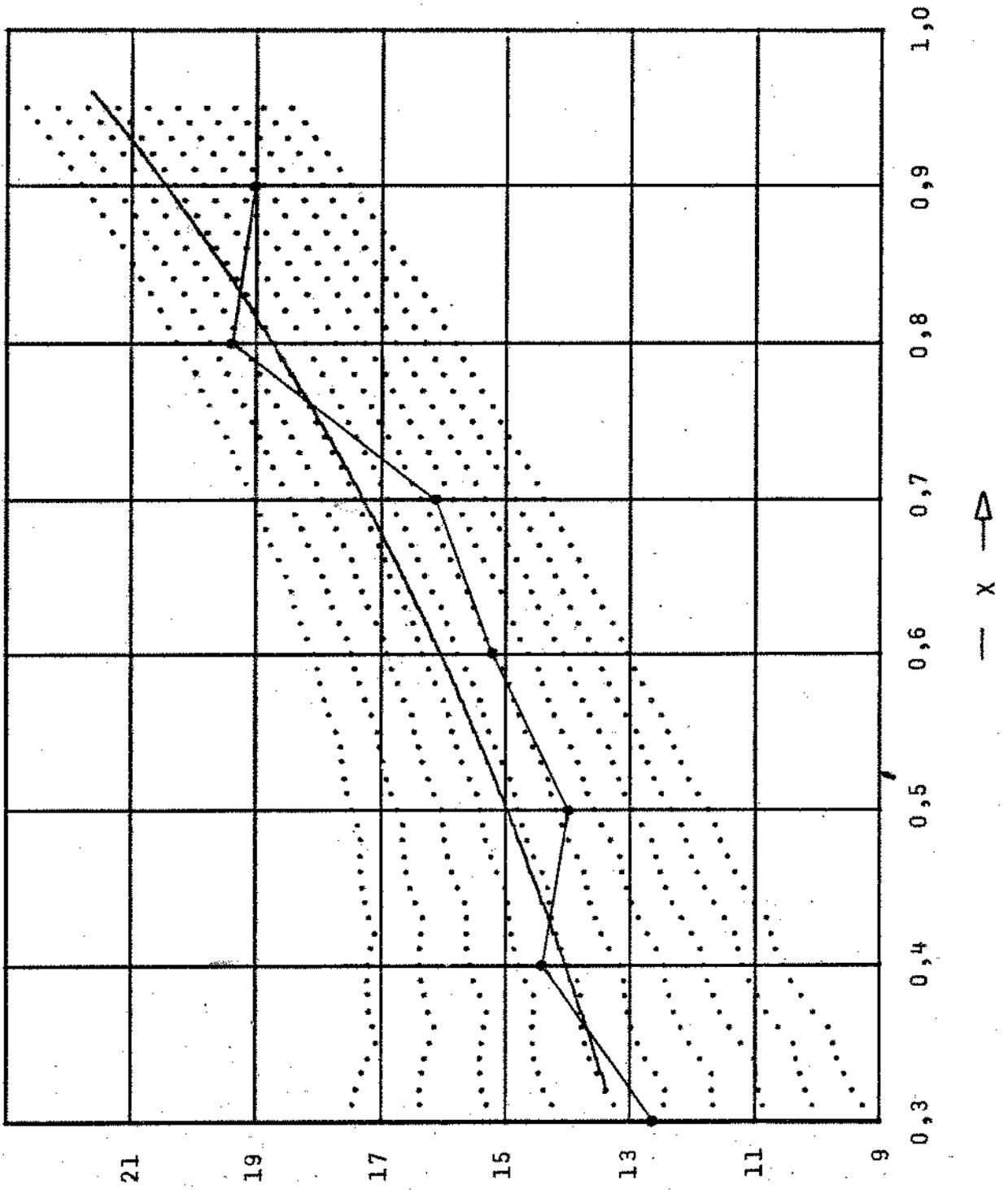
$$q = 75 \cdot J \text{ v/h} \quad J = 1,2, \dots, 9$$

Variando o fluxo  $q$  estamos alterando o grau de saturação da rua pois

$$X = \frac{q}{q_M \cdot \lambda}$$

fig. 46 - Comparação Webster-SITRA para fluxo uniforme

A  
(seg)



Os resultados obtidos mostram que:

1. O modelo de Webster que supõe fluxos contínuos é aproximadamente um caso particular do modelo discreto onde o primeiro veículo chega no instante  $t_3 = t_1/2$  e o vermelho efetivo é maior em  $t_2/2$ . (fig.47)

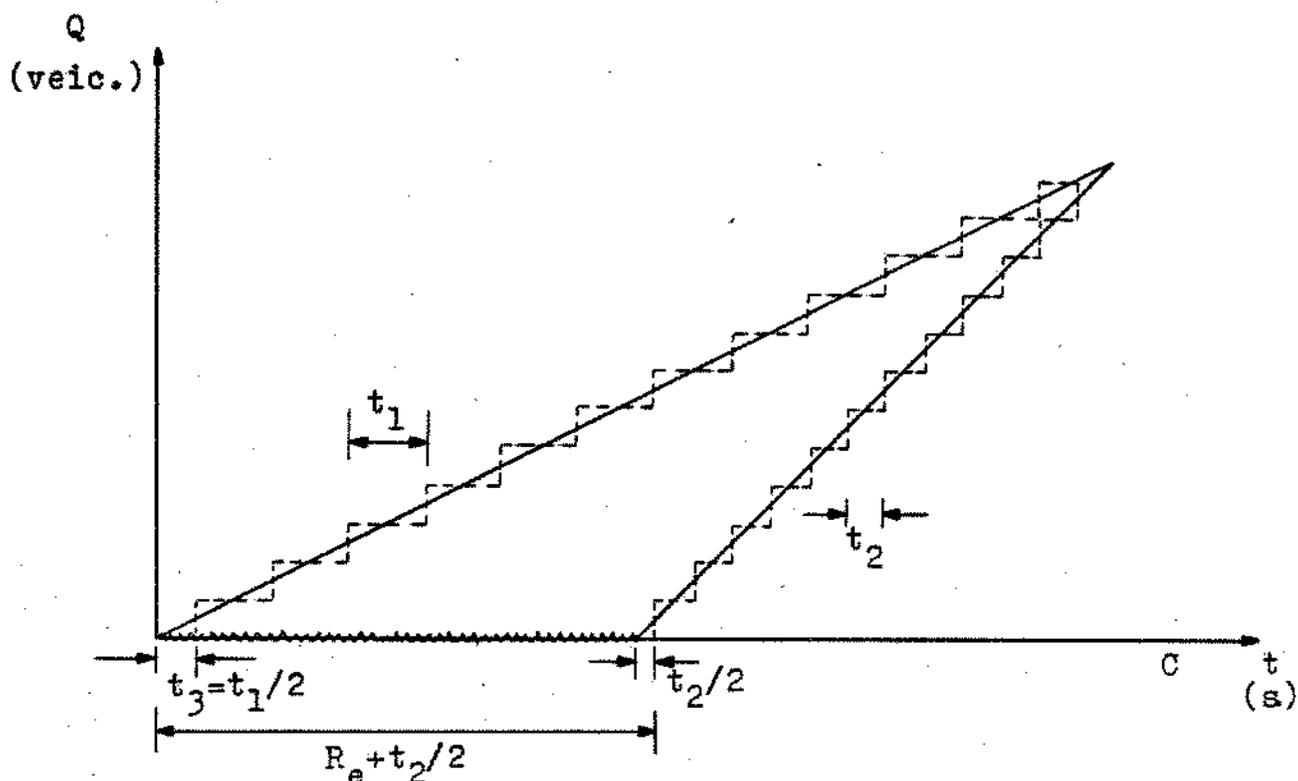


fig. 47

2. O modelo de simulação SITRA aplicado ao cruzamento considerado apresentou resultados ora acima ora abaixo de Webster. Foi feita uma simulação do cruzamento considerado durante 4500 seg, ou seja, 50 ciclos. Dados  $t_1$  e o ciclo  $C$  pode-se prever uma periodicidade na simulação de  $\underline{n}$  em  $\underline{n}$  ciclos, onde  $n.e$  é o mínimo múltiplo comum entre  $t_1$  e  $e$ .

$$\varepsilon = t_1 \left( 1 + \text{EWT} \left\{ \frac{C}{t_1} \right\} \right) - C$$

$$n \cdot \varepsilon = \text{mmc} \{ \varepsilon, t_1 \}$$

Portanto, o atraso calculado pelo SITRA é uma média de n atrasos, cada um com um  $t_3$  diferente, o que justifica as oscilações dos resultados

#### IV.2.2 - Fluxo aleatório

Supondo agora que as chegadas de veículos se dá segundo uma distribuição de Poisson, comparemos os atrasos do SITRA e de Webster (fig.48)

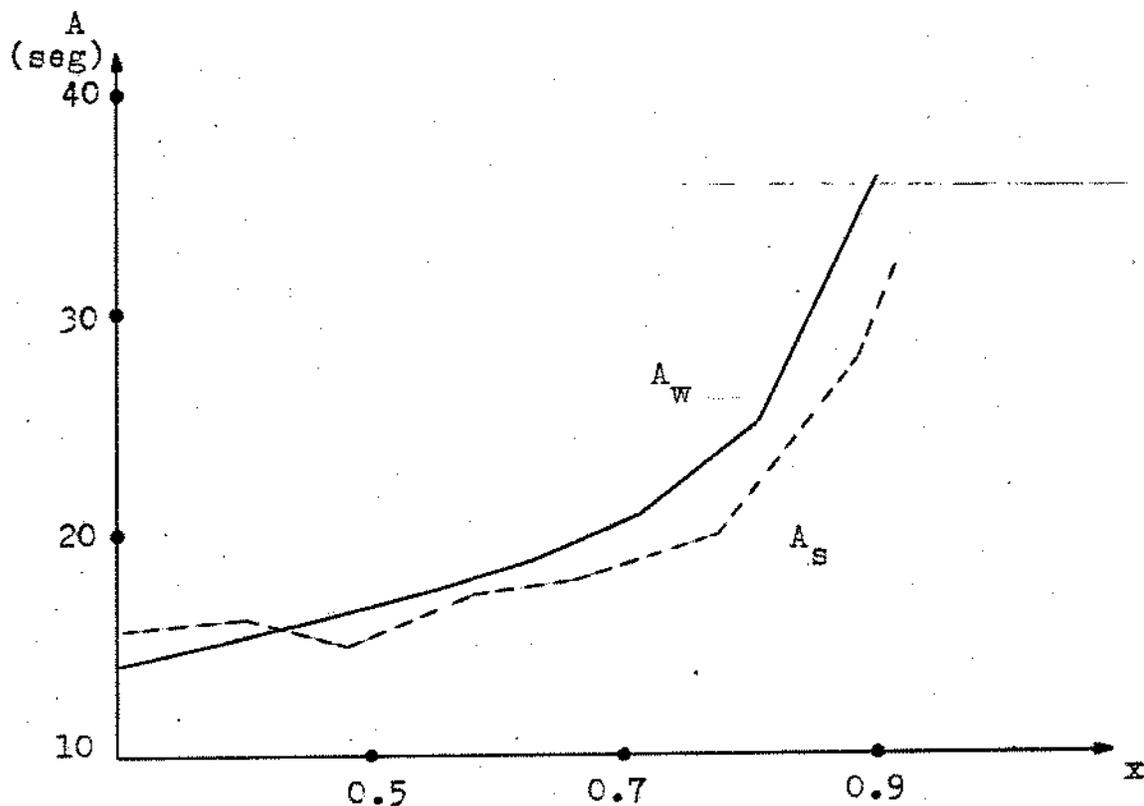


fig. 48

A curva em linha cheia representa o atraso de Webster completo com seus tres termos. A curva tracejada é o atraso da do pelo modelo SITRA.

Os resultados obtidos para fluxo aleatório foram considerados satisfatórios pois:

1. Foi observada uma influência considerável do inicializador da sequencia de chegadas aleatórias sobre o atraso. Em alguns casos a variação do atraso chega a ser de 25%. A subrotina geradora de números pseudo aleatórios utilizada (RANDU, IEM) pode ser considerada a principal responsável por essas variações.
2. O modelo de Webster foi ajustado ao valor médio de medidas realizadas num cruzamento isolado. Os resultados do SITRA, no entanto, estão dentro da variância dessas medidas, o que não nos permite concluir por uma diferença entre os resultados.

Além do atraso de fila, o modelo SITRA considera dentro do seu critério o número de paradas. Webster desenvolve uma expressão para a porcentagem média de veículos que param:

$$EVP = \frac{1 - \lambda}{1 - \gamma}$$

A figura 49 representa a porcentagem de paradas em função do grau de saturação. Em linha cheia temos o valor médio da do pelo modelo de Webster e em linha pontilhada os valores obtidos pelo SITRA.

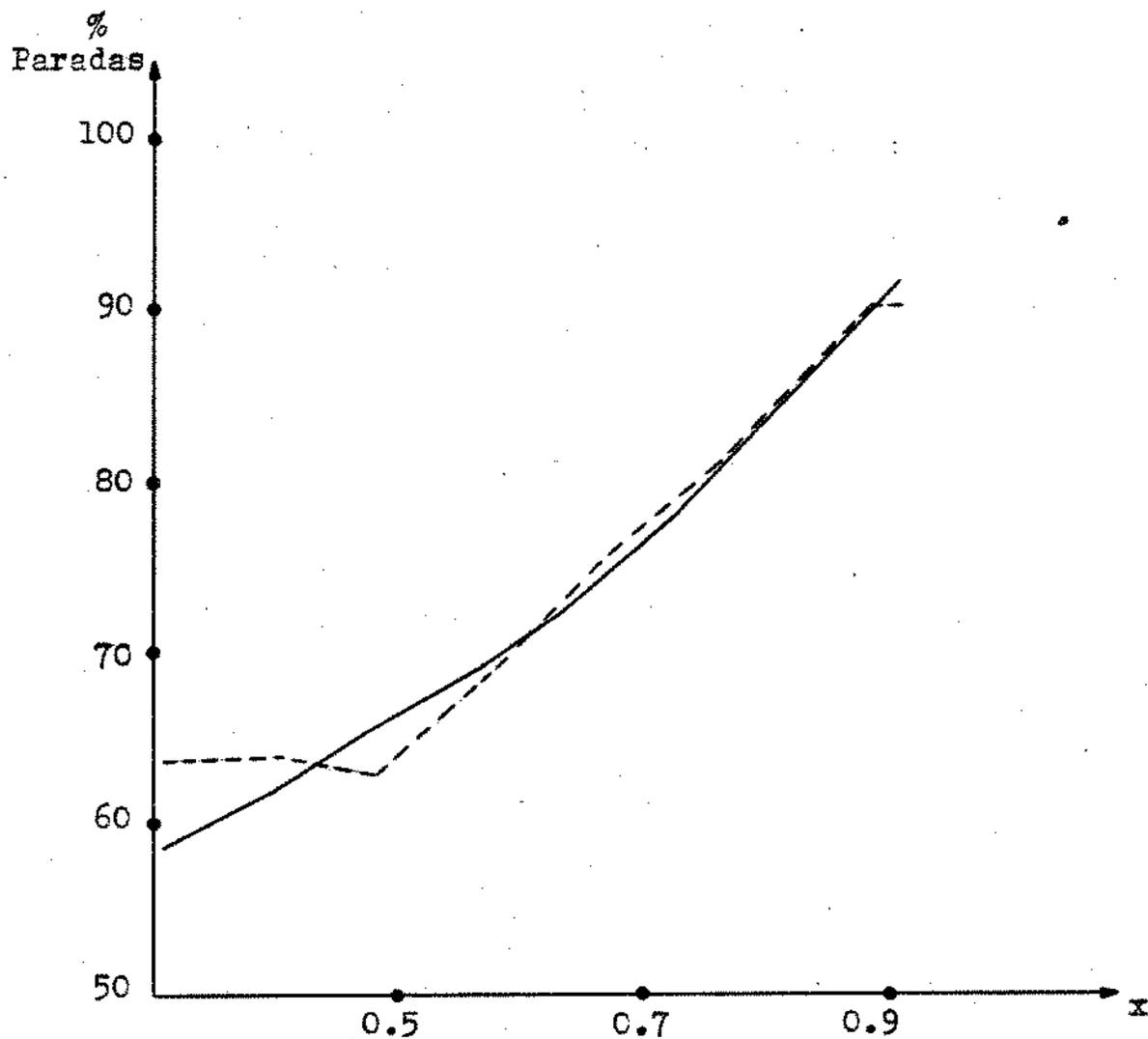


fig. 49

Concluimos dos resultados acima o bom funcionamento do algoritmo de detecção de paradas apresentado no capítulo II.7.2, principalmente para graus de saturação acima de 0,5 que são os mais frequentes.

Terminamos assim a comparação feita entre o simulador desenvolvido SITRA e o modelo de Webster na análise de um cruzamento isolado. Conclusões imediatas que podem ser tiradas indi

cam pela substituição do gerador de números pseudo-aleatórios utilizado e aplicação de técnicas de redução da variância de modo a se obter resultados mais definidos.

Além disso as diferenças encontradas entre o tratamento contínuo (modelo de Webster) e o discreto evidenciaram uma deficiência no primeiro modelo que antes nos passava desapercebida.

#### IV. 3 - Comparação com COSE I e COSE II

Para a comparação com os modelos de regulação de tráfego CCSE I e COSE II, foi analisada uma rede de tráfego de São Paulo com 8 cruzamentos sinalizados e 20 ramos.

Os dados necessários para a simulação da rede são:

- o comprimento e a largura dos ramos
- a velocidade média nos ramos
- o fluxo de saturação nos ramos
- os fluxos de entrada na rede
- as porcentagens de conversão nas esquinas

Além desses dados é necessário se conhecer a política de funcionamento dos faróis pela:

- duração dos ciclos
- duração dos verdes

- defasagens entre cruzamentos.

A figura 50 nos mostra a disposição da rede com seus cruzamentos, ramos, fluxos de saturação, comprimento e velocidade média. A figura 51 já nos mostra a rede com cruzamentos e ramos numerados, os fluxos nas 11 entradas, e as porcentagens de conversão nas esquinas, além da numeração das fases que controlam as aproximações nos cruzamentos.

Finalmente a figura 52 nos mostra uma das políticas de funcionamento dos faróis que foi simulada com os verdes, vermelhos e defasagens dos cruzamentos.

fig. 50 - Disposição da Rede

- - fluxo de saturação em veículos por hora
- - comprimento em metros
- ◐ - velocidade média em metros por segundo

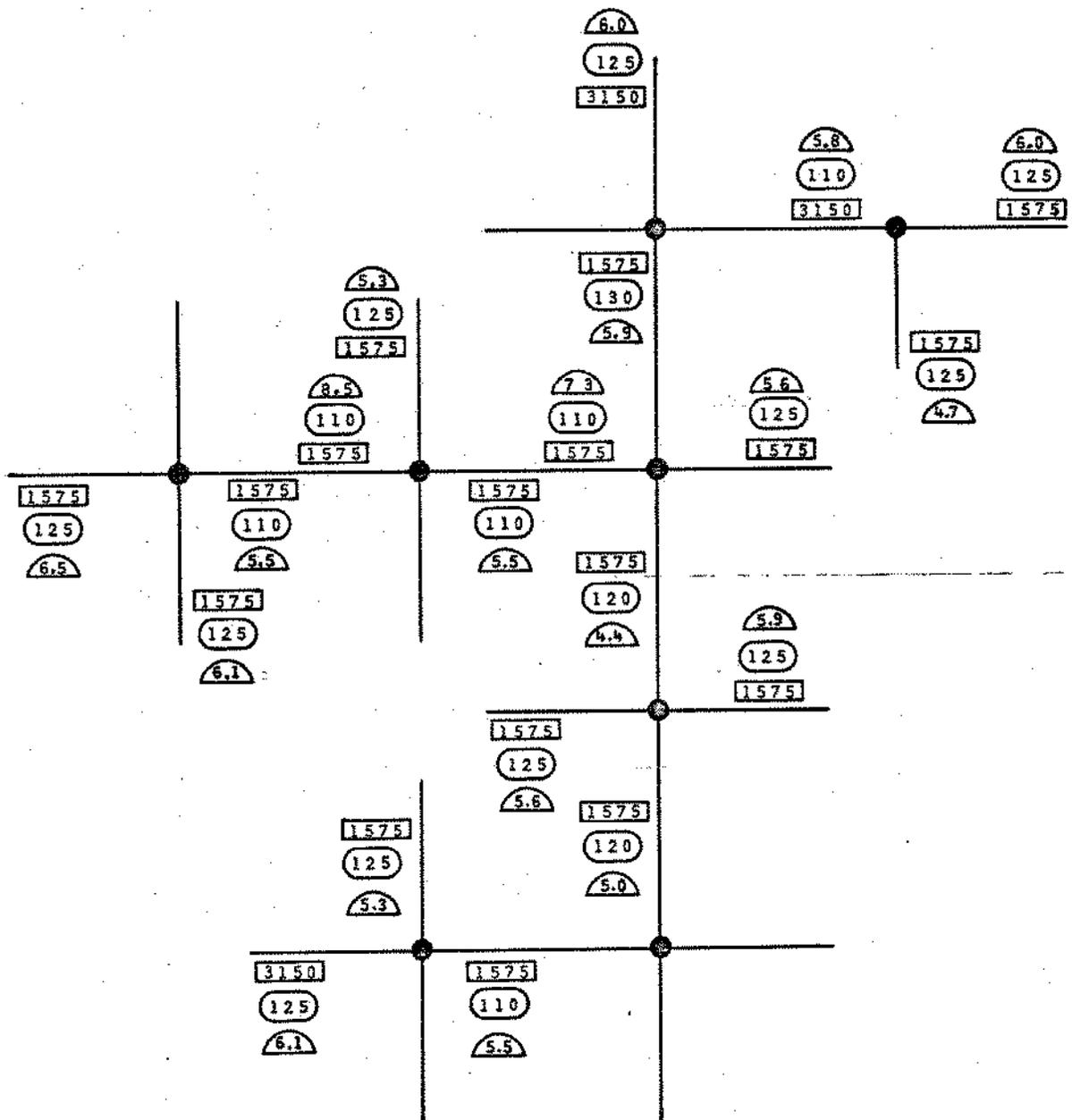


fig. 51 - Numeração da Rede

- E1  
800 - Entrada 1. Fluxo de 800 v/h
- 3 - Cruzamento 3.
- 7 - Segmento 7.
- 0 - Fase 8.
-  - Percentagem de conversão

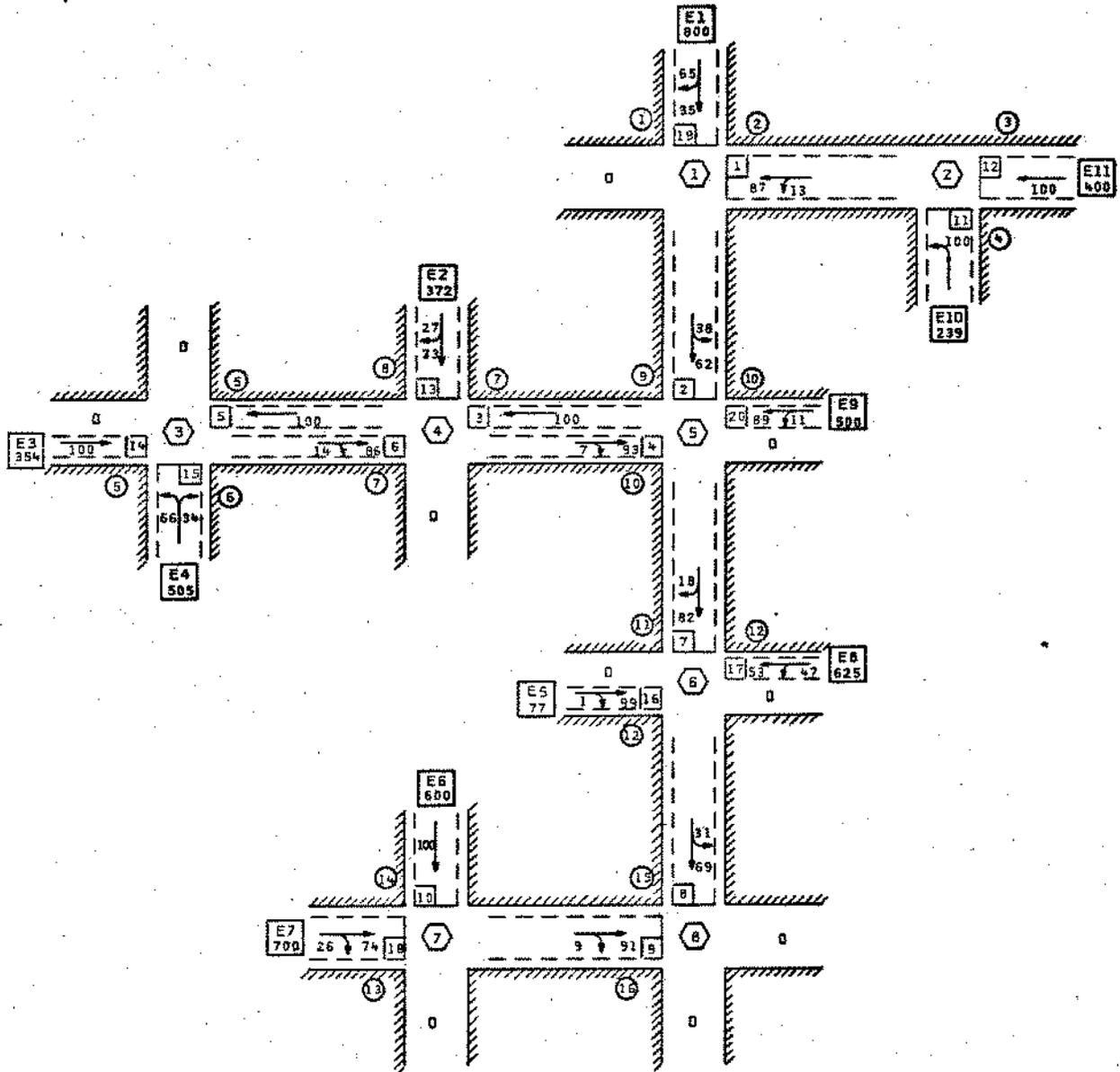
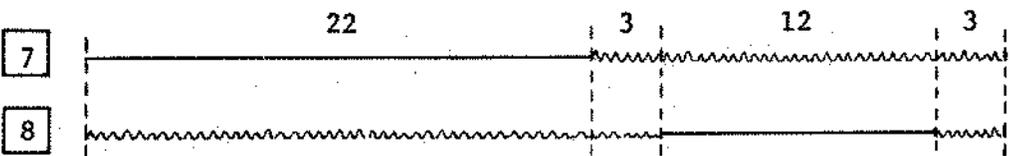
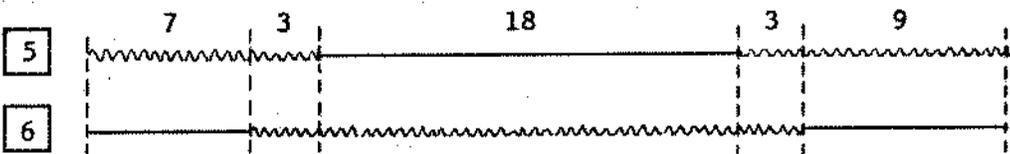
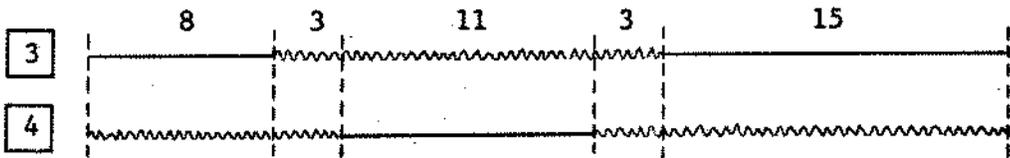
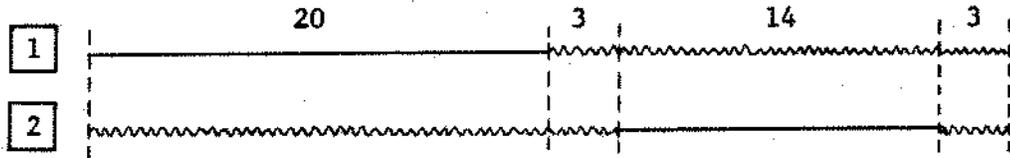
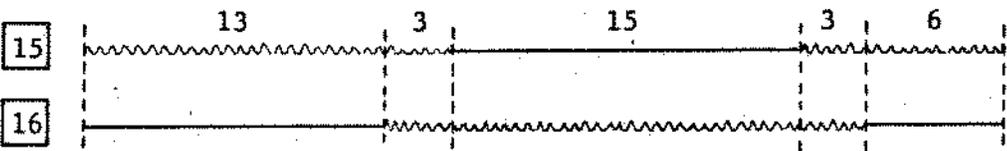
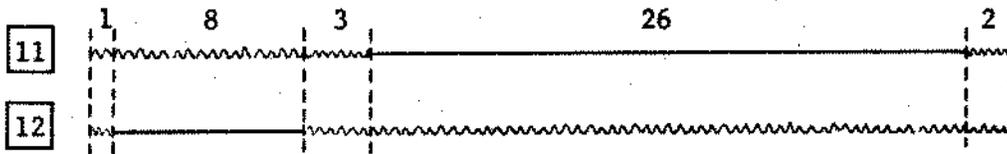
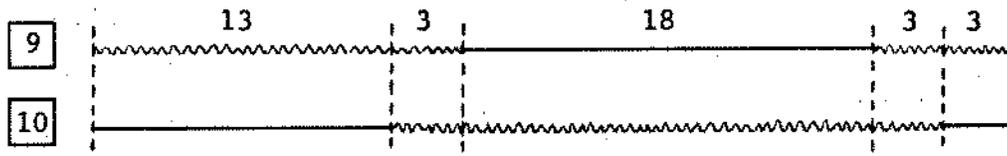


fig. 52 - Uma política de funcionamento dos faróis





Os resultados obtidos pelos modelos COSE I , COSE II e SITRA (fig. 53) se referem a cinco políticas diferentes de defasagens, escolhidas entre a configuração ótima e péssima dadas pelo modelo COSE I.

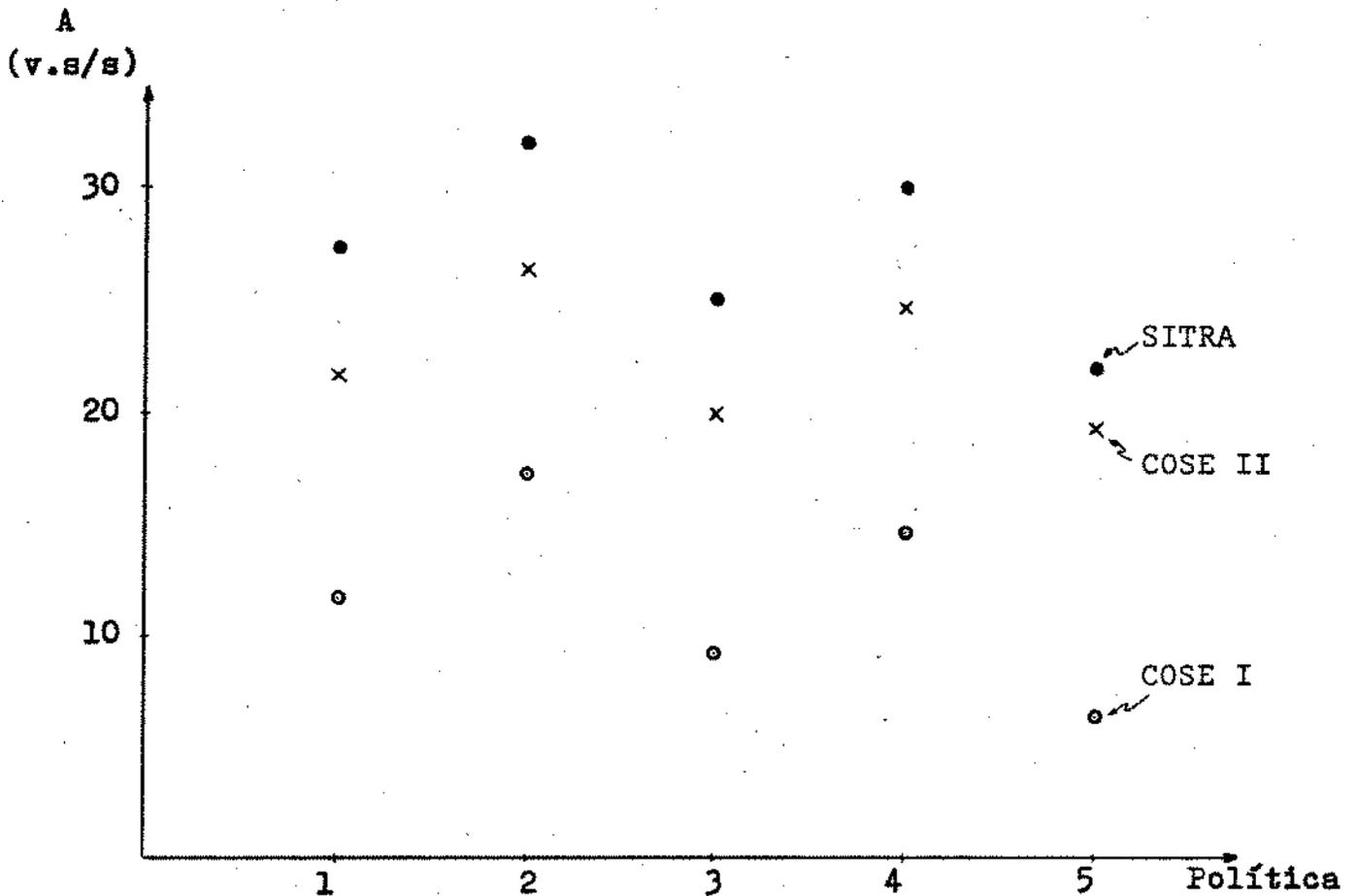


fig. 53

O modelo COSE I, que possui uma simulação mais simplificada e um critério mais simples apresentou um atraso menor do que os demais, cujas simulações são mais sofisticadas e cujos critérios são mais complexos. Os atrasos de parada e aleatório que fazem parte do critério dos modelos COSE II e SITRA não aparecem no modelo COSE I.

Assim podemos dizer que dos dois modelos de otimização, o que se apresenta mais próximo da simulação (e provavelmente da realidade), em termos de critério, é o modelo COSE II.

No entanto, a função objetivo dos dois modelos de otimização se ajustaram satisfatoriamente ao modelo de simulação SITRA, significando uma grande proximidade dos resultados finais de suas otimizações.

A comparação que realizamos entre o SITRA e os modelos de otimização COSE I e COSE II não nos permite absolutamente validar o modelo apresentado. No entanto, os resultados obtidos ao mostrarem uma certa concordância se apresentam como uma evidência a mais.

De uma maneira geral poderíamos dizer que a validação de um modelo como o apresentado nesse trabalho só poderia ser feita a medida em que o confrontássemos com a realidade. Para alguns fenômenos específicos como o "intervalo de tempo de espera" ou o processo de difusão, foram propostos modelos que necessitam uma comparação com dados reais para que se possa estimar seus parâmetros adequadamente ou, se for o caso, reformular o modelo.

O trabalho de validação de um modelo de simulação não é, absolutamente, trivial. Como já dissemos, não era o nosso propósito. Porém, fica como uma sugestão para futuros trabalhos.

ADENDO

LISTA DE VARIÁVEIS

NV - número do veículo

- CVEL(NV) - coeficiente de velocidade
- HDJC(NV) - hora desejada de chegada (real)
- IDIR(NV) - direção
- IHDJC(NV) - hora desejada de chegada (inteiro)
- NVAT(NV) - número do veículo precedente

NS - número do segmento

- AL(NS,K) - largura das faixas a atravessar na direção K
- ATR(NS) - atraso
- ATRAS(NS) - atraso de saída
- DPVS(NS) - desvio padrão sobre a velocidade
- ICSJ(NS) - comprimento
- IFAS(NS) - número da fase que controla o segmento
- ISEG(NS,K) - número do segmento saindo do segmento NS na direção K
- ITC(NS) - tipo do cruzamento quanto a prioridade
- ITFS(NS) - tipo do segmento quanto as faixas
- NFE(NS) - número da faixa mais a esquerda
- NFS(NS) - número de faixas
- NGD(NS) - inicializador de números aleatórios

NSEG(NS,K) - número do segmento chegando com o segmento NS na direção K  
NUPAR(NS) - número de paradas  
NUPAS(NS) - número de passadas  
PD(NS) - porcentagem a direita  
PF(NS) - porcentagem em frente  
SIG(NS) - desvio padrão sobre o intervalo aceito com espera zero  
SIGMA(NS) - desvio padrão sobre o intervalo de escoamento  
TZERO(NS) - intervalo médio aceito com espera zero

NF - número da faixa

DIM(NF) - intervalo de tempo entre veículos na saturação  
HPSV(NF) - hora da próxima saída de veículo (real)  
ICONF(NF) - detetor de conflito  
IHPSV(NF) - hora da próxima saída de veículo (inteiro)  
IPUT(NF) - possibilidade de ultrapassagem  
MEMO(NF) - número do veículo conflitante  
MMK(NF) - detetor de parada do veículo antecessor  
NSEX(NF) - número do segmento possuidor  
NVF(NF) - número de veículos  
NVPF(NF) - número do primeiro veículo  
NVUF(NF) - número do último veículo

NC - número do cruzamento

DUR(K,NC) - duração da mudança

IHPMF(NC) - hora da próxima modificação de fase

IND(NC) - índice da tabela das sequencias

MSEQ(NC) - dimensão da tabela das sequencias

NFASE(K,NC) - número da fase que se modifica

NFZ - número da fase

IEST(NFZ) - estado

NSRF(NFZ,K) - número da faixa dependente

IE - número da entrada

DTMED(IE) - intervalo médio entre injeções

DTMIN(IE) - intervalo mínimo entre injeções

HENT(IE) - hora da próxima injeção de veículo (real)

IHEN(IE) - hora da próxima injeção de veículo (inteiro)

NGC(IE) - inicializador de números aleatórios

NGE(IE) - inicializador de números aleatórios

SEGM(IE) - segmento correspondente a entrada

## Outras

AKB	- constante de equivalencia entre faixas
ALP	- largura padrão de um segmento
FPE	- fator de peso sobre a espera
HCOR	- hora corrente
HCORM	- tempo de simulação
IEM	- número de entradas
IFIM	- ponteiro final da tabela auxiliar
INIC	- ponteiro inicial da tabela auxiliar
ITAU(K)	- número da tabela auxiliar
ITAUM	- dimensão da tabela auxiliar
ITRAN	- tempo de transitório
LV(K)	- conflito com a direção K
NCM	- número de cruzamentos
NFMAX	- número de faixas
NING	- numeração sequencial de veículos
NMFAS	- número de fases
NSM	- número de segmentos
NVM	- dimensão da rede (em número de veículos)
SG	- desvio padrão sobre o intervalo aceito
SIGM	- desvio padrão sobre o intervalo aceito mínimo
TM	- intervalo de tempo aceito médio
TMIN	- intervalo médio aceito mínimo
TMV	- tamanho padrão de veículo

- XX - intervalo de escoamento
- YY - intervalo de tempo aceito

## BIBLIOGRAFIA

1. KNUTH, DONALD - "The Art of Computer Programing" - Seminumerical Algorithms, vol. 2 , Addison-Wesley , 1969.
2. FRANÇA, P.M. - "Coordenação de Semáforos I" - Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Publicação Interna O /74 FEC, 1974.
3. ALBUQUERQUE, R.H. - "Coordenação de Semáforos II" - Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Publicação Interna O /74 FEC, 1974.
4. AUTHIÉ, G. - "Realisation d'un simulateur hybride de trafic urbain et son utilisation pour les methodes de conduite du trafic a cycle fixe" - Tese de Docteur-Ingenieur, Université P. Sabatier, Toulouse, 1971.
5. WOHL, MARTIN e MARTIN, B.V. - "Traffic System Analysis for Engineers and Planners" - MacGraw-Hill Series in Transportation, MacGraw-Hill Book Company, 1967.
6. WEBSTER, F.V. - "Traffic Signal Settings" - Road Research Technical Paper nº 39, Road Research Laboratory, Londres , 1958.

7. FERNANDES, J. ; FRANÇA, P. ; ALBUQUERQUE, R. ; SOARES, S. -  
"Conceitos Básicos em Tráfego Urbano" , Publicação Interna  
06/74 FEC, 1974.
8. AUTHIE, G. e LÉGLISE, M. - "Analyse Critique de la Conception  
et du Comportement de Cinq Modeles de Trafic" - Transporta -  
tion Research, Vol. 7 , Pergamon Press , 1973.
9. WEBSTER, F.V. e COBBE, B.M. - "Traffic Signals" - Road -  
Research Technical Paper nº 56, Road Research Laboratory ,  
Londres, 1966.
10. MEYER, P.L. - "Probabilidade. Aplicações à Estatística" -  
Ao Livro Técnico S.A. , Rio de Janeiro, 1969.