

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO

COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS II
(COSE II)

por

Rui Henrique Pereira Leite de Albuquerque

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia de Campinas da
Universidade Estadual de Cam-
pinas como requisito parcial
para a obtenção do título de
Mestre em Ciências.

setembro/1974

SUMÁRIO

O modelo de Coordenação de Semáforos II (COSE II) determina uma regulagem ótima de semáforos que permite a fluxos conhecidos de veículos passar por uma dada rede de vias com mínimo custo segundo um dado critério.

Í N D I C E

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - O MODELO COSE II	3
II.1 Hipóteses Iniciais	3
II.2 O Modelo de Simulação	3
II.2.1 A Malha Morta	4
II.2.2 Os histogramas	5
II.3 O Cálculo de Índice de Performance	12
II.3.1 O Atraso Uniforme	12
II.3.2 O Atraso de Paradas	12
II.3.3 O Atraso Aleatório	13
II.3.4 O Atraso Global da Rede	14
CAPÍTULO III - O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO	16
III.1 As variações nas defasagens	16
III.2 As variações no tempo de verde	18
III.3 O número total de iterações	20
CAPÍTULO IV - O PROGRAMA DO MODELO COSE II	22
IV.1 Introdução	22
IV.2 As variáveis do Programa	23
IV.3 A Entrada de Dados	27
IV.4 A Matriz L(I,J,K)	31
IV.5 O Cálculo dos Histogramas	35
IV.6 O Cálculo dos Atrasos	43
IV.7 O Processo de Otimização	47
IV.8 A Impressão dos Resultados	56
CAPÍTULO V - A APLICAÇÃO DO MODELO	57
V.1 Introdução	57

V.2 A rede I	57
V.2.1 Características da rede	60
V.2.2 O diagrama da rede, para aplicação do programa COSE II	61
V.3 Cálculo dos Valores Inicializadores	62
V.4 Resultados	63
 CAPÍTULO VI - COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES	 67
VI.1 A rede para testes de comparação	67
VI.2 Comparações quanto ao critério de Atraso Total	70
VI.3 Comparações quanto ao encontro da Situação de Ótimo	71
VI.4 Conclusões	73
VI.4.1 A preparação de rede	74
VI.4.2 O tempo de computação	74
VI.4.3 O cruzamento não sinalizado	74
VI.4.4 As curvas de Atraso do Modelo COSE II	75
 ADENDOS	
ADENDO I - O RAMO FICTÍCIO	76
ADENDO II - O FATOR DE DISPERSÃO	78
 BIBLIOGRAFIA	 81

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

O método mais simples para sincronizar sinais de tráfego é o uso de regulações fixas, nas quais o conjunto de semáforos usa um ciclo comum e onde, para cada semáforo, seu estado modifica-se a determinados pontos fixos do ciclo.

Para colocar em operação um sistema desse tipo, recorrem-se a vários métodos de selecionar a regulação de faróis a ser usada. Inicialmente, considerando-se uma via de uma ou duas mãos que tenha vários semáforos, e desprezando-se possíveis aumentos no custo de percurso que determinada regulação desses semáforos da via principal provoque nas transversais, temos o problema da "onda verde". Uma série muito grande de trabalhos foram feitos em torno do assunto ([1], [2]). Os inconvenientes desse método são os de que mesmo a melhor regulagem é incapaz de escoar pela "onda verde" todo o volume de tráfego que passa pela via e que os aumentos de custos nas transversais, à medida que estas passam a apresentar altos fluxos de tráfego, superam os benefícios trazidos à via principal.

O método de Chang (utilizado em São José, Califórnia), usa como critério a minimizar o atraso total sofrido pelos veículos nas ruas, obtido pela integração dos comprimentos de fila formada nos cruzamentos. Conquanto este processo já leve em consideração cálculos sobre toda uma rede, seu modelo de tráfego é simplificado, não sendo seu ótimo necessariamente o mais próximo do real.

O método COSE I já é um avanço nesses métodos de regulação de sinais, aplicando, como visto em [4], um método rigoroso de otimização a um modelo razoável de tráfego. A técnica, aplicada a uma dada área base sujeita a algumas restrições quanto ao tipo de rede, que exigem um desenvolvimento adicional, tem como restrição mais séria o fato do atraso entre dois sinais depender apenas de regulagem relativa entre esses semáforos, o que só é boa aproximação em condições de tráfego pesado [5].

Este trabalho apresenta o Modelo de Coordenação de Semá-

foros II (COSE II) . A simulação de tráfego por ele usada mantém as principais propriedades de um fluxo de tráfego numa estrutura de vias com semáforos, incluindo a ação de fluxos entre ramos sucessivos da rede, a dispersão de pelotões de veículos ao longo de uma rua, e número de paradas dos veículos componentes desse fluxo. A otimização usa um processo de tipo "hill-climbing", assegurando boa convergência e rápido alcance da regulação ótima dos faróis. Nesse processo permite-se a variação das defasagens relativas de um farol a outro e também dos tempos de verde de cada semáforo. Analisam-se a seguir detalhadamente os princípios do modelo, o processo de otimização, o programa implementado para uso em computador digital e finalmente os resultados obtidos da aplicação do programa.

CAPÍTULO II

II. O MODELO COSE II

O modelo COSE II tem dois elementos principais - a simulação macroscópica de tráfego que é usada para calcular um índice de performance numa dada situação de regulação dos faróis e um processo de otimização tipo "hill-climbing" que muda as regulações e determina se elas melhoraram ou não um dado índice de performance.

Os tempos de ciclo são mudados automaticamente pelo programa, permitindo que o efeito do uso de diferentes ciclos seja analisado.

II.1 - Hipóteses Iniciais

A aplicabilidade do método presume a existência das seguintes condições:

- Todos os principais cruzamentos da rede têm semáforos
- Todos os semáforos da rede têm um ciclo comum (ou um ciclo de metade desse valor, como em |6|)
- O tráfego entrando na rede o faz com fluxos definidos
- Os movimentos dentro da rede são definidos pelas per-centagens de conversão em cada cruzamento, supostas in dependentes da regulação de semáforos.

II.2 - O Modelo de Simulação

O modelo de simulação aplicado no método COSE II trabalha com os fluxos a cada instante na rede, como função de uma determinada regulação dos faróis. Caso a rede apresente formas de ma lha fechada, a determinação dos fluxos instantâneos em regime de equilíbrio só poderia ser obtida em regime de cálculo iterativo, o que aumentaria demasiado o tempo de cálculo. Em decorrência, é con veniente que a estrutura da rede seja em forma de árvore, eliminan do-se as realimentações.

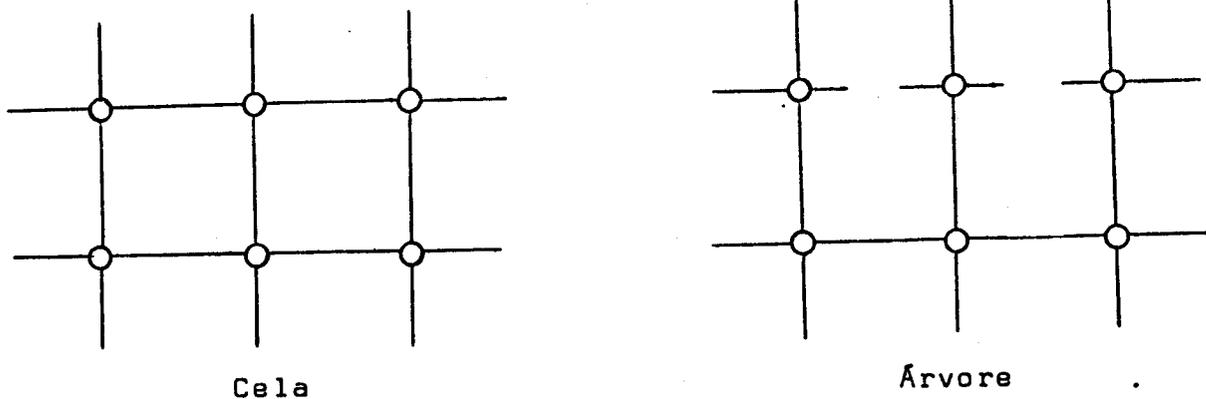


Fig. 1 : Redes em forma de Cela e Árvore.

Para transformar-se uma estrutura em cela numa em árvore, recorre-se à técnica do "ramo-fictício", passando a trabalhar com as chamadas "malhas-mortas".

II.2.1 - A Malha Morta

Se a rede com a qual nos deparamos é uma malha fechada, cabe-nos abri-la, cortando os ramos que forem necessários e substituindo seus fluxos reais por fluxos equivalentes constantes.

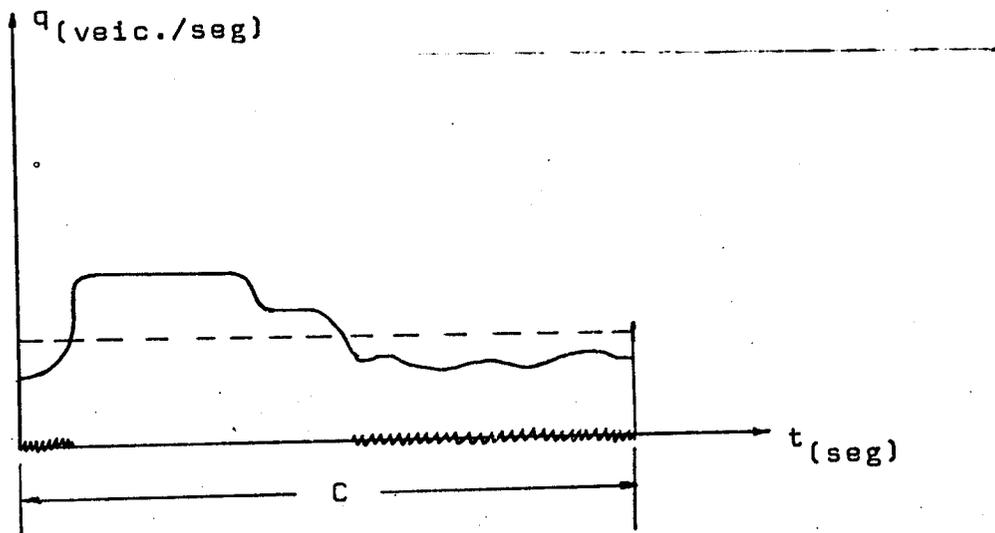


Fig. 2 : Fluxo de chegada num cruzamento.

Este "corte" de ramo, tal como sugerido acarreta uma dupla simplificação:

- 1^a Transformou-se um ramo intermediário numa saída de um cruzamento e entrada noutra. Este cruzamento ao qual o ramo chegava tem agora um ramo de entrada, de fluxo constante e portanto de influência constante no critério a considerar, sendo portanto desprezado no cálculo de uma regulação ótima. (mesmo variando verdes)*
- 2^a O fluxo equivalente pode ser uma aproximação muito grossa do fluxo real.

A segunda simplificação pode ter seus efeitos minorados se considerarmos para "corte":

- Ramos com baixo fluxo, pois sua importância para cálculo do critério a otimizar é pequena.
- Ramos muito carregados (de fluxo próximo à saturação) pois a otimização não alterará significativamente sua contribuição ao critério.
- Ramos longos (alto tempo de percurso) de modo que o fluxo de chegada ao fim da via seja praticamente constante, não se introduzindo erros significativos com seu corte.

Já a perturbação mencionada inicialmente, requererá a utilização de um "ramo-fictício" para reduzir-lhe as consequências, o que está melhor explicado no Adendo I.

II.2.2 - Os Histogramas

O tempo de ciclo comum a todos os semáforos é dividido em 50 unidades de tempo (ou 25 caso se use a implementação aconselhada em [6]), representadas por DT. Todos os cálculos de critério a ser usado no COSE II são feitos com base nos valores médios de fluxo, comprimento de filas e número de paradas de veículos que se espera ocorram em cada uma dessas unidades de tempo. Essa divisão do ciclo dá uma solução consistente com a precisão de cálculo re-

(*). Maiores detalhes sobre a afirmação encontram-se no capítulo V deste trabalho.

querida e a capacidade de armazenamento e velocidade do computador [5]. Na prática, os valores reais dos fatores usados no critério variarão em relação à média, devido ao comportamento individual dos veículos. O cálculo corretivo adicionado ao critério é visto a seguir neste trabalho.

Cada ramo da rede é caracterizado por três tipos de histogramas, de valores instantâneos característicos de pontos importantes da rua, a saber:

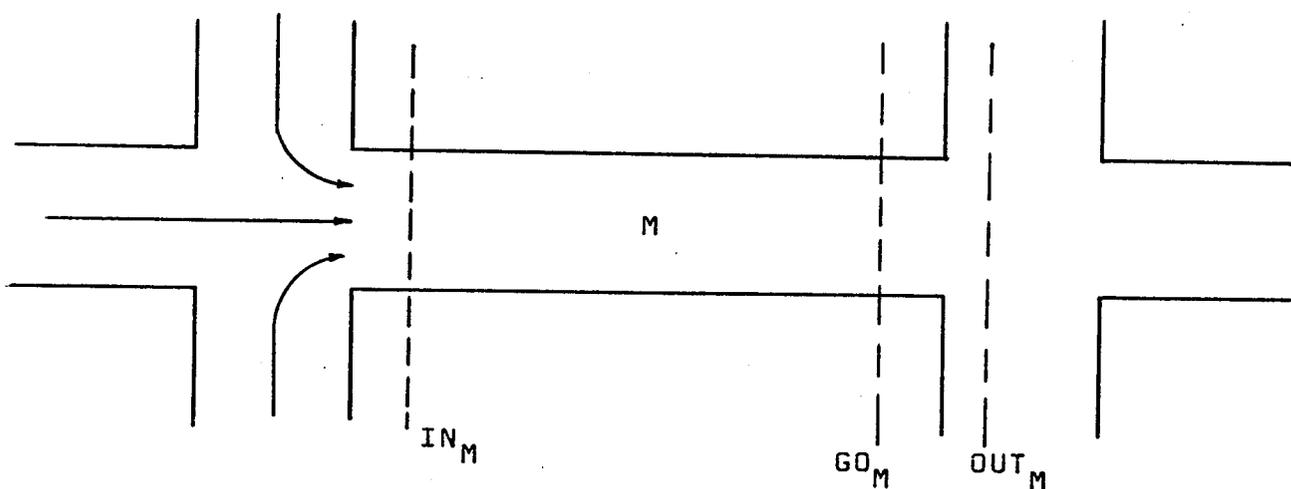


Fig. 3 : Pontos de medição dos histogramas na via M.

Onde cada histograma representa:

- Histograma IN_M : Indica o número de veículos entrando na via M
- Histograma GO_M : Indica o número de veículos chegando ao fim da via M
- Histograma OUT_M : Indica o número de veículos que saem da via M

a) O Histograma IN_M

O histograma IN_M é calculado apenas para ramos intermediários da rede. Se o ramo for de entrada interessa-nos apenas o GO e o OUT dele.

O IN_M a cada instante é dado como função do OUT dos ra

mos que nele desembocam e da percentagem de conversão desses ramos para o ramo M. Assim:

$$IN_M^K = \sum_{M1=1}^{M1=r} P_{M1,M} \cdot OUT_{M1}^K \quad (1)$$

com

$K = 1, 2, \dots, 50$ índice do intervalo de tempo considerado

$M1 = 1, 2, \dots, r$ índice do ramo que converte para M

r : número total de ramos que convertem para M

IN_M^K : Quantidade de veículos entrando no ramo M no K-ésimo intervalo de tempo.

$P_{M1,M}$: Percentagem de conversão do ramo M1 para M.

OUT_M^K : Quantidade de veículos saindo do ramo M1 no K-ésimo intervalo de tempo.

e recordando a definição de intervalo de Tempo:

$$DT = \frac{C}{50} \quad (2)$$

Um histograma de IN_M característico de um ramo intermédio M seria

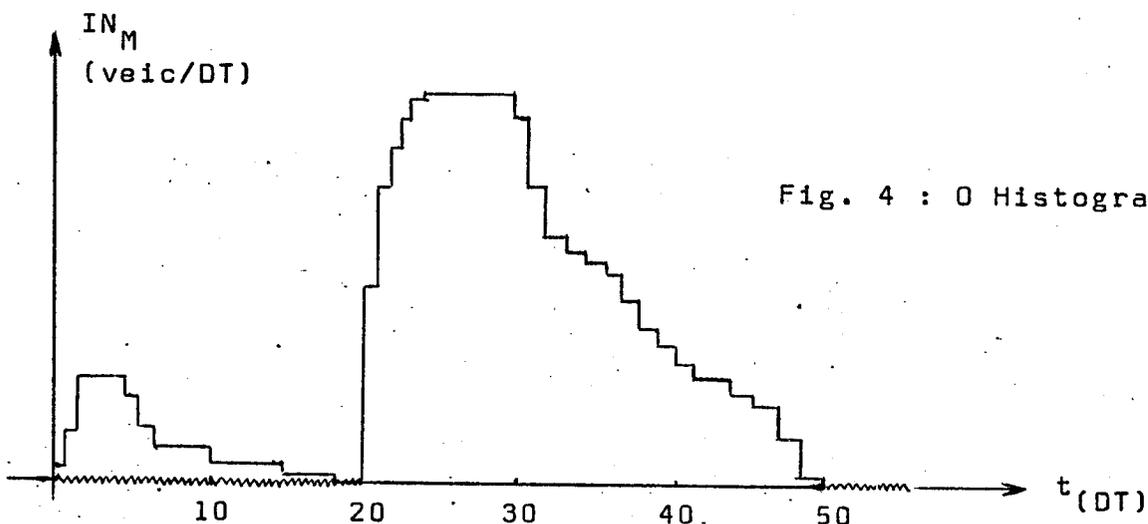


Fig. 4 : O Histograma de IN_M

b) O Histograma GO_M

Um semáforo, no seu regime periódico de verde e vermelho tende a criar "pelotões" de veículos. Esses pelotões dispersam-se enquanto percorrem a via de um a outro semáforo, devido a diferenças nas velocidades individuais de cada veículo.

O histograma GO_M dos veículos ao fim de uma via é então diferente do IN_M , e essa diferença pode ser vista nos diagramas simplificados de IN_M e GO_M da figura abaixo:

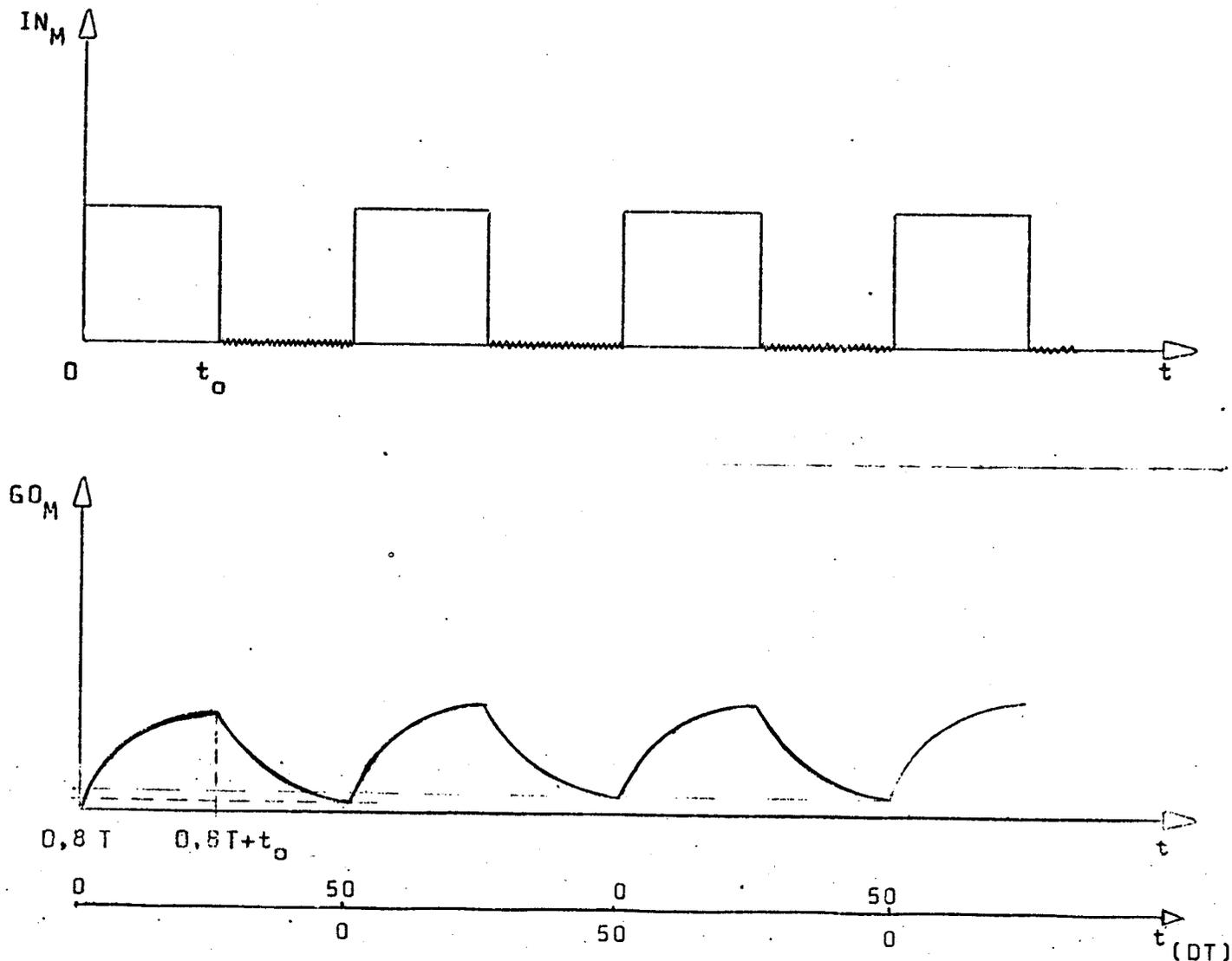


Fig. 5 : Os Histogramas de IN e GO da via M .

Considerando-se T o tempo médio de percurso de via, o primeiro veículo a chegar ao fim dela o fará em média a $0,8.T$ [5]. O histograma IN_M representado por pulsos de degraus constantes sofreu um processo de "alisamento" transformando-se em GO_M .

O fator de alisamento, calculado no Adendo II, é:

$$F = \frac{1}{1 + 0,4 \cdot T} \quad (3)$$

e há uma defasagem do histograma de IN para o de GO de $0,8 T$.

Desse modo, a equação geral que define o histograma de GO é:

$$GO_M^{K+0,8T} = F \cdot IN_M^K + (1-F) \cdot GO_M^{(K-1)+0,8T} \quad (4)$$

isto é, os carros chegando num dado instante ao fim de uma rua, dependem dos que nela entraram $0,8.T$ antes e dos que chegavam ao final da rua no instante imediatamente anterior.

Para calcular-se o GO_M^1 requer-se GO_M^0 que é assumido inicialmente

$$GO_M^0 = 0$$

o que causa um

$$GO_M^{50} = (1-F)^{25} \cdot IN$$

assumido que IN seja constante durante o verde, conforme indica a fig.5, e nulo durante o vermelho.

Como o regime é periódico, corrige-se GO_M^0 para

$$GO_M'^0 = (1-F)^{25} \cdot IN$$

obtendo-se agora para

$$GO_M'^{50} = (1-F)^{25} \cdot IN + (1+F)^{50} \cdot IN$$

Feita a segunda iteração, o GO_M^{50} difere do GO_M^{50} de $(1-F)^{50}$. IN.

Nos casos reais observados, o fator de alisamento permanece no intervalo

$$\frac{1}{40} < F < 1$$

Mesmo assumindo-se F pequeno,

$$F = \frac{1}{20}$$

ter-se-ia uma diferença entre GO_M^{50} e GO_M^{50} da ordem de 10%.

Numa terceira iteração a diferença seria de 1%, o que é perfeitamente desprezível dada a precisão usual das medidas de tráfego. Portanto, para considerar-se que o histograma de GO tenha entrado em regime periódico, basta refazê-lo uma vez.

Advertiu-se anteriormente que não há interesse no do histograma IN de ramos de entrada. Lembrando as premissas do programa, se os fluxos dos ramos de entrada são constantes, tem-se

$$GO_{M'}^K = q_{M'} \cdot \frac{C}{50} \quad (5)$$

onde

$q_{M'}$: Fluxo equivalente na via M' .

M' : Ramo de entrada.

C : Tempo de ciclo.

c) O histograma OUT_M .

Para montar-se este histograma indicativo do número de veículos que saem de uma rua, leva-se em conta o estado do farol, a capacidade máxima de escoamento de veículos dessa via, e a fila de veículos que possa existir no cruzamento.

Sendo dados o primeiro e segundo, resta calcular a fila (Q_M^K). Monta-se um histograma inicial de Q_M^K , medindo a quantidade de de veículos parados em fila, pela fórmula de recorrência:

$$Q_M^K = Q_M^{K-1} + GO_M^K - OUT_M^K \quad (6)$$

com

Q_M^K : Quantidade de veículos parados no fim da via M no instante K.

Considerando ser este histograma também periódico, assume-se inicialmente

$$Q_M^0 = 0$$

e numa repetição de cálculo do histograma coloca-se

$$Q_M^0 = Q_M^{50}$$

como inicializador, obtendo-se já nessa segunda passagem o histograma de regime periódico. Tem-se certeza que este terá sido alcançado, baseando-se em que o cruzamento não está saturado, havendo portanto pelo menos um intervalo de tempo no Ciclo em que a fila seja nula.

O histograma de OUT_M é dado por:

- Com o sinal vermelho no instante K :

$$OUT_M^K = 0 \quad (7)$$

- Com o sinal verde no instante K :

$$OUT_M^K = \min \{ Q_M^{K-1} + GO_M^K, Q_{SM} \} \quad (8)$$

onde

Q_{SM} : Número máximo de veículos que podem sair da via M, calculado através do conceito de fluxo máximo (*) na via M

$$Q_{SM} = q_{MAX} \cdot \frac{C}{50} \quad (9)$$

(*) O conceito de fluxo máximo foi introduzido em | 3 |.

II.3 - O Cálculo do Índice de Performance

O índice de performance será o critério que se adotará para julgar o estado de uma determinada regulação de um conjunto de semáforos, conseguindo-se através dele localizar uma situação ótima.

No modelo COSE II, o critério adotado é o de atraso médio global da rede, obtido por

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} AR_M \quad (10)$$

com

AT : Atraso médio global da rede

AR_M : Atraso do ramo M da rede

MM : Número total de ramos intermediários na rede

e o atraso de cada ramo da rede apresenta três componentes, que são detalhados a seguir:

II.3.1 - O Atraso Uniforme

É o atraso do número total de veículos parados pelo tempo em que ficam parados, tal como usado em [4]. No nosso modelo é obtido por:

$$AU_M = \frac{1}{50} \cdot \left| \sum_{K=1}^{50} Q_M^K \right| \quad (11)$$

$$|AU_M| = \text{veic. s./s.}$$

II.3.2 - O Atraso de Paradas

Leva em conta a necessidade de estabelecer uma penalização para o desconforto do motorista e para o aumento do número de acidentes, causados por um acréscimo do número de paradas.

O número de paradas em cada instante K é dado pelo his

tograma de paradas, calculado em:

$$NP_M^K = \min \{Q_M^K, GO_M^K\} \quad (12)$$

Denomina-se MP à penalização imposta a cada parada, computando o atraso total de paradas de cada ramo por

$$AP_M = \frac{MP}{C} \sum_{K=1}^{50} NP_M^K \quad (13)$$

$$|AP_M| = \text{veic. s./s.}$$

II.3.3 - O Atraso Aleatório

No modelo apresentado até agora, os cálculos de histogramas de IN, GO e OUT, os histogramas de fila e de paradas, e em consequência os Atrasos usados no critério de otimização, baseiam-se em que os fluxos apresentam-se de forma idêntica a cada ciclo. Na prática, haverá uma variação em torno da média dessas variáveis, que precisa ser computada.

Em [7] e [3] viu-se o procedimento para cruzamentos isolados. Agora, consideram-se cruzamentos integrados numa rede, simulando-se as chegadas não mais como aleatórias, mas como resultado da dispersão de um pelotão de veículos que por sua vez foi liberado do cruzamento anterior num instante determinado. A maior previsibilidade leva a uma menor ponderação dos eventos aleatórios do que a considerada em [3].

Analisar-se-á a influência aleatória no nosso critério de otimização segundo duas variáveis:

a) A Defasagem (*) entre cruzamentos

Testes feitos por [5] mostraram que a diferença entre o atraso sofrido por pelotões médios dos modelos comparados com a média do atraso de pelotões reais, era constante em relação a variações na defasagem.

O acréscimo provocado pelas aleatoriedades independe da

(*) A conceituação precisa de defasagem encontra-se em [4].

defasagem considerada, mantendo a curva de variação de atraso x de fasagem o mesmo ponto de mínimo tanto no caso médio como na média dos casos reais.

b) O Grau de Saturação (*)

O Grau de Saturação mostrou ser de influência preponderante para definir o atraso aleatório a ser considerado. Em [5] com para-se o acréscimo de Atraso de acordo com a saturação da via, entre o cruzamento isolado [3] e o cruzamento integrado na rede como neste modelo. Verificou-se, como já previsto, que a ponderação do atraso aleatório variando com a saturação é menor no nosso modelo, sugerindo [5] que se adote para atraso aleatório a expressão:

$$AA_M = b \cdot \frac{X_M^2}{(1-X_M)} \quad (14)$$

com

$$b = \frac{1}{4} \text{ veic. s./s.}$$

$$|AA_M| = \text{veic. s./s.}$$

AA_M : Atraso aleatório do ramo M

tendo sido calculado:

$$X_M = \frac{\sum_{K=1}^{50} GO_M^K}{Q_{SM} \cdot v_e} \quad (15)$$

com

X_M : Grau de saturação da via M

v_e : Verde efetivo (**)

II.3.4 - O Atraso Global da rede

O atraso do ramo M é definido por:

$$AR_M = (AU_M + AP_M + AA_M) \quad (16)$$

(*) Definido em [3].

(**) A definição e explicações sobre o verde efetivo encontram-se em [3].

e o atraso global da rede, critério que será minimizado, orientando o ponto de funcionamento do sistema será

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} (AU_M + AP_M + AA_M)$$

CAPÍTULO III

III. O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

No método COSE II o processo de otimização é do tipo "hill-climbing". A partir de uma dada regulação dos semáforos da rede, são alteradas em diferentes passos as defasagens (*) entre eles e os tempos de verde de cada um, até que se consiga definir uma situação ótima, caracterizada pelo mínimo do índice de performance.

III.1 - As variações nas defasagens

Para melhor compreensão do processo, coloquemos o atraso total dado pelo critério de performance como função de dadas situações de verde e de defasagens:

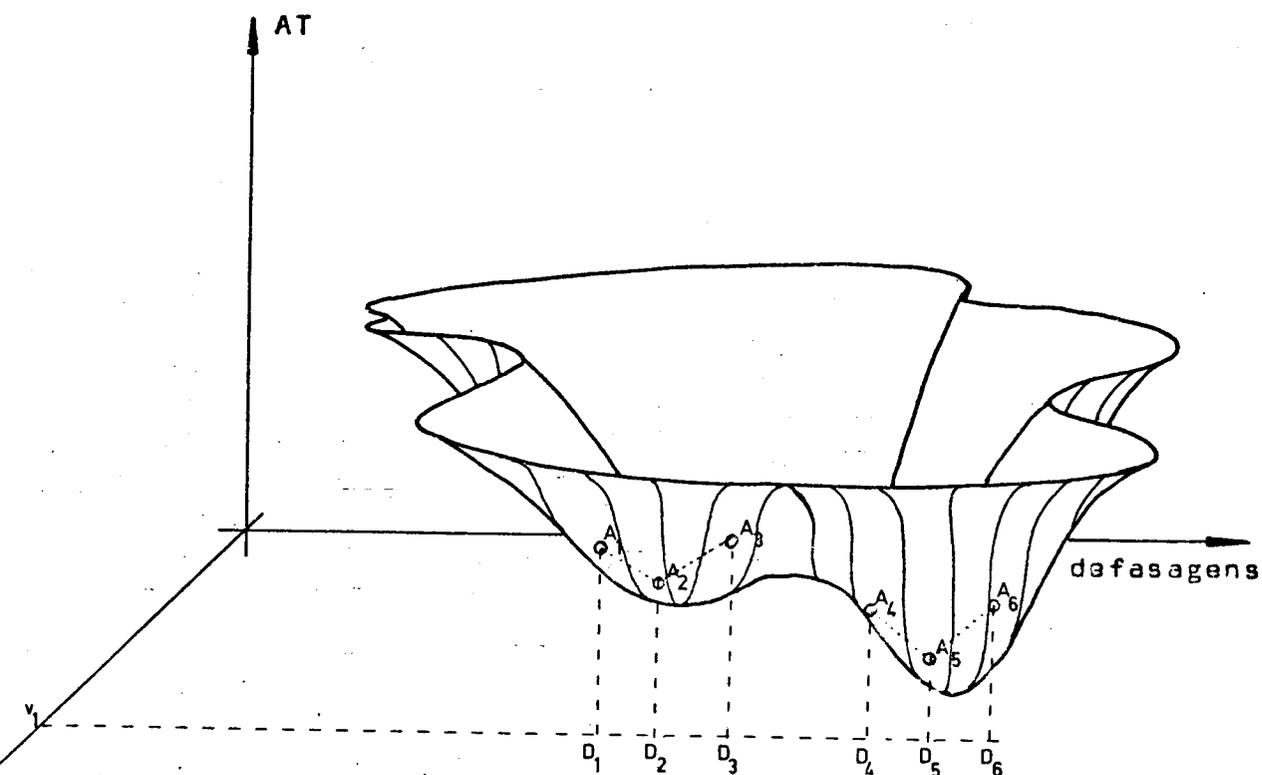


Fig. 6 : Variações no atraso com variações nas defasagens

(*) O conceito de defasagens está explicado em |3|.

Suponha-se que para uma determinada configuração de semáforos o atraso de rede tenha comportamento análogo ao da fig.6. De nomina-se:

V_1 : Uma dada situação de verdes dos semáforos da rede

D_1 : Uma dada situação de defasagens entre os semáforos da rede.

Para provocar-se uma variação em D_1 , basta variar-se a defasagem de um farol da rede, mantendo-se as demais fixas.

Inicia-se o processo com uma situação de regulação dos semáforos, determinando um atraso A_1 . Varia-se a defasagem de um dado semáforo, de um determinado número de DT, e recalcula-se o critério, definindo A_{i+1} .

Caso

$$A_{i+1} < A_1$$

prossegue-se a variação nesse sentido até que

$$A_{i+n} > A_{i+n-1}$$

considerando como defasagem ótima desse semáforo, até esse instante do processo, aquela que define A_{i+n-1} .

Caso

$$A_{i+1} > A_1$$

tenta-se a variação no sentido inverso, procedendo como acima.

Após encontrar a defasagem que define o mínimo do critério com relação àquele semáforo, efetuam-se as variações isoladamente nos demais semáforos. Lembre-se que em rede de k semáforos, há $(k-1)$ possibilidades de defasagens independentes, portanto variar-se-á a situação em $(k-1)$ semáforos da rede.

Para reduzir a possibilidade de encontrar uma configuração de defasagens que proporcione um mínimo apenas local, tenta-se

ainda, semáforo por semáforo, uma variação de maior amplitude, buscando encontrar outras situações de mínimo mais global.

Imagine-se agora a fig.6 de forma mais simplificada, como se D_1 dependesse apenas da defasagem de um semáforo. Exemplifica-se o descrito acima, começando com D_1 que define A_1 , fixos os verdes.

Tenta-se

$$D_2 = D_1 + 7DT$$

calcula-se

$$A_2 < A_1$$

Tenta-se novamente

$$D_3 = D_2 + 7DT$$

calculando agora

$$A_3 > A_2$$

o que define como ótimo inicial D_2 . No entanto, ao verificar-se a hipótese de um mínimo mais global, com

$$D_4 = D_2 + 20 DT$$

verifica-se que

$$A_4 < A_2$$

e passa-se a trabalhar no entorno de D_4 , obtendo finalmente, como indica a figura, a defasagem D_5 como ótima até esse ponto do processo de otimização.

III.2 - As variações no tempo de verde

Viu-se em [3] que uma proporção de verdes razoável segundo a qual se deve dividir o ciclo é dada por

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Y_1}{Y_2}$$

onde

V_1 , V_2 : Tempos de verde de cada fase *

Y_1 , Y_2 : Graus de ocupação das vias de acesso ao farol. *

No entanto, alertou-se que essa divisão era apenas uma a aproximação. Caso tenhamos

$$\frac{Y_1}{Y_2} > 3$$

a divisão de verdes que minimize o atraso não se encontra mais na proporção indicada. O método COSE II supre essa deficiência fazendo também com que os verdes de cada um dos semáforos variem de um DT, um por vez, calculando a cada passo o índice de performance. Prossegue-se a variação num dado sentido a cada vez que o índice diminuir, calculando por fim a situação de verdes ótima de um dado semáforo. Repete-se o procedimento para cada semáforo da rede.

No entanto, há certas restrições na variação de verdes que devem ser obedecidas. Lembrando |3| :

$$C = L + V_1 + V_2$$

e ainda que o verde mínimo é dado por:

$$V_{1,\min} = Y_1 \cdot C$$

$$V_{2,\min} = Y_2 \cdot C$$

tem-se aí os limitantes inferiores para a variação dos verdes. Os limitantes superiores são dados por:

(*) Maiores detalhes e o cálculo exato estão contidos em |6|

$$V_{1,max} = C - L - V_{2,min}$$

$$V_{2,max} = C - L - V_{1,min} \quad (*)$$

Imagine-se a seguir a Fig.6 novamente de forma simplifi cada, colocando-a na dependência do verde de apenas um semáforo.

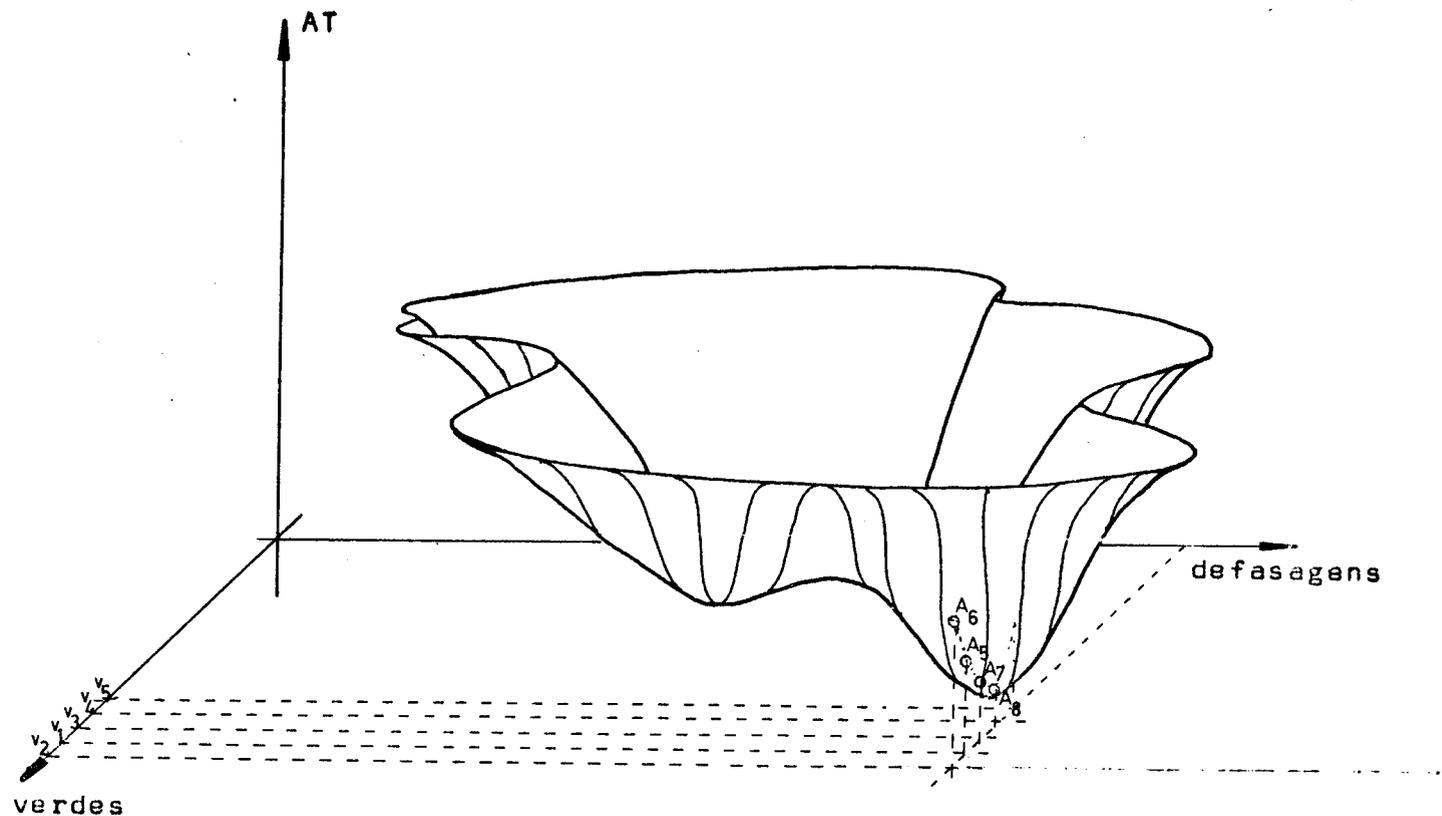


Fig. 7 : Variações no atraso com variações no verde.

Iniciou-se a otimização a partir da situação já encontra da A_5 , com V_2 obteve-se $A_6 > A_5$; tentaram-se então varia ções no verde com sentido inverso, localizando-se A_8 como nova situação ótima.

III.3 - O número total de iterações

A partir da situação indicada como ótima na Fig. 7, po de-se tentar ainda variações da defasagem, depois de verde novamen

(*) O conceito de defasagem está explicado em [3].

te, até alcançar-se a situação mínima do índice de performance. Adotou-se aqui a sugestão do Road Research Laboratory, em [5] que, visando minimizar a possibilidade de encontrar apenas um ótimo local, sugere a utilização de variações pequenas e grandes para a otimização sucessiva de cada semáforo. O processo de otimização está descrito na tabela abaixo:

Passagem	Valor em módulo da Variação (em $DT = \frac{C}{50}$)	Parâmetro Otimizado
1	7	Defasagens
2	20	Defasagens
3	1	Duração de Verdes
4	7	Defasagens
5	20	Defasagens
6	1	Defasagens
7	1	Duração de Verdes
8	1	Defasagens

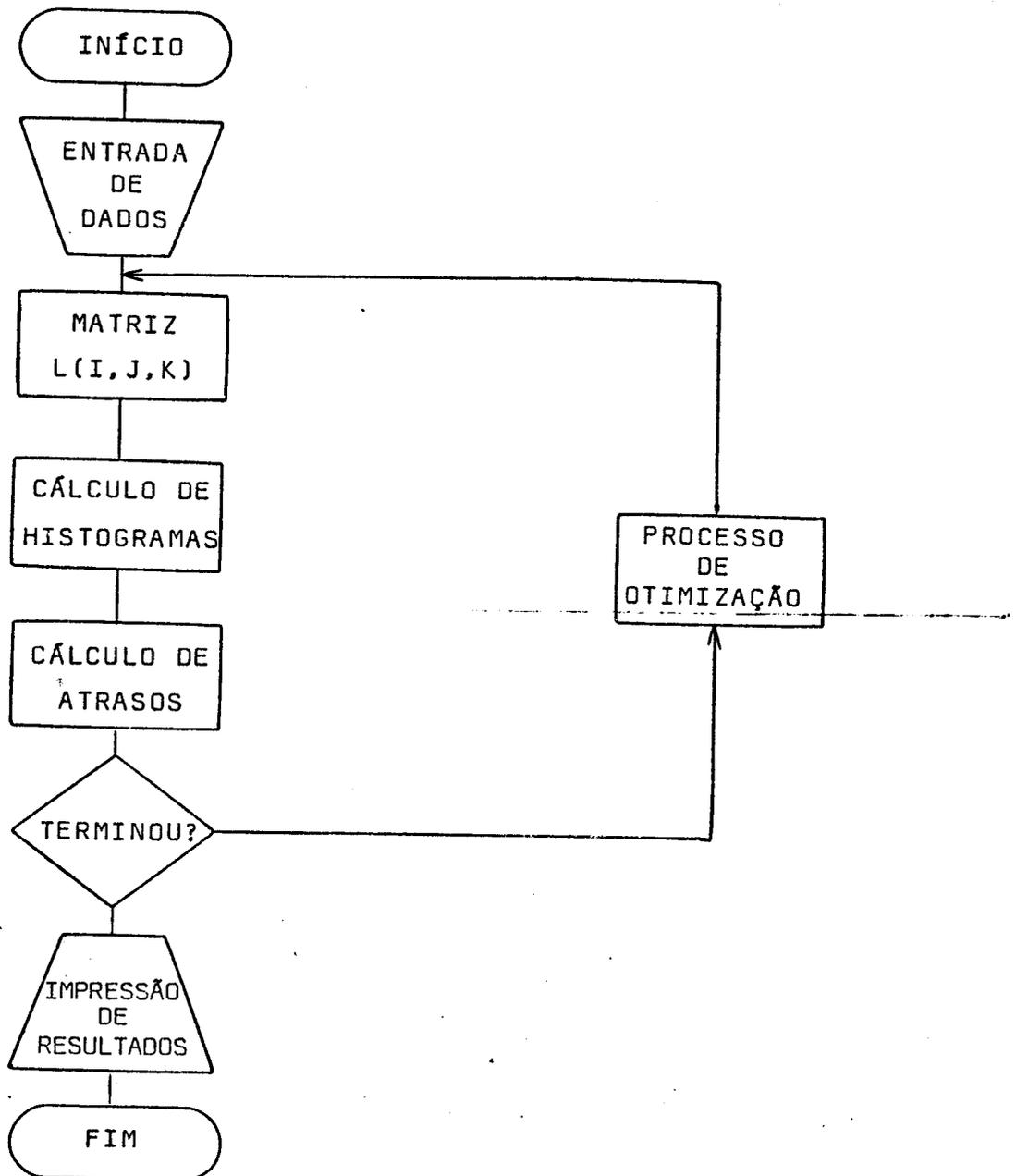
Se requisitado, pode-se tentar processos de otimização alternativos.

CAPÍTULO IV

O PROGRAMA DO MODELO COSE II

IV.1 - INTRODUÇÃO

O programa usado pelo modelo COSE II está resumido esquematicamente abaixo, sendo cada uma das suas partes tratada com maior profundidade a seguir:



IV.2 - AS VARIÁVEIS DO PROGRAMA

Para facilitar a compreensão das partes do programa, dá-se a seguir uma lista de variáveis usadas no seu decorrer, em ordem alfabética:

Vetores:

- B(M,K) : Número de veículos que param no ramo M no instante K. Equivale ao histograma NP(M,K) introduzido no capítulo 3, utilizado aqui com outra notação por problema de coincidência de variáveis.
- DEC(I) : Defasagem do cruzamento I (em segundos).
- GO(M,K) : Número de veículos chegando no instante K, ao final do ramo M.
- IN(M,K) : Número de veículos entrando no instante K, no ramo M
- IPO(NP) : Indica o parâmetro a variar na passagem (+ é defasagem, - é verde), e o módulo da variação.
- I1(M) : Índice do cruzamento em que chegam os veículos do Ramo M.
- J1(M) : Índice da fase do semáforo no cruzamento em que chegam os veículos do ramo M.
- K1(M) : Indica o tipo do ramo M, se é intermediário (K1(M)=1) ou de entrada (K1(M)=0).
- L(I,J,K) : Indica o estado da fase J, no cruzamento I, no instante K (se verde ou vermelho).
- OUT(I,K) : Número de veículos saindo no instante K, do ramo I.
- P(I,M) : Percentagem de conversão de veículos, do ramo I para o ramo M.
- Q(M,K) : Número de veículos em fila no instante K, no ramo M.
- QM(M) : Fluxo máximo de veículos do ramo M (em veic/h).

- RI(I,J) : Vermelho integral do cruzamento I, na fase J (em segundos).
- S(M) : Número máximo de veículos que pode passar num intervalo de tempo no ramo M.
- T(M) : Tempo médio de percurso do ramo M (em segundos).
- V(I) : Tempo de verde do cruzamento I (em segundos).
- VA(M) : Fluxo real de veículos no ramo M (em veic/h).
- VM(JK) : Tempo de verde máximo da fase 1 do cruzamento JK (em segundos).
- VN(JK) : Tempo de verde mínimo da fase 1 do cruzamento JK (em segundos).
- X(M) : Grau de saturação do ramo M.

Os significados de cada uma destas variáveis já foram dados na primeira parte deste trabalho, e em |3|.

Damos a seguir uma lista de variáveis escalares usadas, alertando que algumas são temporárias e auxiliares da execução do programa, só podendo ser entendidas dentro dele:

Escalares:

- AA : Atraso Aleatório
- AB : Atraso de Paradas
- AIV : Variável temporária, indicando verde efetivo, usada no cálculo do atraso aleatório.
- AO : Variável auxiliar para cálculo do atraso total.
- AP : Variável auxiliar, indicando número total de veículos chegando ao cruzamento por ciclo.
- ARI1 : Variável temporária usada na redução a int. de tempo.

ARI2 : Variável temporária usada na redução a int. de tempo.

AT : Atraso Total

AU : Atraso Uniforme

AVI : Variável temporária usada na redução a int. de tempo.

A6 : Atraso de fila, ao ser utilizada no processo de otimização

A7 : Atraso aleatório ao ser utilizado no processo de otimização.

A8 : Atraso de paradas, ao ser utilizado no processo de otimização.

C : Ciclo dos semáforos da rede (em segundos)

DIN : Quantidade de veículos que passam no ramo M por DT.

DT : Intervalo de Tempo (C/50)

F : Fator de dispersão dos veículos no ramo.

I : Variável indicadora auxiliar.

IA : Fase do semáforo em que chega o ramo M.

IB : Cruzamento onde chega o ramo M.

IC : Tempo de Ciclo em inteiro.

IM : Número total de cruzamentos da rede.

IPX : Chave auxiliar usada nos passos do processo de otimização

ITM : Tempo de percurso do carro mais rápido.

IX : Variável auxiliar usada no cálculo de histogramas de GO(M,K) de ramos intermediários.

J : Variável auxiliar , indicando fase.

- JK : Número do cruzamento que está sendo alterado, no processo de otimização.
- K : Variável auxiliar indicando intervalo de tempo.
- KK : Variável auxiliar indicando int. de tempo (K-1)
- KKK : Variável auxiliar utilizada no processo de otimização.
- KR : Variável auxiliar usada no cálculo de $Q(M,K)$.
- LL : Variável auxiliar que permite pesquisa de todos os ramos até o ramo M ($LL=M-1$)
- LMN : Chave indicadora auxiliar da construção da matriz $L(I,J,K)$.
- LN : Variável auxiliar usada para construção da matriz $L(I,J,K)$
- M : Número índice do ramo.
- MIG : Chave indicadora utilizada no processo de otimização.
- MIT : Chave indicadora utilizada no processo de otimização.
- MM : Número total de ramos na rede.
- MX : Variável temporária para conversão em DT.
- MY : Variável temporária para conversão em DT.
- NP : Número índice da passagem do processo de otimização.
- NPI : Chave para repetição dos histogramas de $Q(M,K)$ e $GO(M,K)$.
- NPM : Número total de passagens do processo de otimização.
- TM : Tempo de percurso dos carros mais rápidos (em segundos).
- TT : Tempo de percurso médio dos veículos no ramo M, em DT.

IV.3 - A ENTRADA DE DADOS

No programa COSE II, requerem-se dados dos ramos que compõe a rede, dos semáforos existentes nos cruzamentos, e sobre as passagens que serão utilizadas no processo de otimização.

a) Dados de Ramos:

- Número de ramos na rede, e quais os de entrada e os intermediários
- Fluxo real nos ramos (veic/h)
- Fluxo máximo nos ramos (veic/h)
- Tempo médio de percurso dos ramos (s)
- Porcentagens de conversão dos veículos ao fim dos ramos
- Número do cruzamento aonde chega o ramo
- Número da fase do cruzamento aonde chega o ramo

b) Dados de Semáforos:

- O ciclo fixo a ser usado (s)
- Os verdes máximos e mínimos de cada fase (s)
- O verde inicial (s)
- O tempo perdido no ciclo (s)
- A defasagem inicial do semáforo (s)

c) Dados do Processo de Otimização:

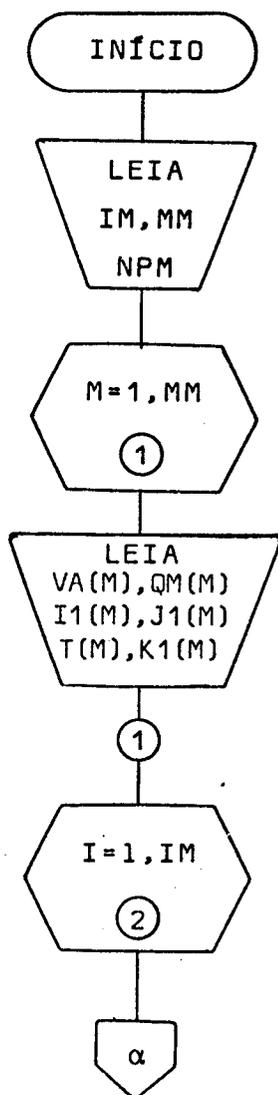
- O número de passagens no processo
- A variável que será modificada
- O módulo da variação desejada (em DT)

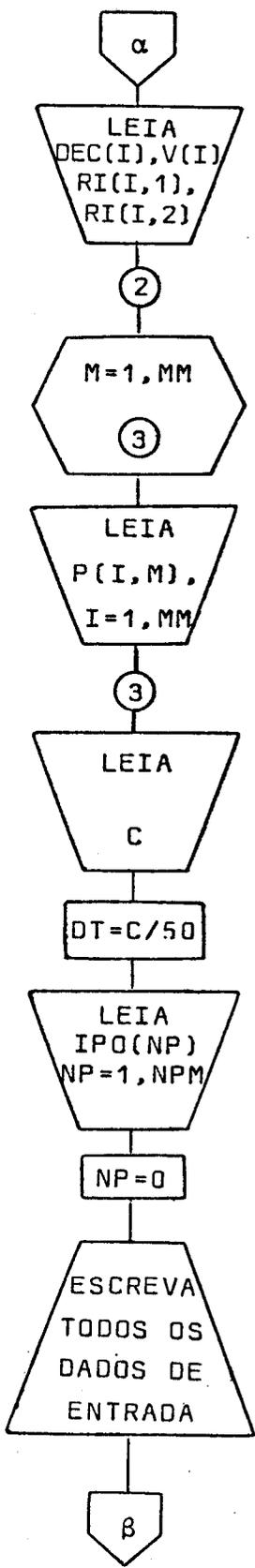
Todos os dados do programa em que interfira a unidade de tempo, devem ser trabalhados para que aquela seja sempre usada em intervalos de tempo (DT) . Recordar-se que

$$DT = \frac{C}{50}$$

onde C é o ciclo comum a todos os cruzamentos, que melhor atende ao critério de minimizar o atraso global da rede. O modo de calculá-lo é visto de maneira bastante detalhada em [6].

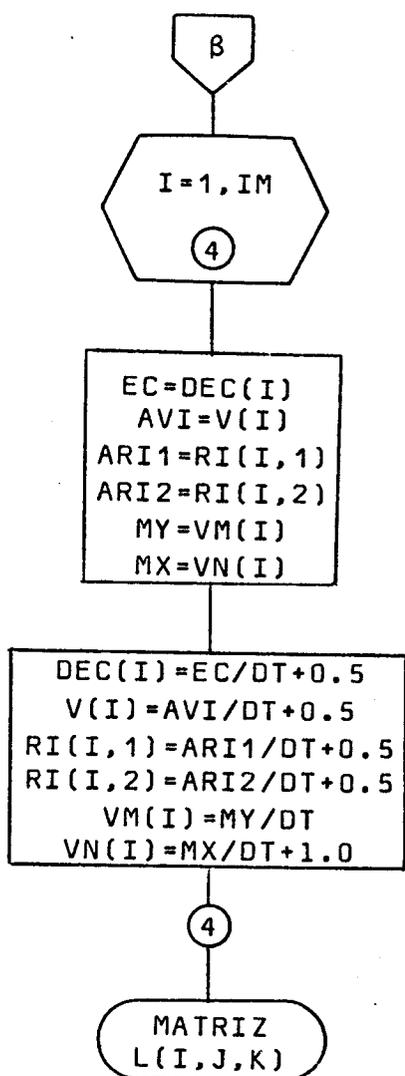
O diagrama de blocos que indica o processo de entrada e preparação inicial dos dados é:





(Chave que inicializa o índice da passagem do Proc. de Otimização)

(Para simples conferência)



(Conversão dos dados, de segundos em intervalos de tempo)

IV.4 - A MATRIZ $L(I,J,K)$

A Matriz $L(I,J,K)$ representa a estrutura de funcionamento dos faróis da rede. Ela informa o estado da fase (J) do semáforo no cruzamento (I), num dado instante (K). E é através dela que indicaremos e alteraremos no programa a defasagem de cada semáforo e a duração dos tempos de verde de cada uma de suas fases, no transcorrer da otimização.

Para um semáforo individualizado ela se apresenta como abaixo (*):

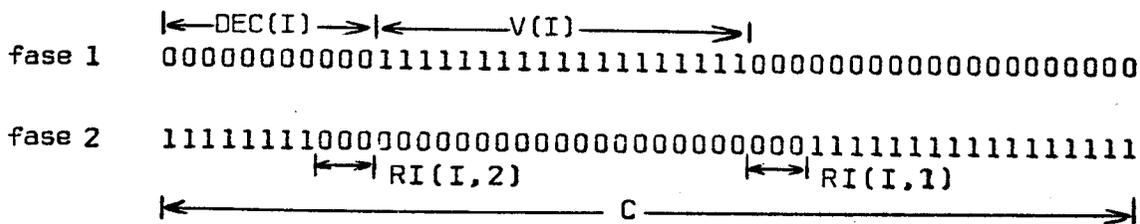


Fig. 8 : A matriz $L(I,J,K)$

onde

$L(I,J,K) = 0$ representa vermelho

$L(I,J,K) = 1$ representa verde

Adverte-se aqui que, conforme visto em |3|, $V(I)$ é o verde efetivo da fase 1 do cruzamento I, e que, simplifcadamente,

$$RI(I,1) + RI(I,2) = \text{Tempo perdido total no ciclo}$$

Além disso, têm de ser obedecidas as restrições de Verde Máximo e Mínimo possíveis, vistas no Cap. III.

Utiliza-se no programa uma variável auxiliar:

LN : Indicador dos instantes em que $L(I,J,LN) = 0$ ou

$$L(I,J,LN) = 1$$

(*) Todos os semáforos tratados no programa têm apenas duas fases, mas ela indica estruturas de semáforos de três ou mais fases.

Faz-se inicialmente uma pesquisa da fase do semáforo, e prossegue-se com:

Se fase 1 : O ponteiro LN percorre K casas, de DEC(I) a DEC(I) + K, com $K = 1, V(I)$. Nesse intervalo

$$L(I, J, LN) = 1$$

No intervalo complementar em relação ao ciclo, teremos

$$L(I, J, LN) = 0$$

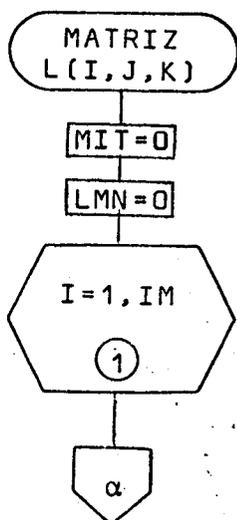
Se fase 2 : O ponteiro LN percorre K casas, agora de DEC(I) - RI(I,1) a DEC(I) - RI(I,1) + K, com $K = 1, (V(I) + RI(I,1) + RI(I,2))$. Nesse intervalo:

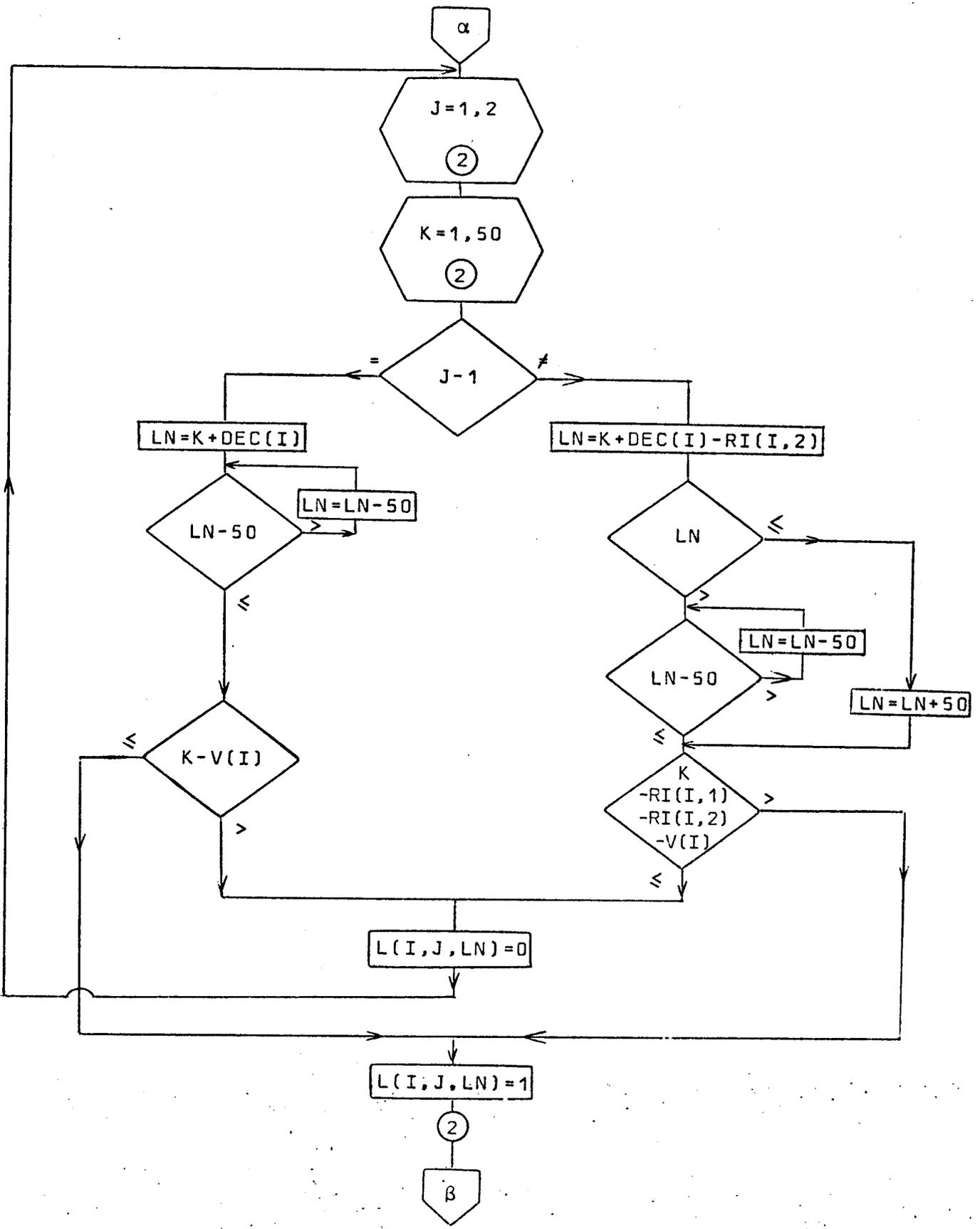
$$L(I, J, LN) = 0$$

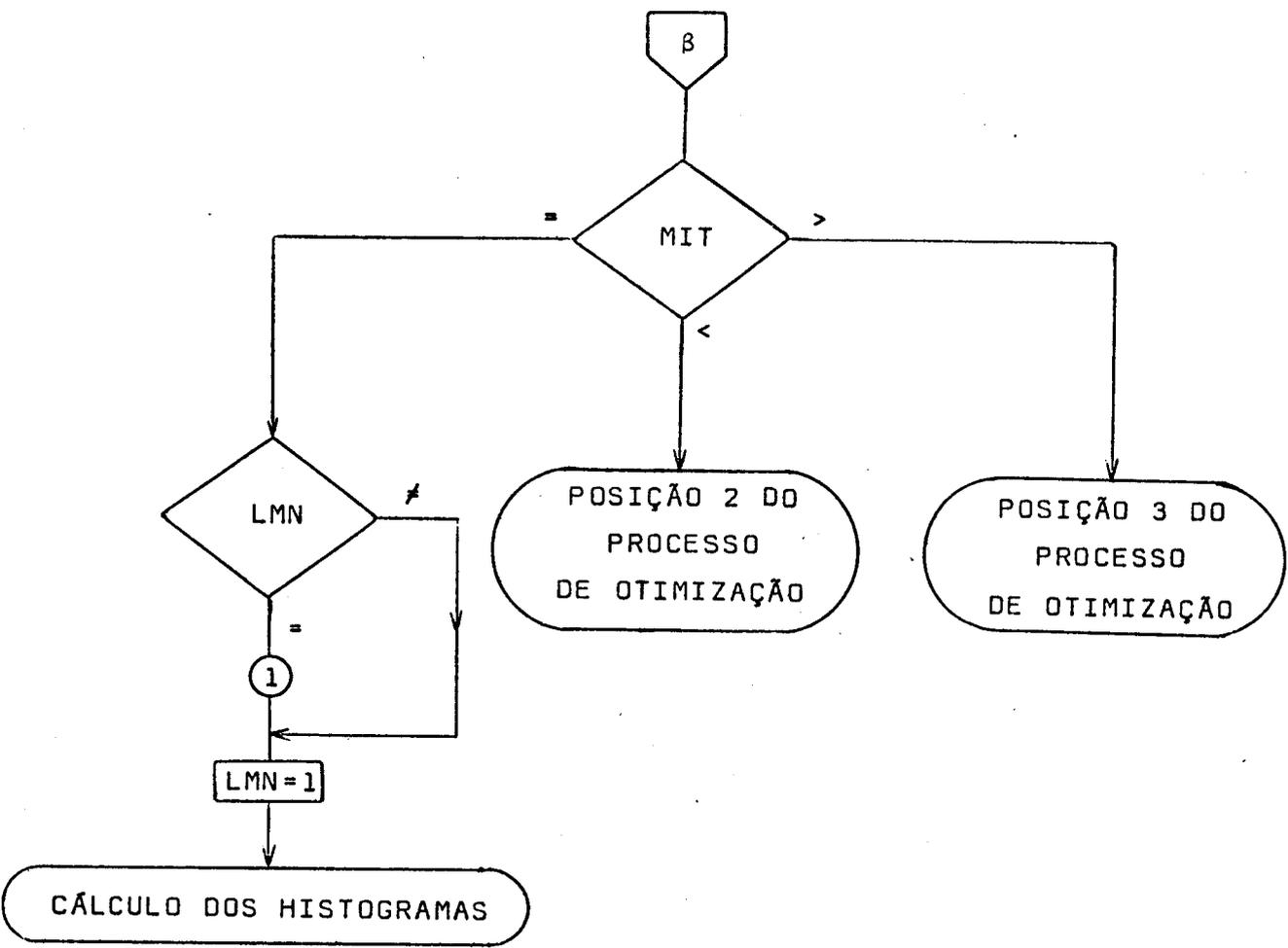
E no intervalo complementar em relação ao ciclo:

$$L(I, J, LN) = 1$$

Adota-se o procedimento para todos os semáforos da rede, e o funcionamento da matriz no programa pode ser entendido no diagrama de blocos a seguir:







IV.5 - O CÁLCULO DOS HISTOGRAMAS

Já definida a situação de cada semáforo, passa-se ao cálculo dos histogramas, que indicam como se comporta o fluxo de veículos nos ramos da rede, dada a regulação de semáforos.

Deve-se calcular inicialmente histogramas referentes a ramos de entrada, já que os histogramas de ramos intermediários formam-se a partir deles. Portanto, o programa do COSE II prescinde dos fluxos reais que ocorrem nos ramos intermediários, já que estes são gerados na própria execução do programa.

Antecipa-se então um problema de enumeração dos ramos da rede (que será aprofundado no cap. V). Dada uma rede, como por exemplo:

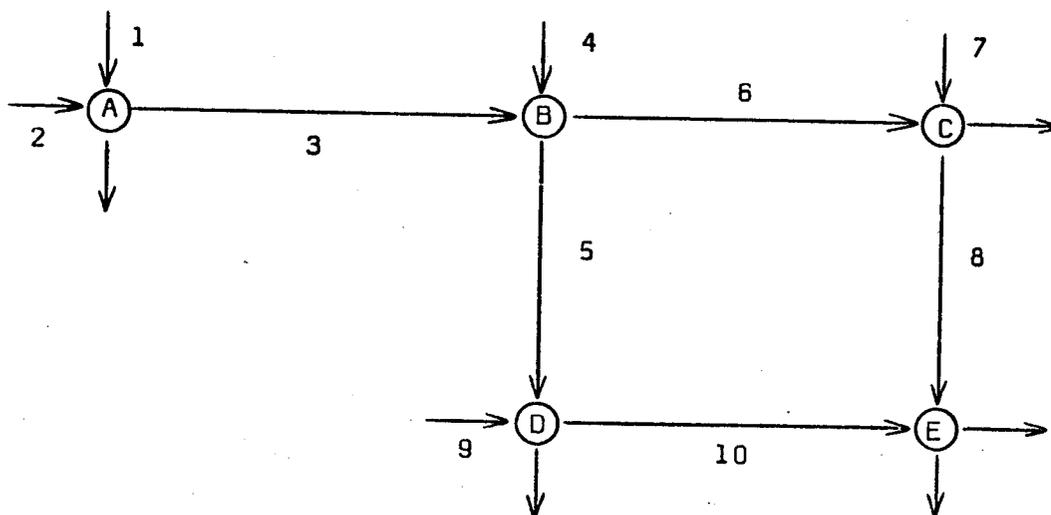
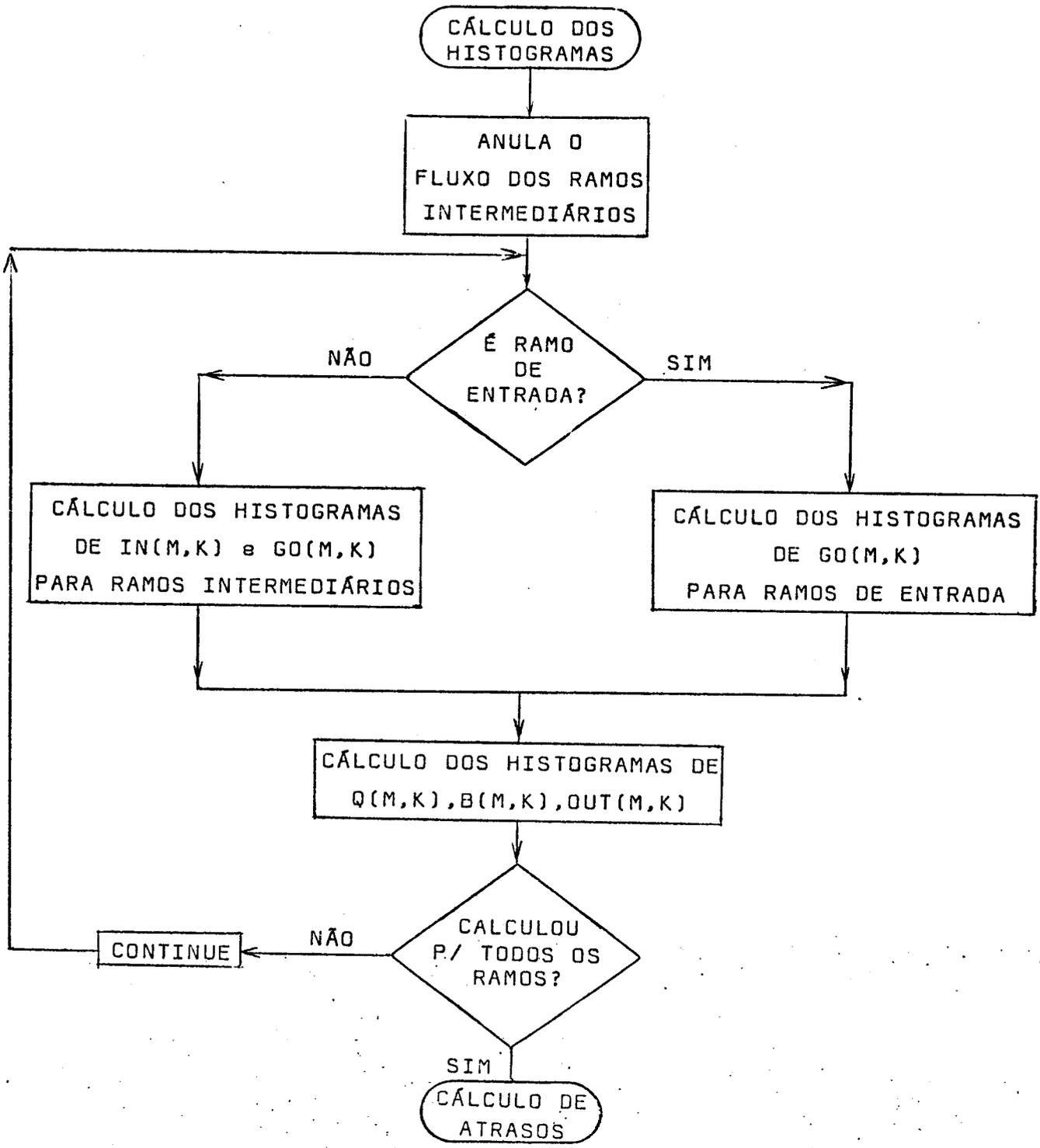


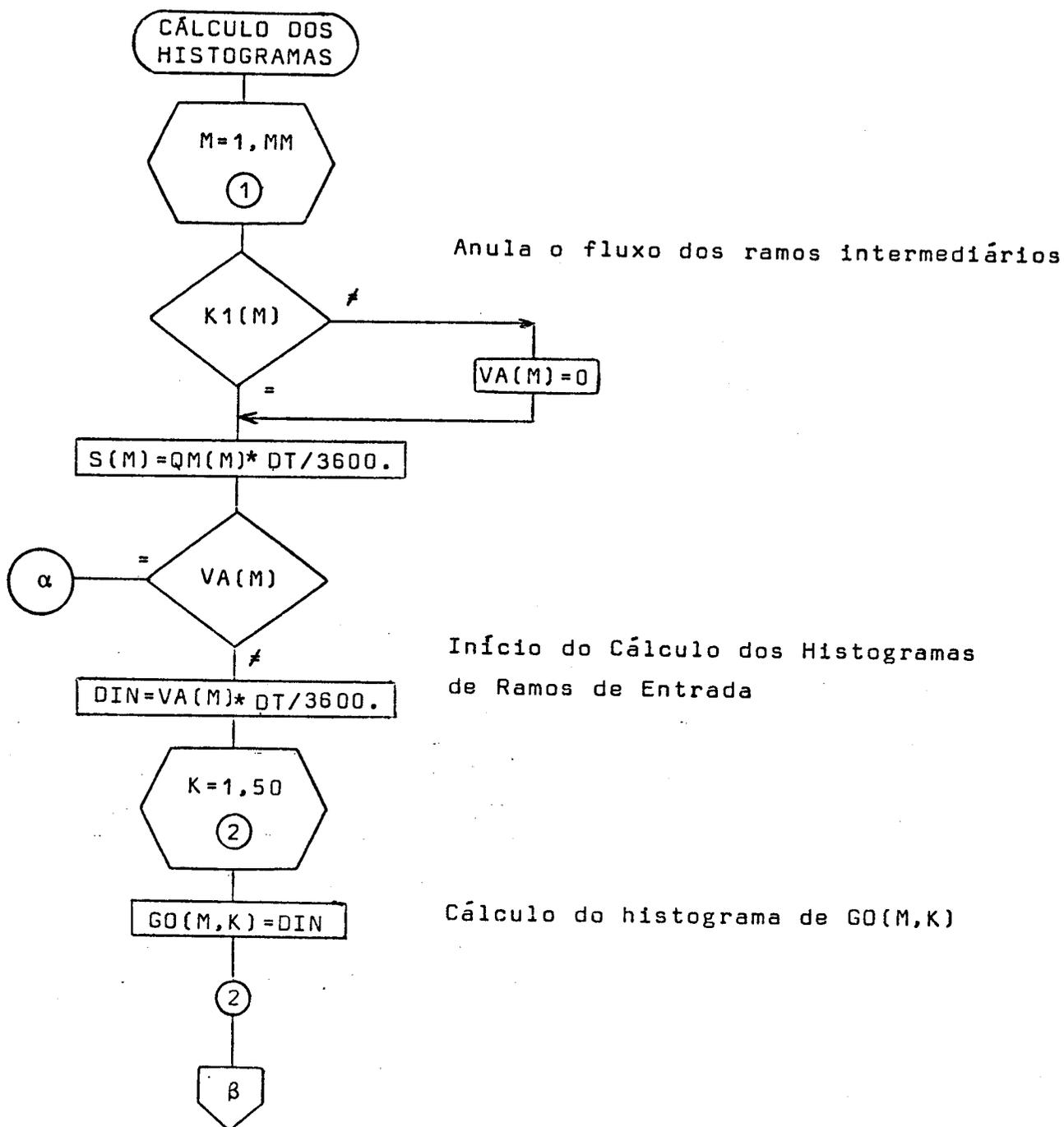
Fig. 9 - Enumeração dos ramos da rede.

Uma das enumerações corretas é a apresentada. O programa calcula os histogramas do ramo 1 (que independe dos demais ramos), passa ao cálculo do ramo 2 (que também independe dos demais), e só agora calcula o ramo 3, dependente dos histogramas de 1 e 2 já calculados. Calcula o ramo 4, depois o ramo 5, que depende de 3 e 4 já calculados, e assim sucessivamente, seguindo a enumeração da aos ramos.

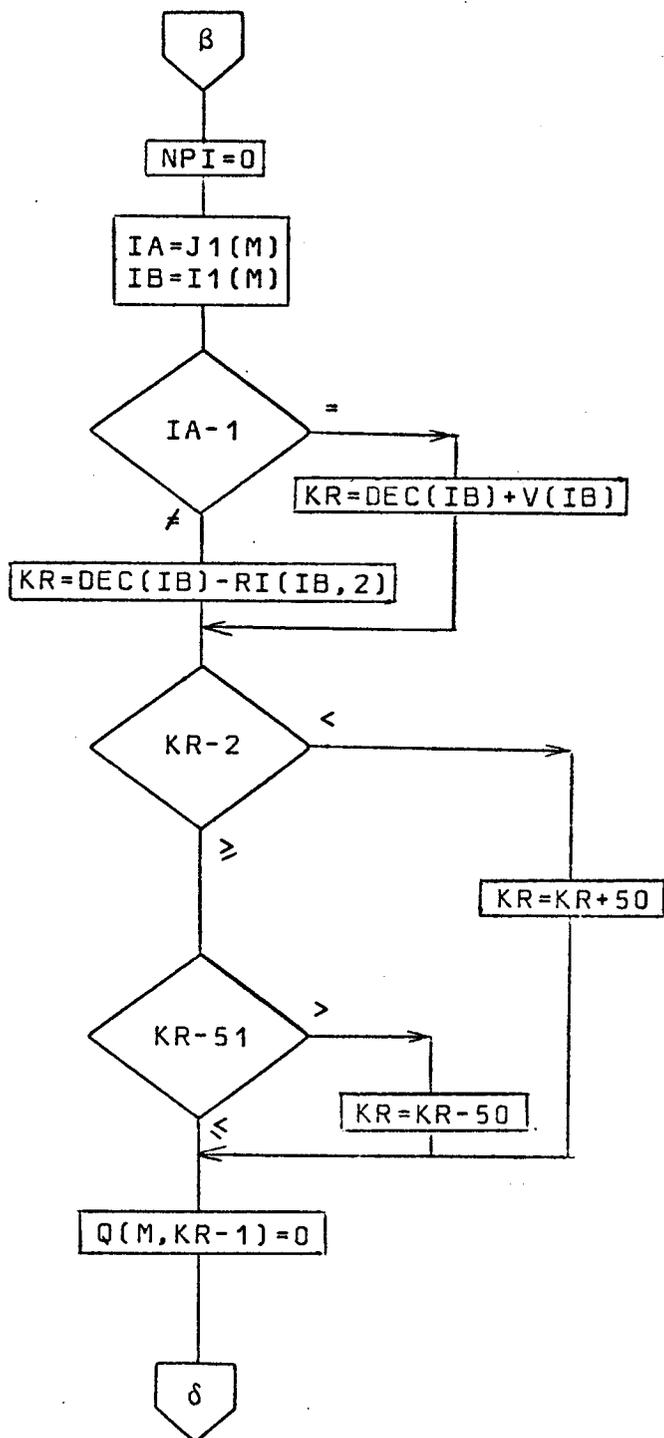
A parte do programa de Cálculo dos Histogramas pode ser resumida em

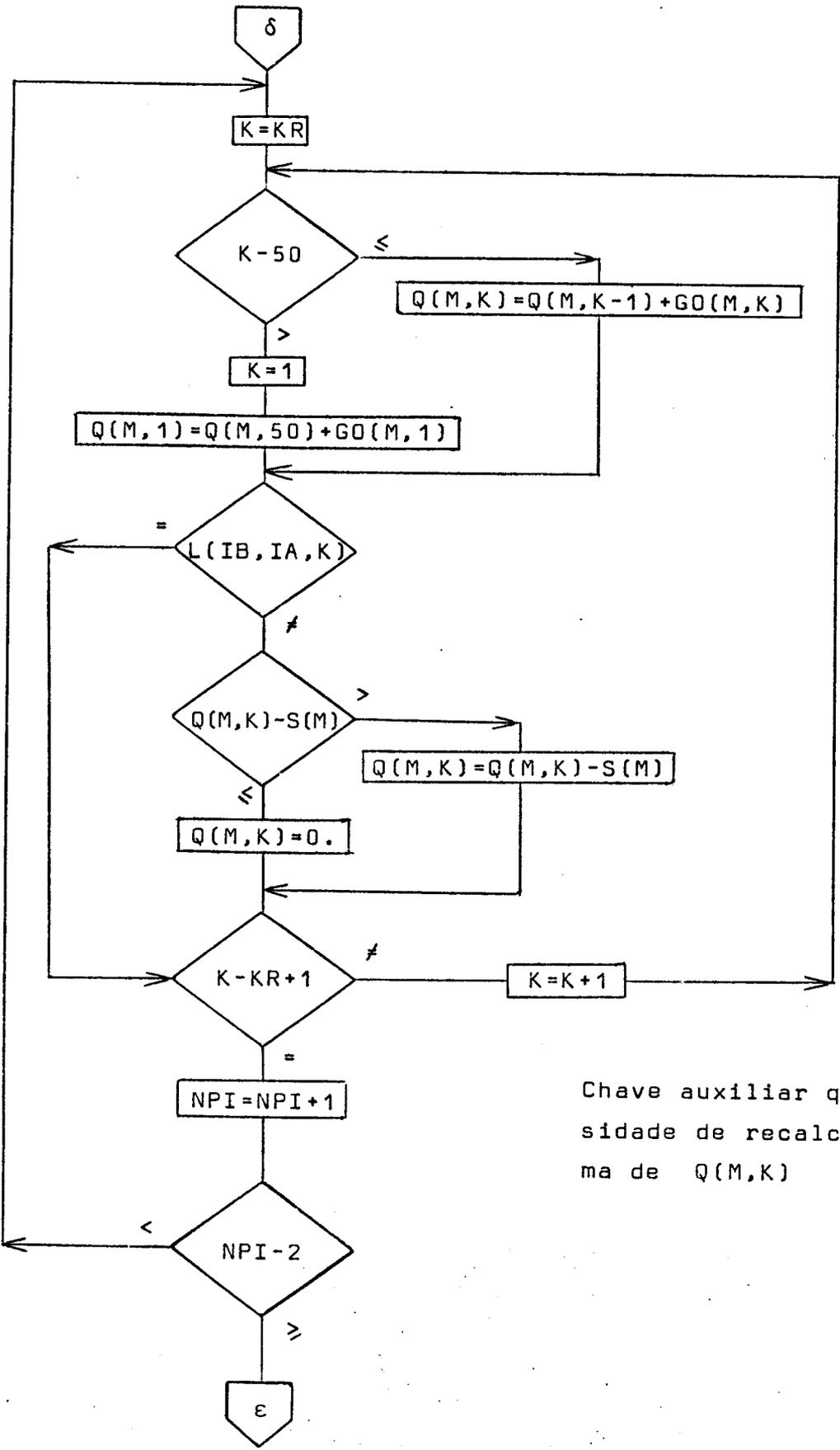


O diagrama de blocos detalhado analisa inicialmente o cálculo dos histogramas para ramos de entrada e posteriormente os histogramas dos ramos intermediários.

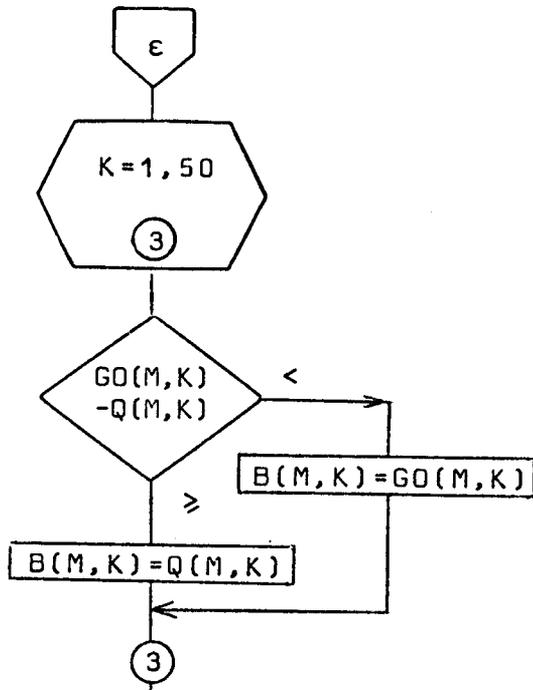


Dada a fase IA do cruzamento IB a que chega o ramo M, e com auxílio da variável KR, tem-se o cálculo do histograma de $Q(M,K)$

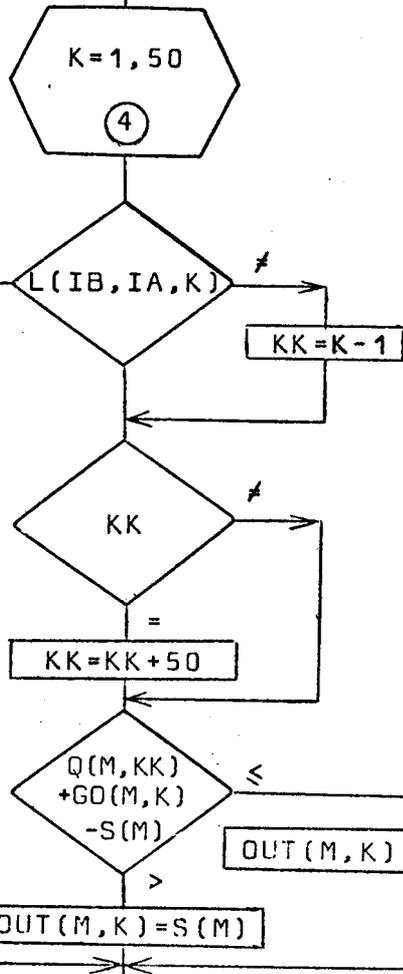




Chave auxiliar que indica necessidade de recalcular o histograma de $Q(M,K)$



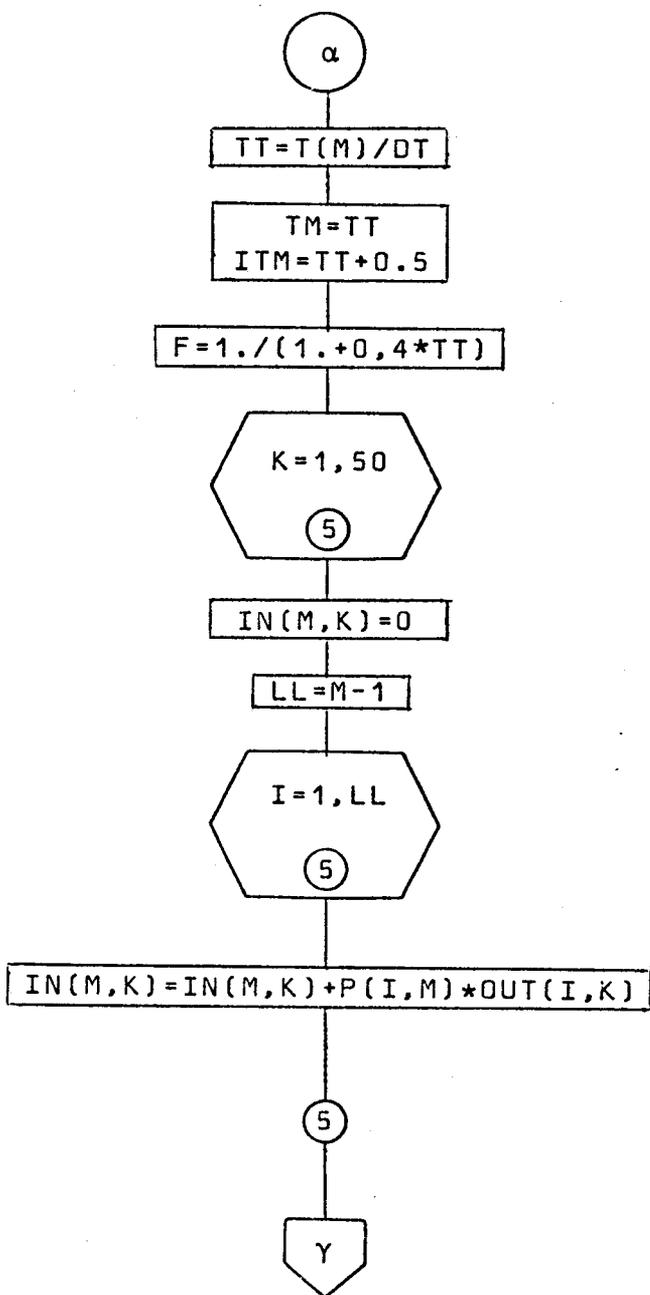
Cálculo do histograma de B(M,K)



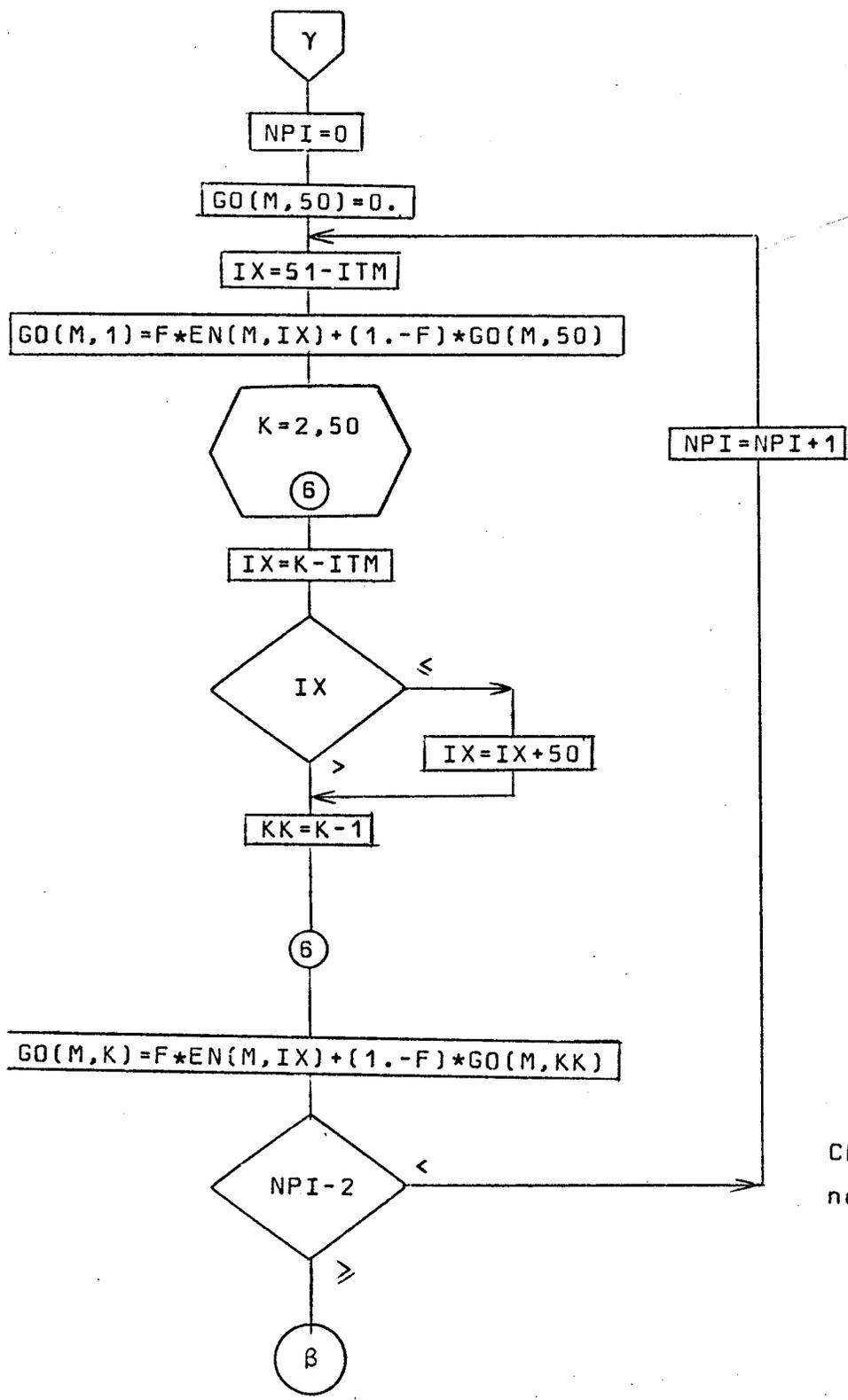
Cálculo do histograma de OUT(M,K)

CÁLCULO DOS ATRASOS

Agora os histogramas dos ramos intermediários:



Cálculo dos histogramas de IN(M,K)



Cálculo do histograma de GO(M,K)

Chave que indica necessidade de repetição

E o cálculo dos histogramas de Q(M,K), B(M,K) e OUT(M,K) pode ser feito pela mesma parte do programa apresentado para os ramos de entrada.

IV.6 - O CÁLCULO DOS ATRASOS

Baseando-se nos histogramas de cada ramo, o programa passa a calcular os Atrasos para toda a rede, que virão a ser utilizados como índice de performance de uma dada situação de regulação dos faróis.

Inicia-se o cálculo pelo Atraso Uniforme, obtido através da integração dos comprimentos de fila ao longo do ciclo em toda a rede, como indicado na seção II.3.1 deste trabalho.

O Atraso Aleatório é calculado para cada ramo, como função do grau de saturação $(X(M))$. Simultaneamente ao cálculo, faz-se a soma dos Atrasos Aleatórios de todos os ramos, obtendo-se ao final o Atraso Aleatório total da rede.

Recorda-se de [3] que $X(M)$ é definido para cada ramo M por:

$$X(M) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de veículos que chegam ao cruzamento num ciclo}}{\text{n}^\circ \text{ máximo de veículos que pode passar no ciclo}}$$

No programa ele é calculado com auxílio de uma variável:

$$AP = \sum_{K=1}^{50} GO_M^K \quad (\text{para o numerador})$$

onde AP poderia calcular-se por outra somatória, pois

$$\sum GO = \sum IN = \sum OUT$$

sendo o número máximo de veículos por ciclo

$$(S(M) \cdot AIV) \quad (\text{para o denominador})$$

Utiliza-se ainda $X(M)$ como chave auxiliar para detetar possíveis erros de dados (como nos verdes máximo e mínimo, por exemplo) que impossibilitem a correta execução do programa. Exige-se para que este prossiga que:

$$X(M) < 1$$

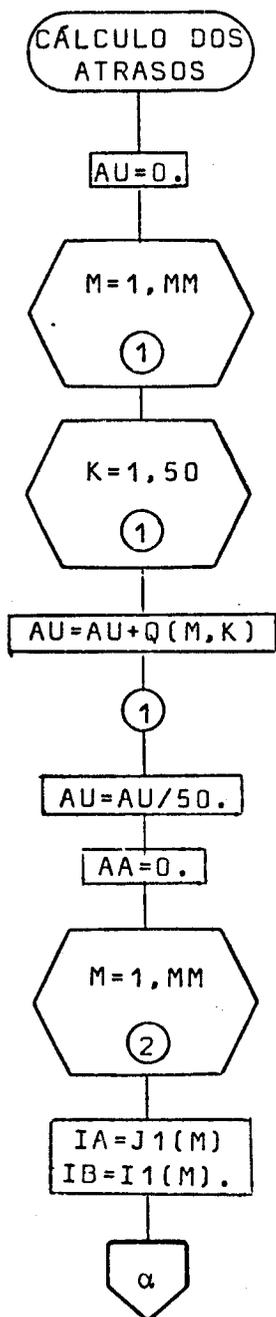
O Atraso de Paradas é calculado somando-se todas as paradas que os veículos efetuaram em toda a rede durante o ciclo, pena

lizando a cada uma delas com um fator de (8s) de atraso (Naturalmente, tal penalização também deve ser reduzida a DT, que é a unidade de tempo do programa).

Finalmente, o Atraso Total da rede é obtido por:

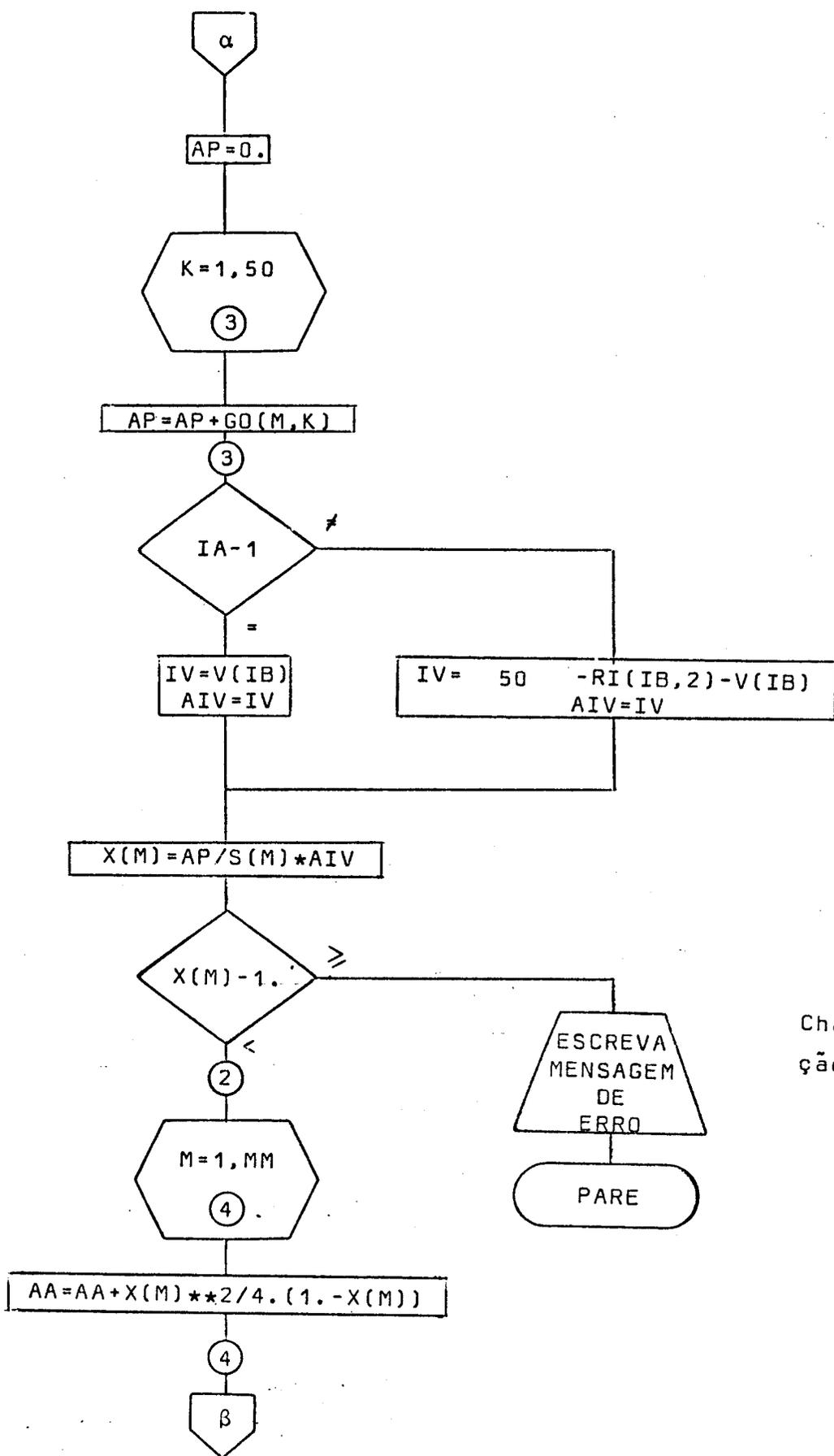
$$AT = AU + AA + AB$$

A seguir, dá-se o diagrama de blocos dessa parte do programa:

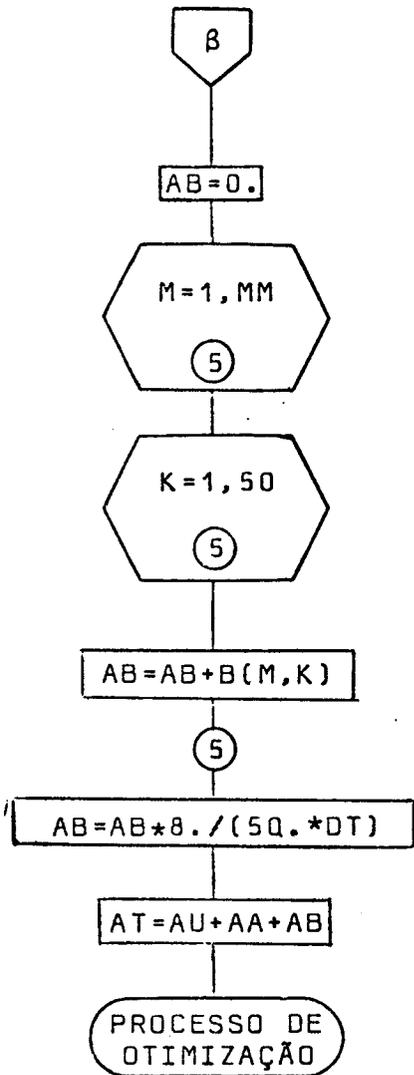


Cálculo do Atraso Uniforme

Cálculo do Atraso Aleatório



Chave de verificação de X(M)



Cálculo do Atraso de Paradas

Cálculo do Atraso Médio Total

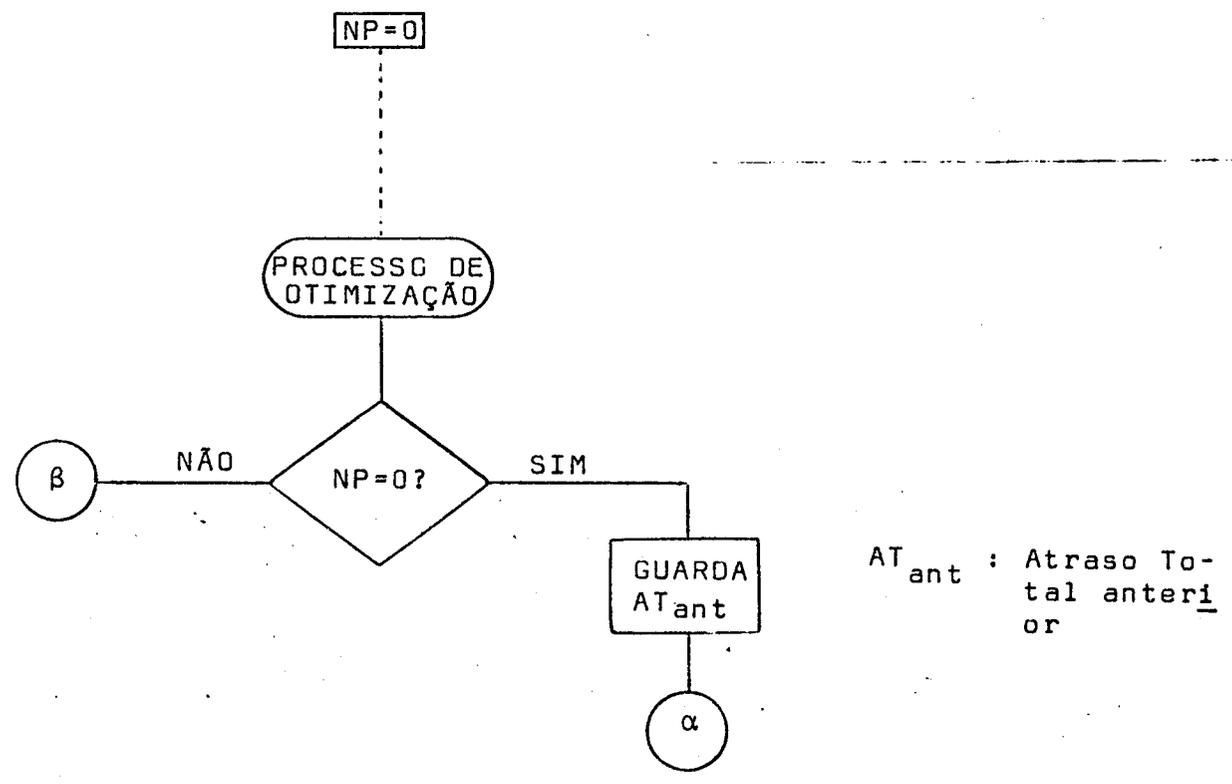
IV.7 - O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

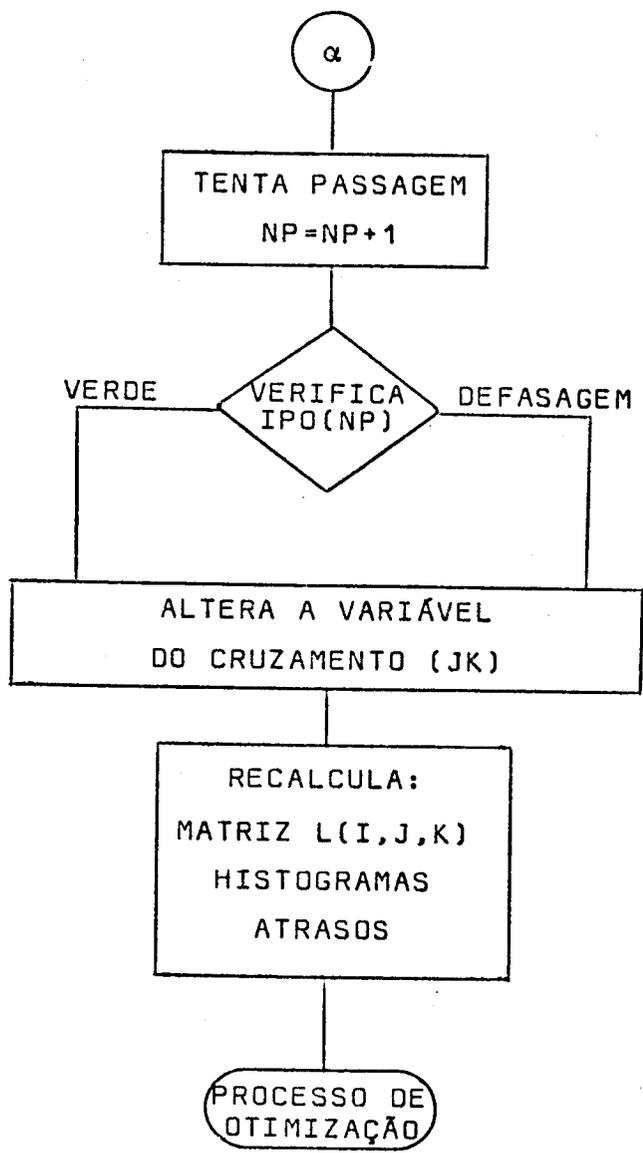
O processo de otimização já foi descrito no cap. III desta tese. Conquanto a idéia seja bastante simples, sua execução é a parte mais complicada deste trabalho, e seria muito árdua sua compreensão a partir das variáveis usadas na execução do programa.

Chama-se a atenção para três delas:

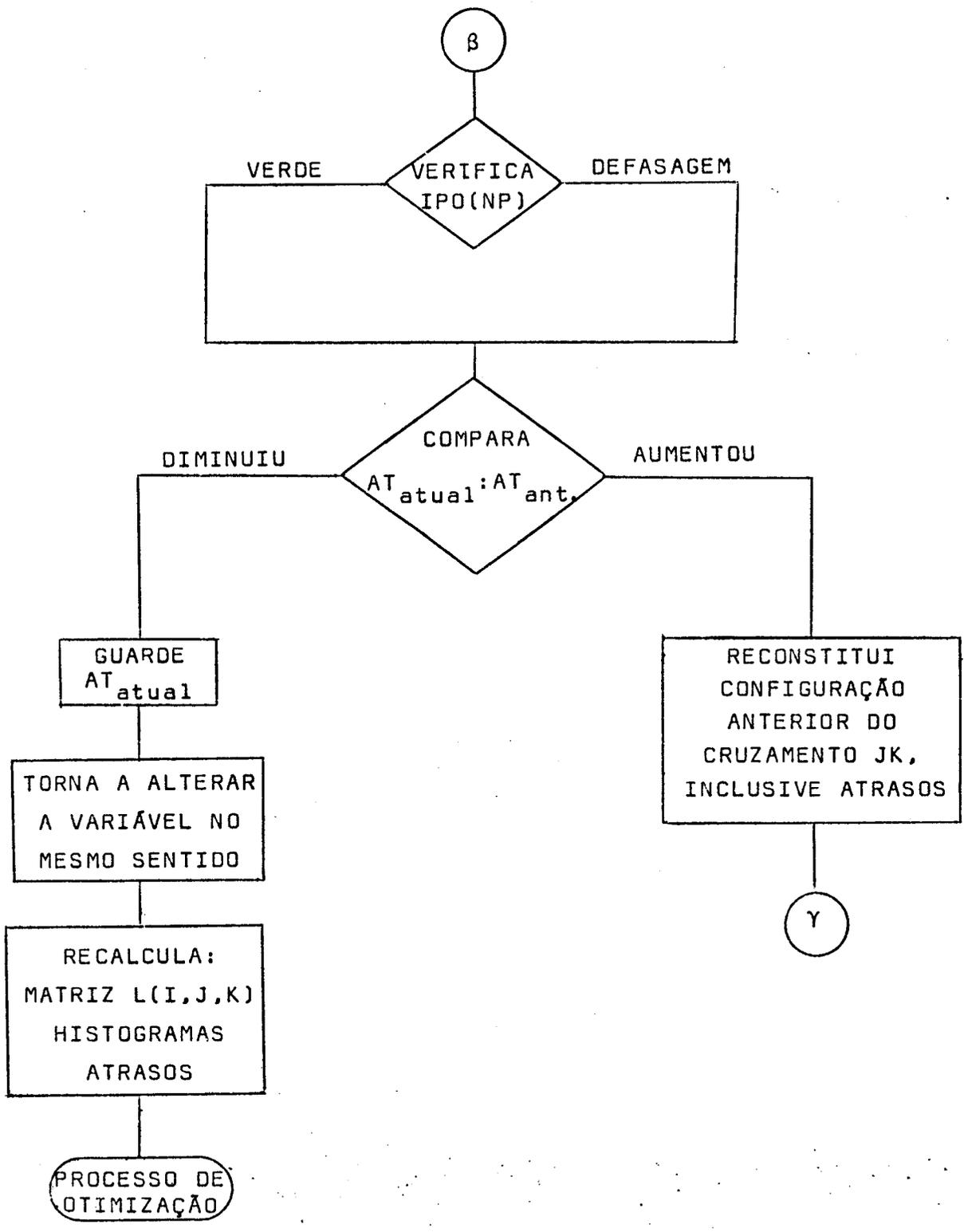
- NP : Variável indicadora da passagem do processo de otimização que se está usando.
- IPO(NP) : Vetor que armazena a variável a alterar numa determinada passagem do processo de otimização, seu sinal + indica defasagem, - indica verde, e o módulo de IPO(NP) indica o "quantum" de sua variação.
- JK : Variável indicadora do cruzamento que se está alterando.

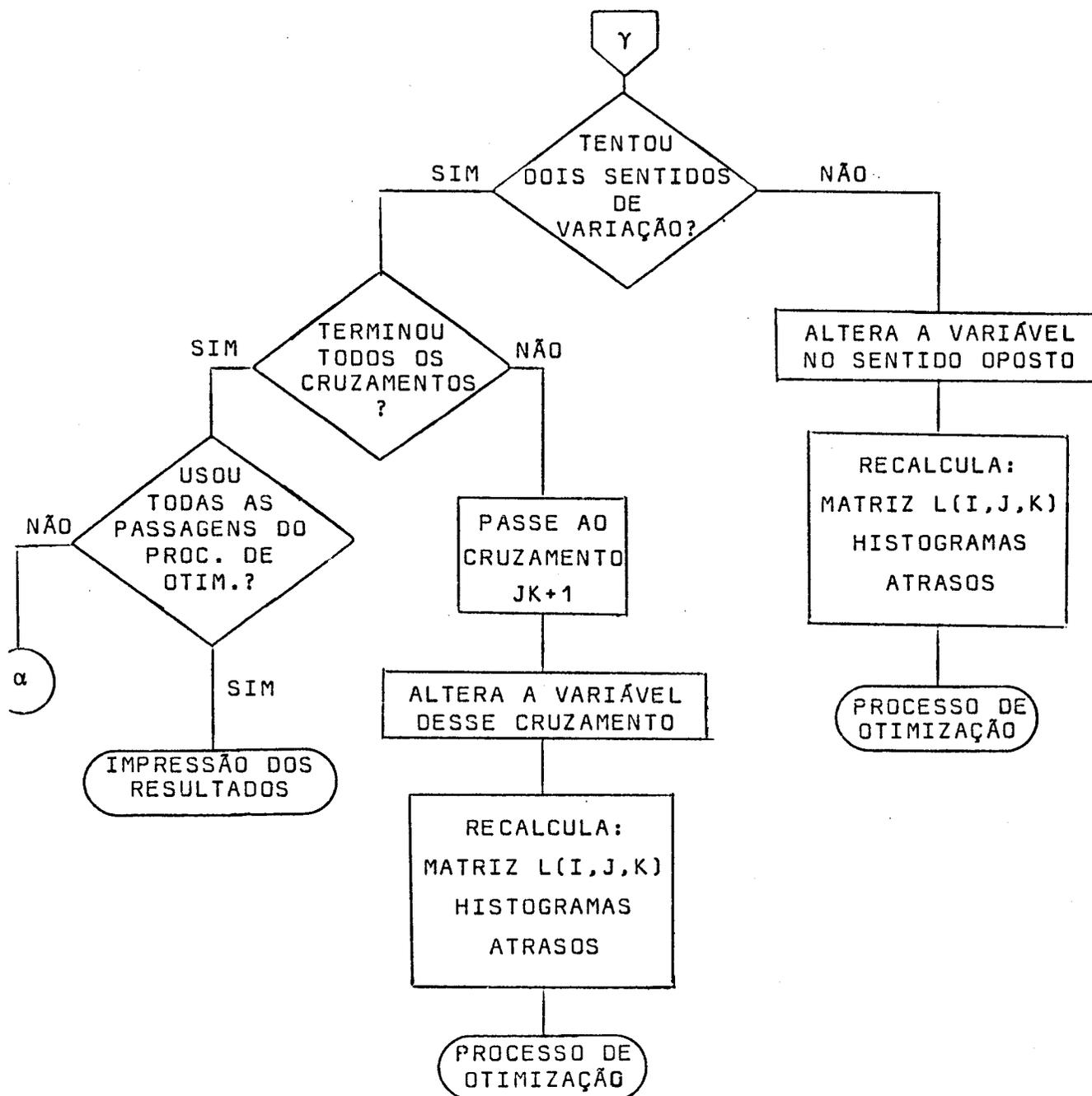
Apresenta-se a seguir o diagrama de blocos simplificado:



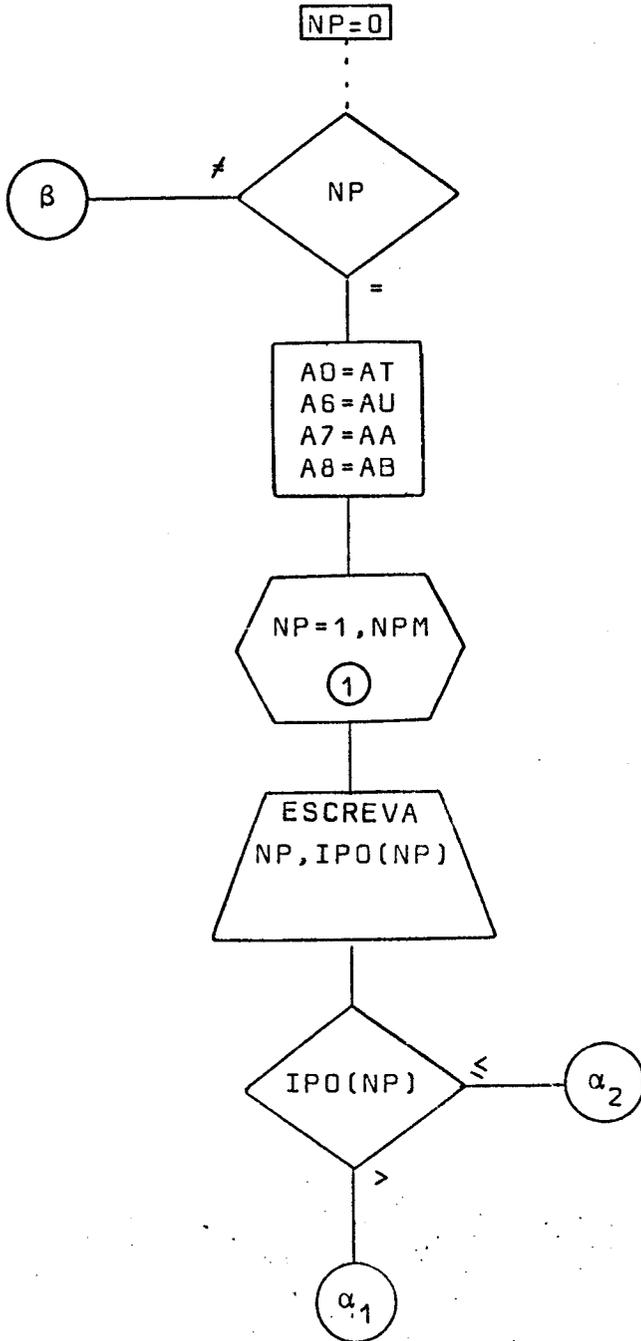


Caso já se tenha utilizado uma vez o processo de otimização o programa opta por:





Passando-se agora ao diagrama de blocos detalhado do programa do processo de otimização.

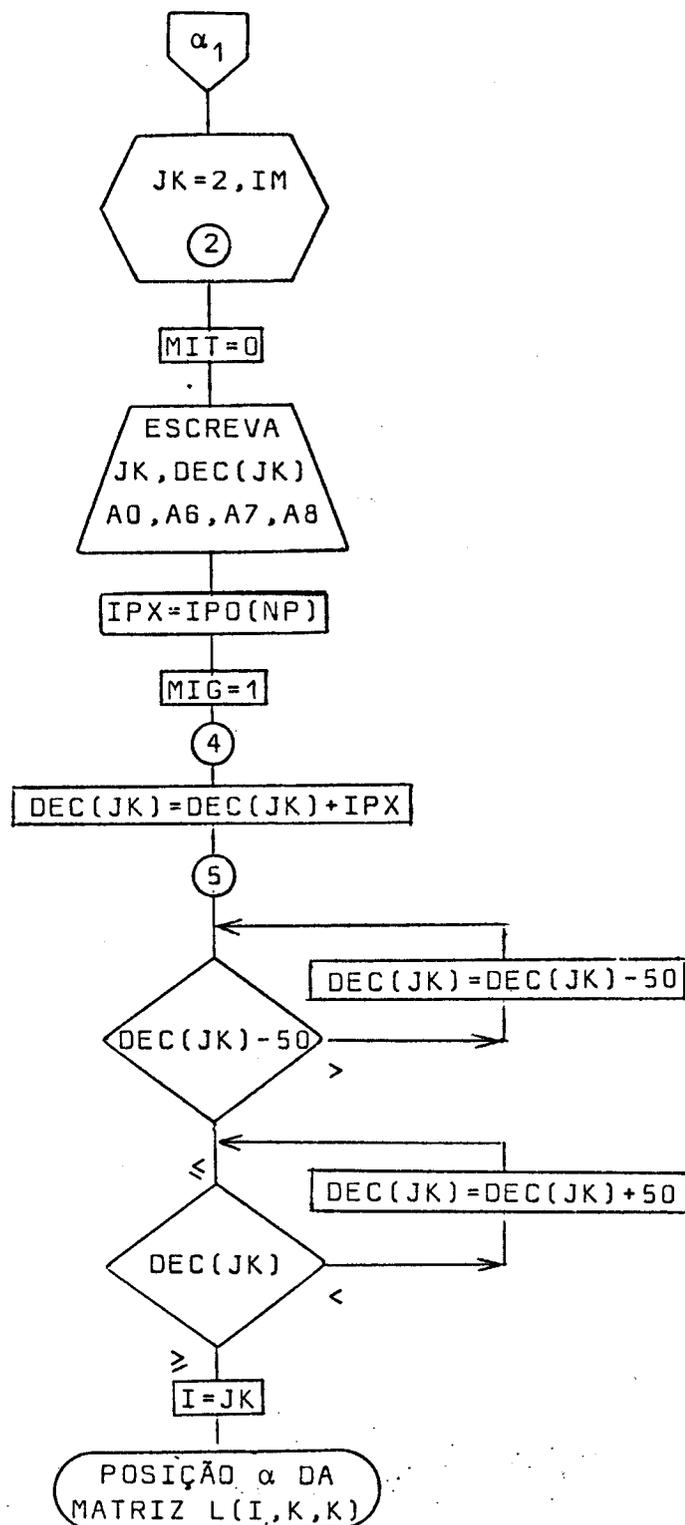


Armazena os atrasos

Para acompanhar o processo através da listagem do programa.

Define que a variável a alterar é o verde

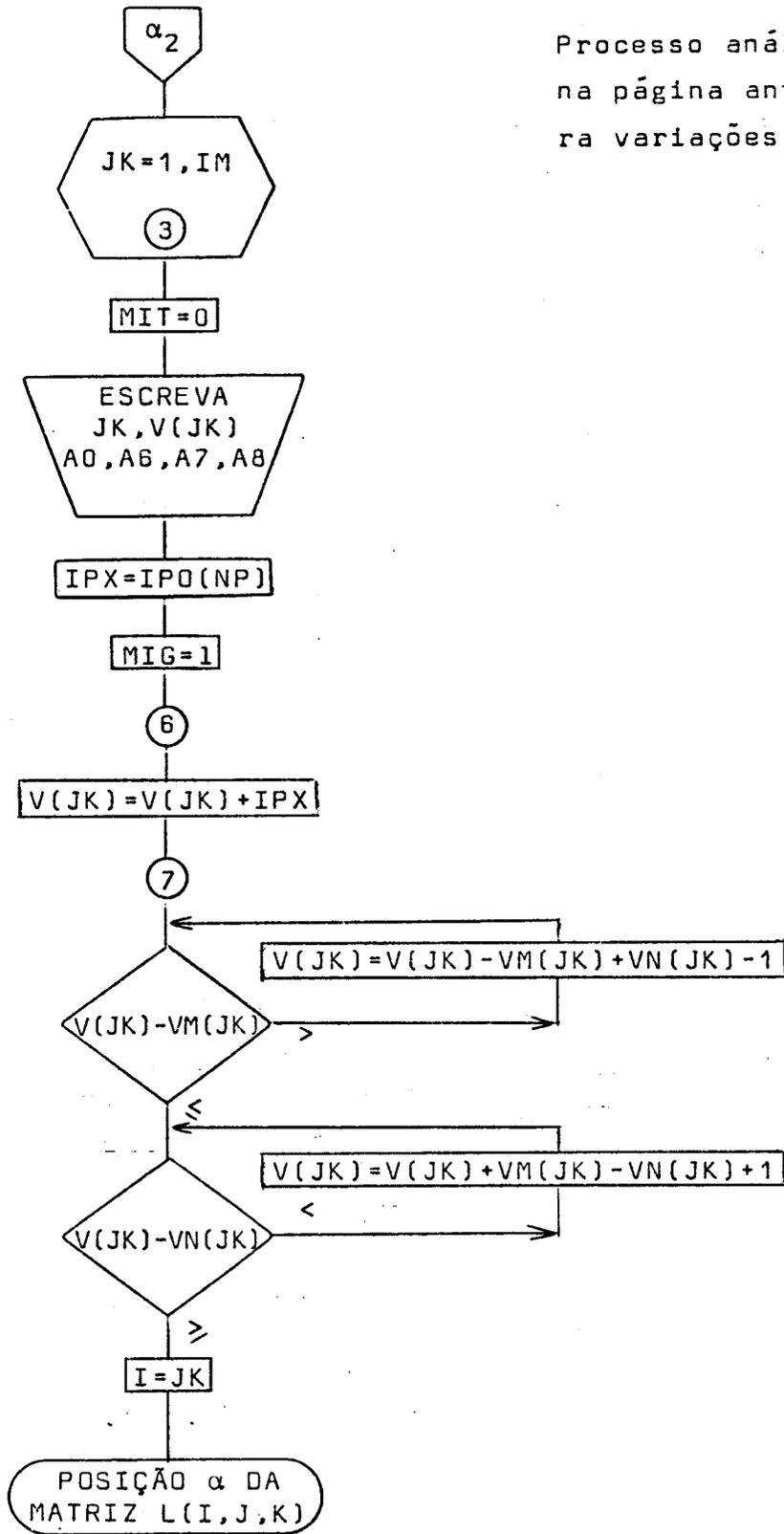
Define que a variável a alterar é a defasagem



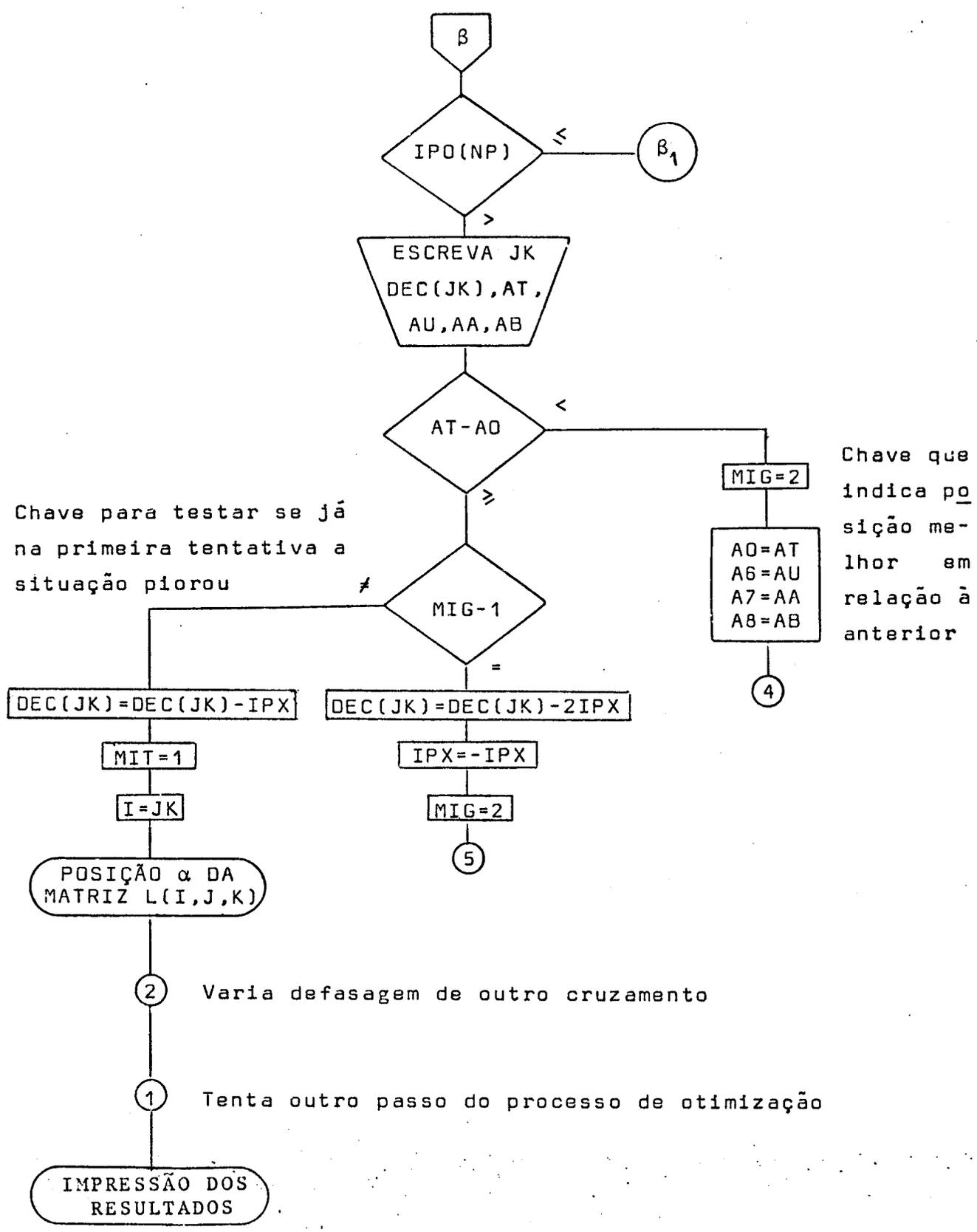
Chave controlada da
matriz $L(I,J,K)$

Indica uma primeira al
teração de defasagem

Guarda o cruzamento que
foi alterado na posição I



Processo análogo ao definido na página anterior, agora para variações de verdes.

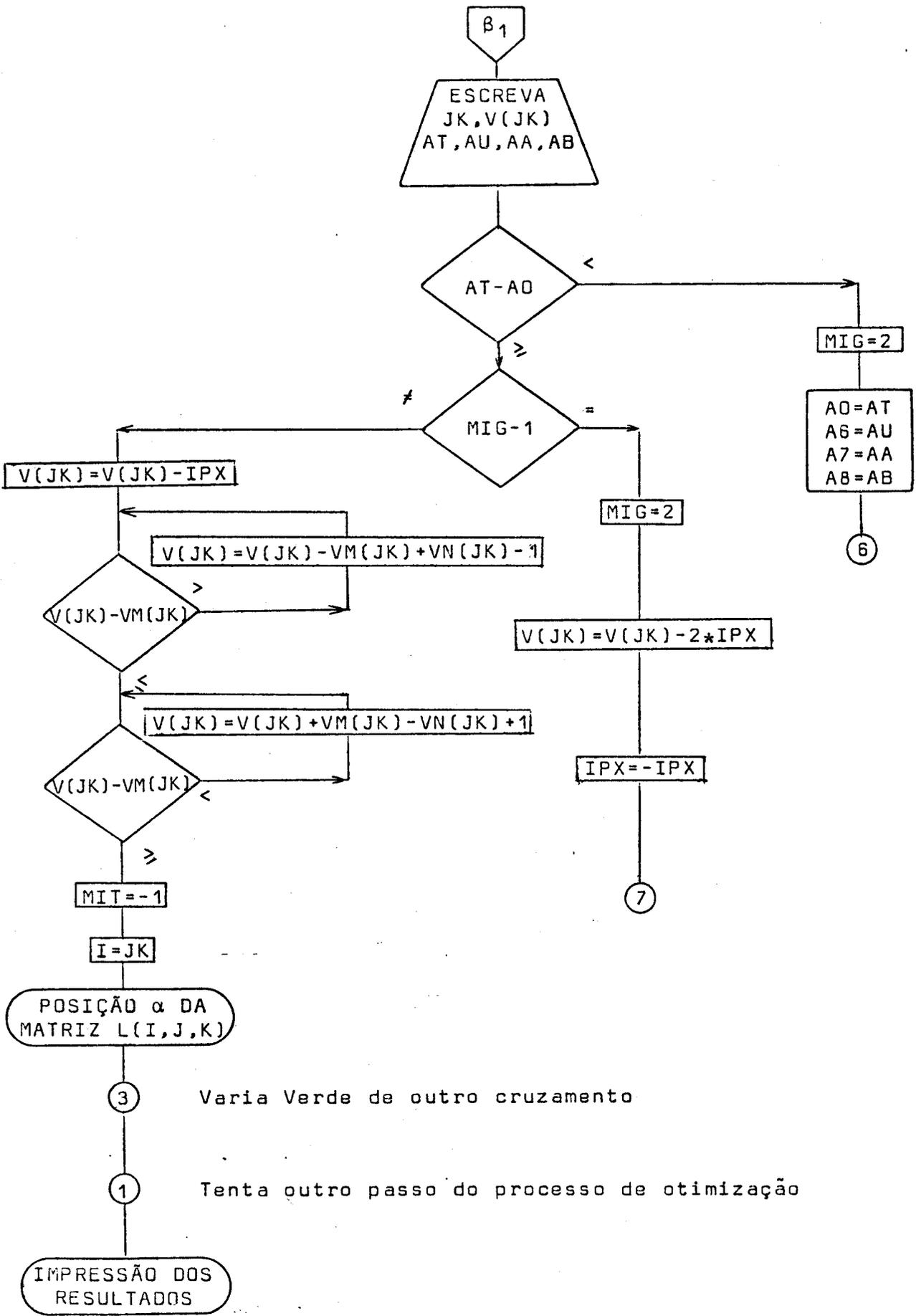


Chave que indica posição melhor em relação à anterior

2 Varia defasagem de outro cruzamento

1 Tenta outro passo do processo de otimização

IMPRESSÃO DOS RESULTADOS



3 Varia Verde de outro cruzamento

1 Tenta outro passo do processo de otimização

IV.8 - A IMPRESSÃO DOS RESULTADOS

Terminado o último passo do processo de otimização, dispõe-se agora das defasagens e dos verdes ótimos de cada cruzamento que minimizam o atraso total da rede.

O programa imprime uma tabela como a do exemplo abaixo (*)

ATRASOS NA REDE

FILA	90.69
ALEATÓRIO	30.21
PARADA	28.09
TOTAL	149.00

OTIMIZAÇÃO - MÉTODO COSE II

CRUZAMENTO	DEFASAGEM	VERDE
1	0	52
2	50	40
3	76	38
4	88	56
5	16	56
6	4	64
7	12	38

onde os atrasos na rede estão em veíc. seg./seg., e as defasagens (referenciadas ao cruzamento 1) bem como os verdes, são dados em segundos.

(*) Os resultados foram retirados da rede apresentada no Cap. V.

CAPÍTULO V

V. A APLICAÇÃO DO MODELO

V.1 - Introdução

O modelo foi aplicado a duas redes de tráfego urbano:

A primeira rede serve como sugestão de indicação dos dados, de enumeração dos ramos, de corte em malhas fechadas, e como critério de comparação interna da utilidade de se variarem defasagens e verdes dos cruzamentos, analisando as reduções percentuais obtidas no índice de performance do COSE II. Os dados foram fornecidos pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, e referem-se a uma rede de ruas do bairro do Paraíso.

A segunda rede foi adaptada de um caso real, para facilitar comparações entre COSE II e os modelos COSE I |4| e SITRA |8|, sendo desenvolvida no capítulo VI - "Comparações e Conclusões", deste trabalho.

V.2 - A rede I (*)

A rede apresentada para aplicação apresenta oito semáforos na seguinte disposição aproximada:

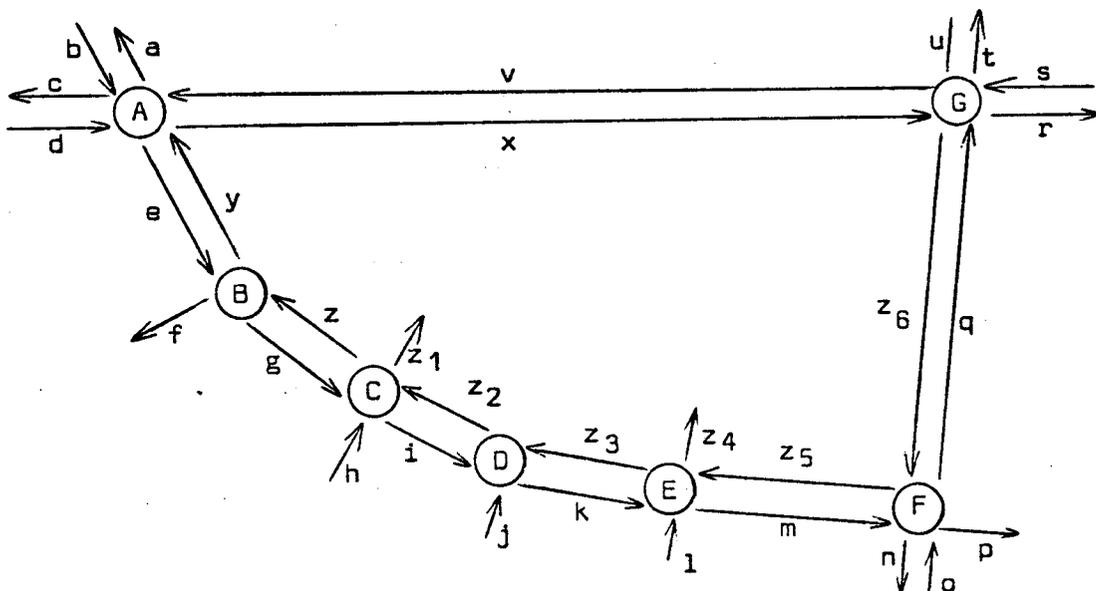


Fig. 10 - Rede de Tráfego Urbano

(*) Os dados e resultados desta rede foram trabalhados em conjunto com o Prof. Dr. Gerard Authié.

Inicialmente, apresenta 31 ramos relacionados com os se máforos. Aliado à rede, têm que ser fornecidos:

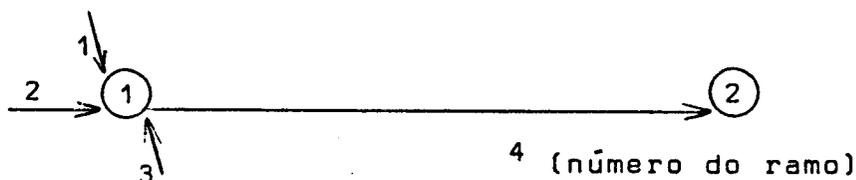
- Os fluxos reais e máximo de cada ramo.
- O tempo de percurso
- As percentagens de conversão ao fim do ramo.
- A fase de chegada ao fim do ramo.

Sugere-se a seguir, em V.2.2 uma representação da rede que apresenta esses dados em conjunto, levando já em consideração apenas os ramos que interessam ao programa, ou seja, de entrada e intermediários. Apresenta-se também a substituição dos nomes dos ramos e dos cruzamentos por números índices, de modo adequado. As convenções utilizadas são as seguintes:

a - A Enumeração dos ramos e cruzamentos

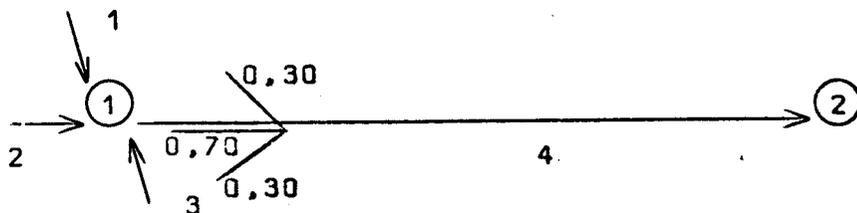
Recorde-se que cada ramo intermediário deve depender apenas de ramos anteriores. Portanto, os ramos que formam outro, têm que ter números índices menores que aquele, de modo que o programa ao calcular pela ordem dos índices os histogramas de cada ramo, faça uso de histogramas anteriormente calculados e já armazenados na memória do computador.

Não há restrições à ordem de enumeração dos cruzamentos. Apenas a de que seja uma sequência de números, de 1 a n. A notação usada será:

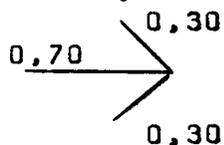


b - Indicação das percentagens de conversão

As percentagens de conversão informam a origem dos fluxos dos ramos intermediários:



A notação



significa que o ramo 4 é formado por

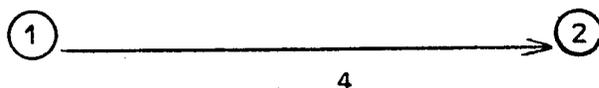
70% do fluxo do ramo 2 (o que seguir em frente)

30% do fluxo do ramo 3 (o que converteu à direita)

30% do fluxo do ramo 1 (o que converteu à esquerda)

c - Os fluxos real e máximo de cada ramo

São indicados ao lado de cada ramo, na notação

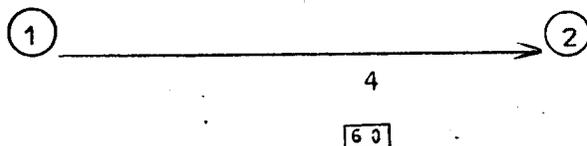


1200	(fluxo real, em veíc./hora)
2600	(fluxo máximo, em veíc./hora)

d - O tempo de percurso

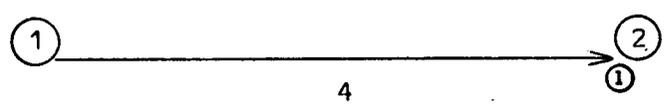
É indicado na notação (em segundos), nos ramos interme-

diários:



e - A fase de chegada ao fim do ramo

A fase do semáforo situado no cruzamento a que o ramo chega é indicado por 1 ou 2 , na forma:



V.2.1 - Características da rede da figura 10

Os semáforos B e D servem apenas para permitir conversões à esquerda, permitindo continuamente a passagem dos veículos que desejem seguir em frente.

Pode-se portanto considerar Z_3 e Z_2 como um único ramo para os veículos que fazem o trajeto EC. O mesmo pode utilizar-se em relação aos ramos Z e Y, para o trajeto CA.

A rede é constituída por uma malha fechada. Devemos portanto abri-la, de modo a produzir um mínimo de perturbação, como visto no capítulo II deste trabalho.

Os tempos de percurso mais altos da rede encontram-se entre

A - G : 60 segundos

G - F : 90 segundos

O fluxo ao final desses ramos será praticamente constante devido à dispersão, trazendo pouco erro o seu corte.

Dentre os dois, optou-se pela abertura do percurso AG, pois seus ramos estão mais carregados que os do percurso FG.

V.2.2 - O diagrama da rede para aplicação do COSE II

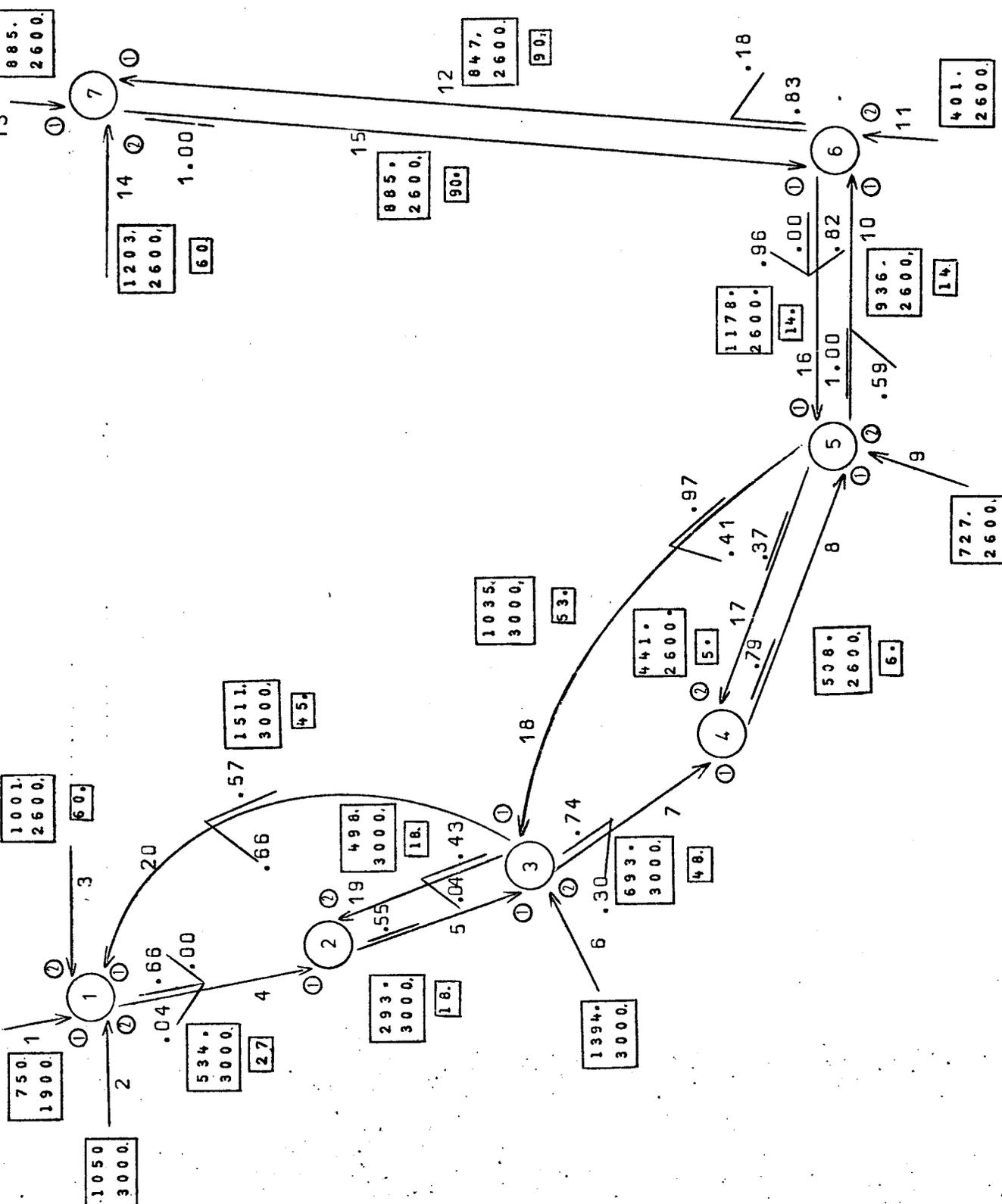


Fig. 11 - Rede para aplicação do COSE II

V.3 - Cálculo de valores inicializadores

Baseando-se nos dados fornecidos e adotando os procedimentos sugeridos em |3| e |7|, calculam-se:

- a - O Ciclo Ótimo Comum, que deve satisfazer a minimização de atraso de todos os cruzamentos da rede.
- b - Os Verdes Iniciais para cada fase de cada cruzamento, obtidos por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{y_1}{y_2}$$

$$V_1 + V_2 = (C - L)$$

onde recorda-se:

y_1 , y_2 : Graus de ocupação das vias 1 e 2

C : Ciclo ótimo comum

L : Tempo perdido total no ciclo

e que V_1 e V_2 são verdes efetivos.

e obtiveram-se, para a rede da figura 11, os seguintes dados inicializadores:

a - Ciclo Comum : 100 s.

b - Verdes Iniciais :

Cruzamento	Verde (s.)
1	52
2	46
3	37
4	49
5	54
6	61
7	37

V.4 - Resultados

Numa primeira aplicação do programa alteram-se apenas as defasagens. A partir de uma política inicial de defasagens aleatórias, obtivemos o seguinte quadro de defasagens ótimas:

Defasagem	Política Inicial (s.)	Política Ótima 1
$d_{1,2}$	22	42
$d_{1,3}$	90	68
$d_{1,4}$	5	52
$d_{1,5}$	71	80
$d_{1,6}$	53	66
$d_{1,7}$	10	76

$d_{i,j}$: Defasagem do cruzamento j em relação a i .

Fig. 12 - Resultados sem variações de verde

Os Atrasos Totais para a rede, calculados para ambas as situações foram

$$AT_{\text{inicial}} = 172,60 \text{ veic. s./s.}$$

$$AT_{\text{ótimo 1}} = 150,16 \text{ veic. s./s.}$$

indicando ter havido uma melhora percentual de:

$$\Delta AT = 13\%$$

Agora alteram-se também as durações de verdes, para verificar sua influência no critério. Parte-se da situação ótima de defasagens já encontrada, alertando-se que com variação de verdes, haverá variação nas defasagens. As novas políticas ótimas são:

Cruzamento	Verde Inicial	Verde Ótimo
1	52	52
2	46	44
3	37	38
4	49	56
5	54	54
6	61	66
7	37	38

Defasagem	Política Inicial	Política Ótima 2
$d_{1,2}$	42	42
$d_{1,3}$	68	68
$d_{1,4}$	52	54
$d_{1,5}$	80	84
$d_{1,6}$	66	70
$d_{1,7}$	76	80

Fig. 13 - Resultados com variações de verde

O novo Atraso Total obtido é de

$$AT_{\text{inicial}} = 150,16 \text{ ve/c. s./s.}$$

$$AT_{\text{ótimo 2}} = 149,60 \text{ ve/c. s./s.}$$

o que indica uma melhora percentual de

$$\Delta AT = 0,3\%$$

A melhora obtida com variação de verdes é bastante pequena, porque os cruzamentos carregados deixam pouca opção de variação.

Confirmando também o que foi previsto em |3|, só se a relação entre graus de ocupação estiver fora do intervalo

$$1 < y_1/y_2 < 3$$

é que os verdes inicialmente calculados não serão os de regulação ótima do semáforo.

Pode-se agora justificar melhor a afirmação a respeito da "influência constante dos ramos de entrada" no cálculo do atraso total, feito no capítulo II (item 2.1). Os histogramas desses ramos não são alterados por variações de defasagens, e a influência de um deles que poderia ser sentida através de variações de verdes, passa quase despercebida.

Por sua vez, notou-se a influência preponderante das defasagens. Isso justifica que elas sejam levadas em consideração - mesmo para um ramo aberto, o que é conseguido pela técnica do ramo fictício, apresentada no Adendo I.

Passa-se agora a analisar o grau de precisão com que o processo "hill-climbing" encontra os atrasos mínimos. Iniciou-se o processo por cinco vezes, com cinco configurações iniciais diferentes de defasagens, incluindo uma síncrona

	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3	Sit. 4	Sit. 5
$d_{1,2}$	0	53	22	90	71
$d_{1,3}$	0	22	90	5	10
$d_{1,4}$	0	71	5	22	53
$d_{1,5}$	0	90	71	10	5
$d_{1,6}$	0	10	53	71	22
$d_{1,7}$	0	5	10	53	90

Tendo-se obtidos os seguintes Atrasos mínimos, ao final do processo:

Partindo da situação	Atraso final depois de otimizar verdes e defasagens (veíc. s/s.)
1	149,00
2	151,10
3	149,60
4	151,89
5	151,75

Fig. 14 - Resultados partindo de diferentes configurações iniciais de defasagem.

O desvio em relação ao menor atraso obtido é menor que 2% , o que nos permite considerar o método "hill-climbing" como satisfatório para o encontro de mínimos.

No capítulo seguinte, efetuam-se comparações do modelo COSE II com outros modelos de tráfego urbano.

CAPÍTULO VI

VI. COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES

VI. Comparações e Conclusões

Neste último capítulo visa-se, mostrar a correção do método COSE II, comparando-o com outro modelo de coordenação de semáforos |4|, e com um simulador de tráfego urbano |8|.

Viu-se no decorrer deste trabalho que o modelo de tráfego urbano utilizado pelo COSE II, aproxima-se do real com uma sofisticação superior ao Modelo de Coordenação de Semáforos I |4|, através dos seus histogramas característicos de cada ramo, e de adicionar ao atraso provocado pelas filas de veículos, outro devido ao número de paradas e a aleatoriedades decorrentes de um fluxo de tráfego real. No entanto não chega à precisão de um simulador de tráfego urbano por veículos individualizados, como em |8|, no cálculo do Atraso Total sofrido pelos veículos que utilizam de terminada rede de tráfego.

Observou-se também que o método "hill-climbing" para localização de ótimos não encontra a configuração necessariamente ótima global, mas apenas uma boa aproximação enquanto o critério de encontro de ótimos do Modelo COSE I é rigoroso.

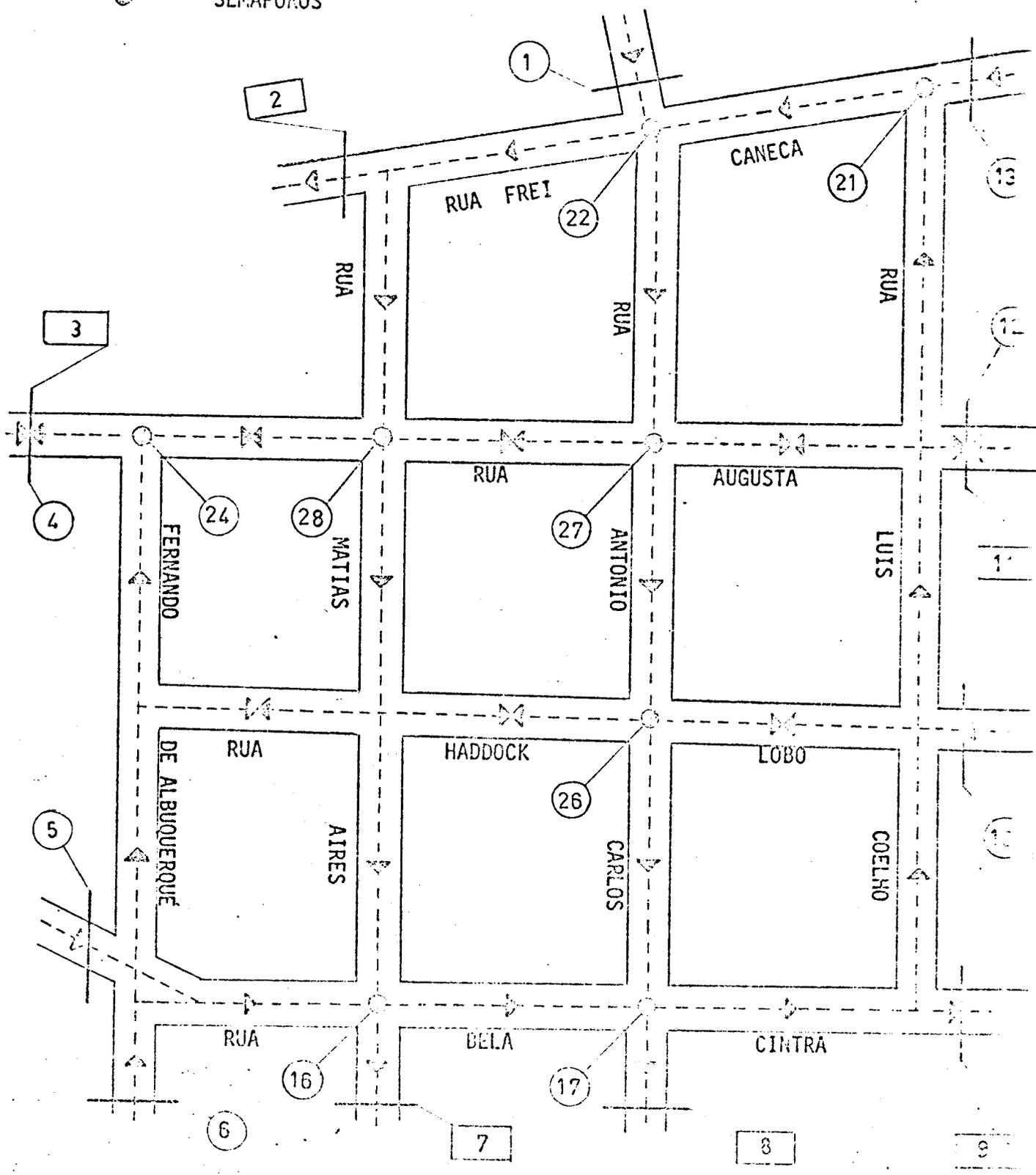
Através de comparações veremos como se situa o COSE II sob esses dois aspectos, verificando da viabilidade ou não de sua utilização.

VI.1 - A Rede para testes de comparação

Baseia-se numa região compreendida entre as avenidas Consolação e Paulista, indicada na página seguinte:

Fig. 15 - A Rede II

- ENTRADAS
- SAÍDAS
- SEMÁFOROS



A seguir, apresenta-se a mesma rede, mas já com os cruzamentos e ramos enumerados de forma a permitir a aplicação do programa (*)

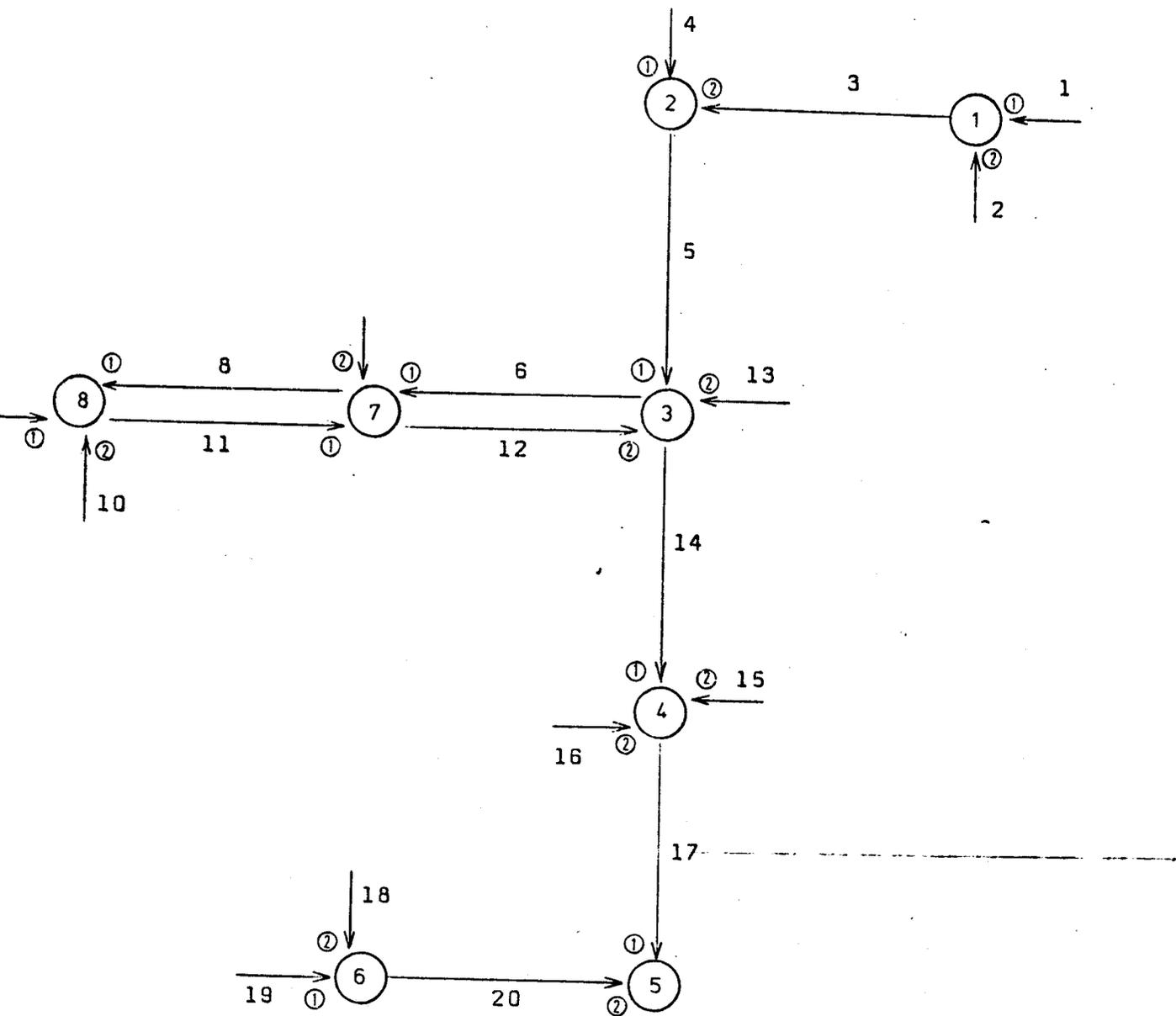


Fig. 16 - A Rede II para aplicação dos programas COSE II , COSE I e SITRA

(*) Os dados de fluxo real, fluxo máximo, tempo de percurso, percentagens de conversão e os demais necessários à aplicação do programa encontram-se em |8|.

VI.2 - Comparação quanto ao Critério de Atraso Total

Adotamos cinco políticas de defasagens, tomadas da situação ótima, e da péssima para o programa COSE I, aliando tres situações intermediárias. As situações encontram-se indicadas abaixo:

Sit. Def. \	1	Péssima 2	3	4	Ótima 5
d _{1,2}	15	22	12	19	8
d _{1,3}	31	26	34	29	35
d _{1,4}	27	27	27	28	17
d _{1,5}	31	36	28	35	14
d _{1,5}	36	12	28	5	9
d _{1,7}	15	0	21	9	28
d _{1,8}	25	2	36	15	7

E os Atrasos Totais (em ve/c. s./s.) na rede foram for necidos pelos programas, para cada situação:

Sit.	Atrasos Totais (ve/c.s./s.)			
	Atraso Total COSE I	Atraso fila COSE II	Atraso Total SITRA(*)	Atraso Total COSE II
1	11,7	9.8	27.3	21.7
2	17.4	13.3	31.9	26.4
3	9.1	8.5	25.1	19.9
4	14.6	12.0	30.2	24.6
5	6.3	7.8	22.0	19.4

Fig. 17 - Atrasos calculados pelos programas COSE I , COSE II e SITRA

(*) SITRA : Simulador de Tráfego Urbano

Observe-se que só há sentido comparar o Atraso do COSE I com o de fila do COSE II, pois aquele não leva em consideração nem o de paradas, nem o aleatório.

Uma comparação simultânea é melhor visualizada no gráfico seguinte:

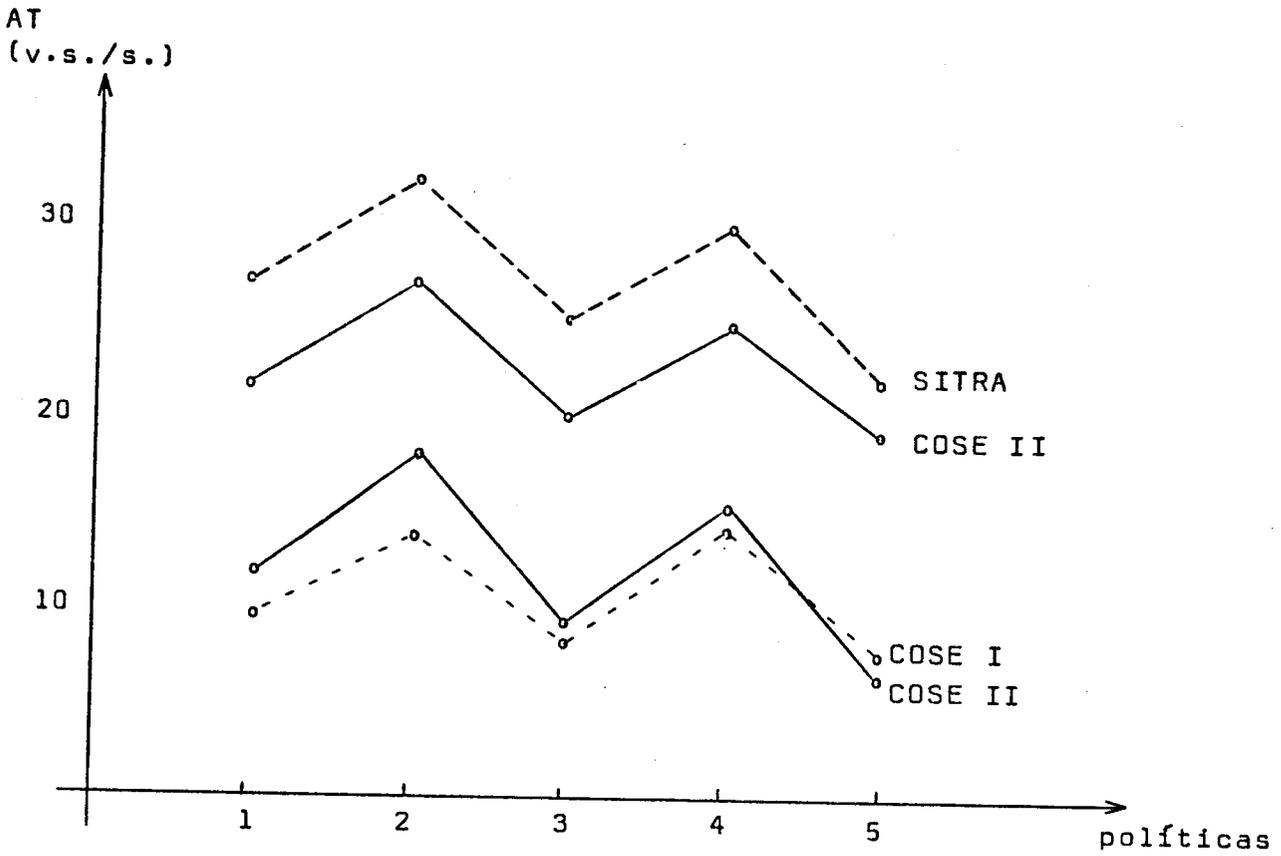


Fig. 18 - Comparações de Critério de Atraso

Verifica-se que os critérios de Atraso de Fila do COSE II e o de Atraso Total do COSE I coincidem, como era de esperar, e que realmente, o COSE II representa muito melhor a média dos atrasos de veículos numa rede (pois esse é critério utilizado pelo SITRA) do que é o COSE I.

VI.3 - Comparações quanto ao encontro de Situação de Ótimo

Deu-se como configuração inicial de defasagem para o

COSE II uma situação síncrona, e a partir dela, o programa encontrou uma dada configuração 1. Para facilitar a comparação com a situação ótima do método COSE I, transformaram-se as defasagens em defasagens relativas de cruzamento a cruzamento, obedecendo à disposição indicada abaixo:

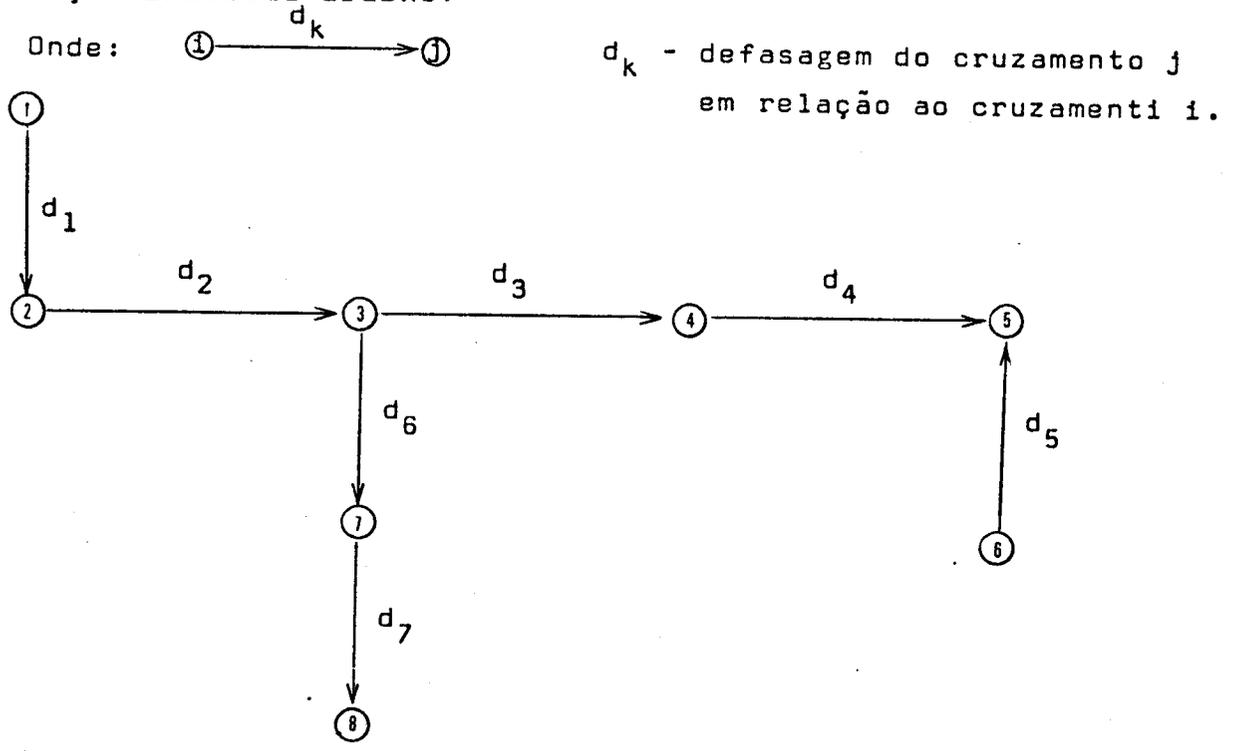


Fig. 19 - Rede II com defasagens relativas

Sendo os resultados:

Sit. Ótima	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
COSE I	8	27	22	37	5	33	21
COSE II	34	22	24	2	2	34	21

mais facilmente comparáveis através da representação gráfica seguinte:

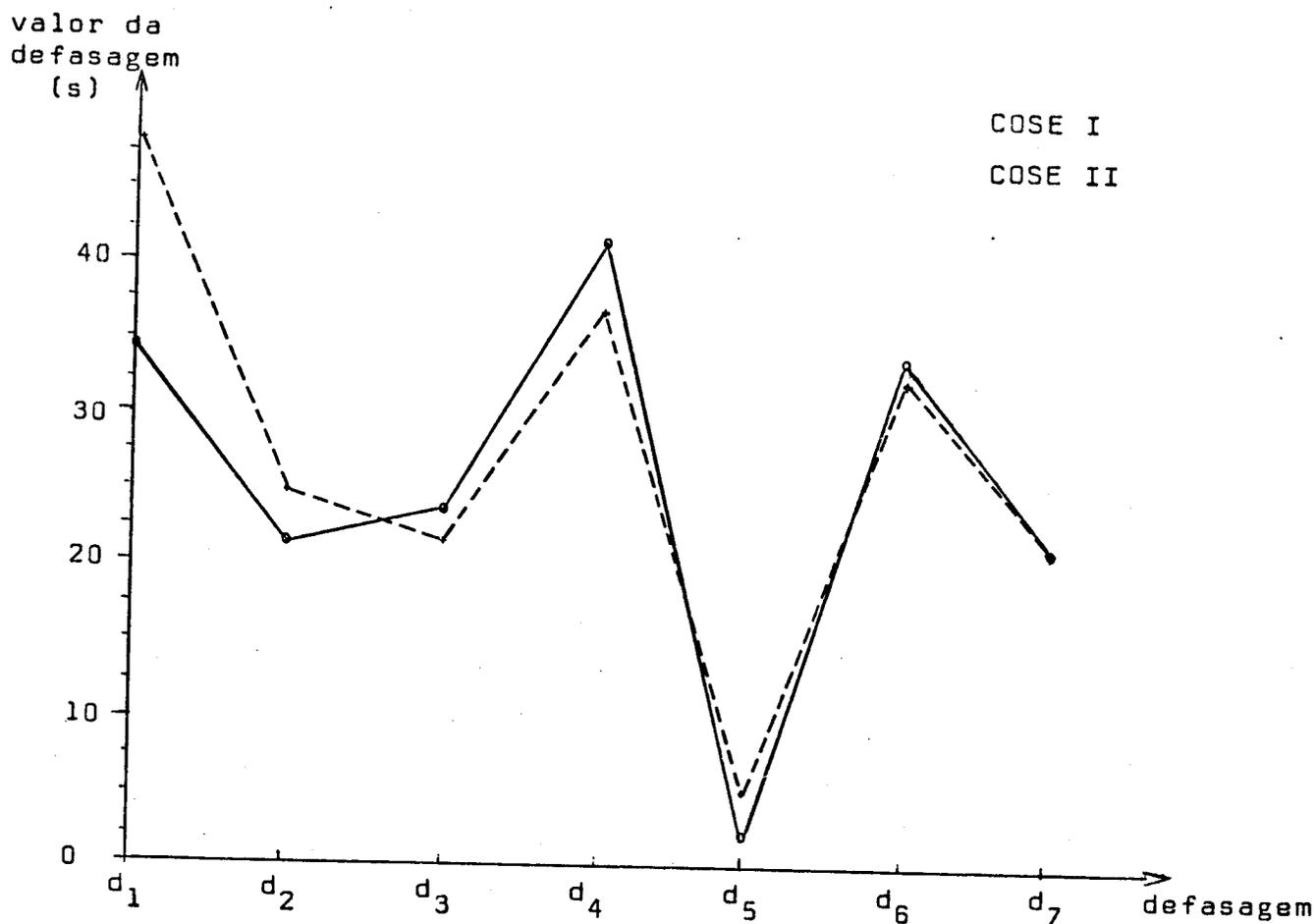


Fig. 20 - Comparações de defasagens ótimas

A única diferença digna de nota é verificada na defasagem d_1 . A curva de atrasos pelo método COSE I para esse ramo apresenta pequena variação de valores, portanto a diferença entre as defasagens, mesmo grande, não significa uma diferença acentuada em Atraso. No programa COSE II, a ponderação dos fatores aleatórios e número de paradas, poderá levar a uma curva de atrasos de configuração ligeiramente diferente, apresentando um outro mínimo local e conseqüentemente uma defasagem ótima diferente. Porém, em termos de otimização global esta disparidade é irrelevante.

VI.4 - Conclusões

O modelo COSE II apresenta as vantagens de um modelo de simulação de tráfego bastante próximo do real, aliado a um método de otimização que busca os ótimos com razoável precisão.

Dir-se-ia que o pouco que tem a ceder à otimização é amplamente compensado pela simulação de situações reais de tráfego.

No entanto, o modelo COSE II está longe de poder considerar-se um modelo acabado. Fica aqui, finalizando, uma série de sugestões, que viriam a enriquecê-lo, e aos estudos de tráfego urbano em geral.

VI.4.1 - A preparação da rede

A preparação da rede, o cálculo de Ciclo Ótimo, a melhor divisão de verdes das fases de cada cruzamento, acarretam considerável perda de tempo. Torna-se necessário um programa que faça esses cálculos automaticamente de modo que o usuário não familiarizado com toda a teoria de tráfego urbano possa utilizar-se do COSE II.

VI.4.2 - O tempo de computação

Para aumentar a rapidez de execução do programa, sugere-se que determinadas etapas sejam simplificadas. Por exemplo, ao alterar-se a defasagem de um cruzamento, só se alterarão os histogramas dos ramos subsequentes e do imediatamente anterior, não sendo necessário refazer os histogramas de ramos anteriores. O programa perde bastante tempo refazendo esses cálculos. Além disso, poder-se-ia tentar usar programação em inteiros, e não em reais, o que também aumentaria a rapidez de execução. Enfim, uma grande melhoria ainda pode ser conseguida nesse sentido.

VI.4.3 - O cruzamento não sinalizado

Esse problema merece dois tipos de estudo. Um, o de verificar quando se deve ou não sinalizar um cruzamento. É evidente que em cruzamentos de fluxo baixo é desnecessário um semáforo, mas a partir de que ponto o atraso provocado pela sua ausência, supera aquele provocado pela sua presença?

Segundo, a possibilidade de que o programa COSE II trabalhe também com cruzamentos sem semáforos. Essa restrição, colocada inicialmente, pode ser superada se se estudarem leis que permitam montar histogramas de OUT para ramos que cheguem a cruzamen

tos sem semáforos, baseadas por exemplo, em intervalo de tempo aceitável entre veículos da rua transversal para que um veículo atravessasse o cruzamento, ou penetre na rua, no tipo de ruas que dão acesso ao cruzamento, etc...

VI.4.4 - As curvas de Atraso do Modelo COSE II

O cálculo de Atrasos do modelo COSE II leva a formas na curva de Atrasos sobre as quais se têm poucas informações. O processo hill-climbing poderia encontrar mínimos muito mais segura e rapidamente caso se conhecessem algumas características que permitissem o equacionamento da curva de Atrasos de modo mais geral, ao invés do processo de cálculo repetitivo empírico de cada situação.

ADENDO I

O RAMO FICTÍCIO

Tomando a rede indicada na figura 11 verifica-se que foram desprezadas defasagens entre os cruzamentos 1 e 7 na minimização do seu Atraso Global. A análise mais acurada dos resultados obtidos comprova que, deve-se tentar sanar esse pequeno erro, devido à importância dos critérios de variações nas defasagens (embora esses sejam os ramos que menos serão influenciados por esse critério). Alerta-se que é bastante provável a ocorrência de redes de tempo de percurso e de fluxos médios equivalentes para todos os ramos, que tornem difícil a decisão de qual ramo influencia menos o critério indicado acima.

Recorda-se do conceito de defasagem que, ao fechar a malha, tem-se

$$d_{7,1} = C - (d_{1,2} + d_{2,3} + d_{3,4} + d_{4,5} + d_{5,6} + d_{6,7})$$

Para medir-se o atraso causado para cada variação de defasagem na ligação 7 - 1 sugere-se a introdução de dois ramos 22 e 23 com o tempo de percurso real e para os quais seriam calculados todos os histogramas necessários ao cálculo de atrasos. Observe-se apenas que os ramos 22 e 23 não seriam formadores de quais quer outros ramos. Tal tarefa é deixada aos ramos 3 e 14, que adquirem então o nome de "fictícios" e cuja função é gerar fluxos de entrada constantes nos cruzamentos 1 e 7. Lembre-se que isso se deve a que se 22 e 23 influenciarem a rede, serão por sua vez influenciados por ela, e isso demandaria um tempo bastante grande para entrada em regime de sistema, de acordo com o tipo da rede. Deve-se portanto, eliminar essas realimentações.

Finalmente, alerta-se que a sugestão de introdução dos ramos 22 e 23 não permite a variação de defasagens entre 7 e 1, uma vez que esta é resultado das demais, mas apenas constatar qual a sua influência no critério.

A rede passa à forma:

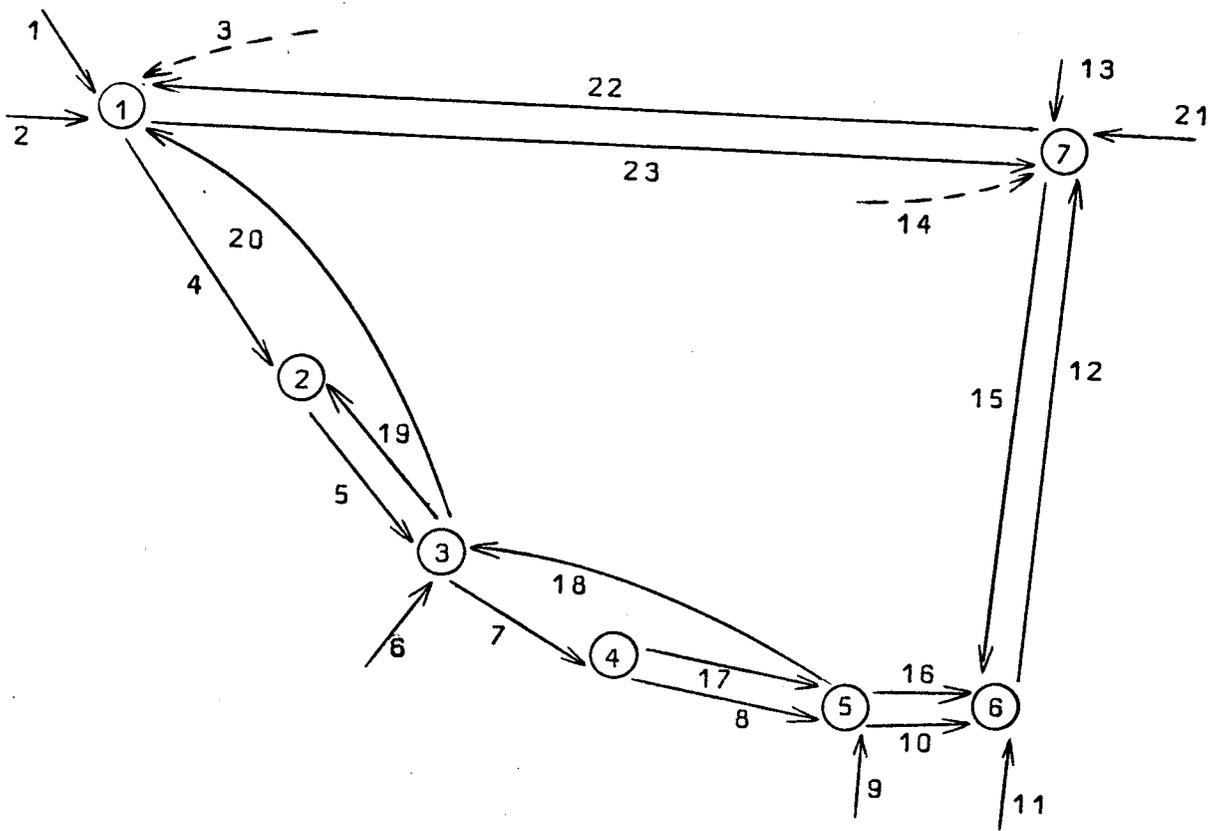


Fig. A.I. - Rede para aplicação do COSE II com ramos fictícios

ADENDO II

O FATOR DE DISPERSÃO

Este adendo descreve o método empírico de cálculo utilizado na Inglaterra pelo Road Research Laboratory [5].

A formação de pelotões de veículos deve-se ao regime verde-vermelho dos semáforos, que libera grupos em intervalos de tempo determinados; esses veículos dispersam-se ao longo da via, de modo que para diferentes posições de observação o histograma de fluxo apresenta diferentes configurações:

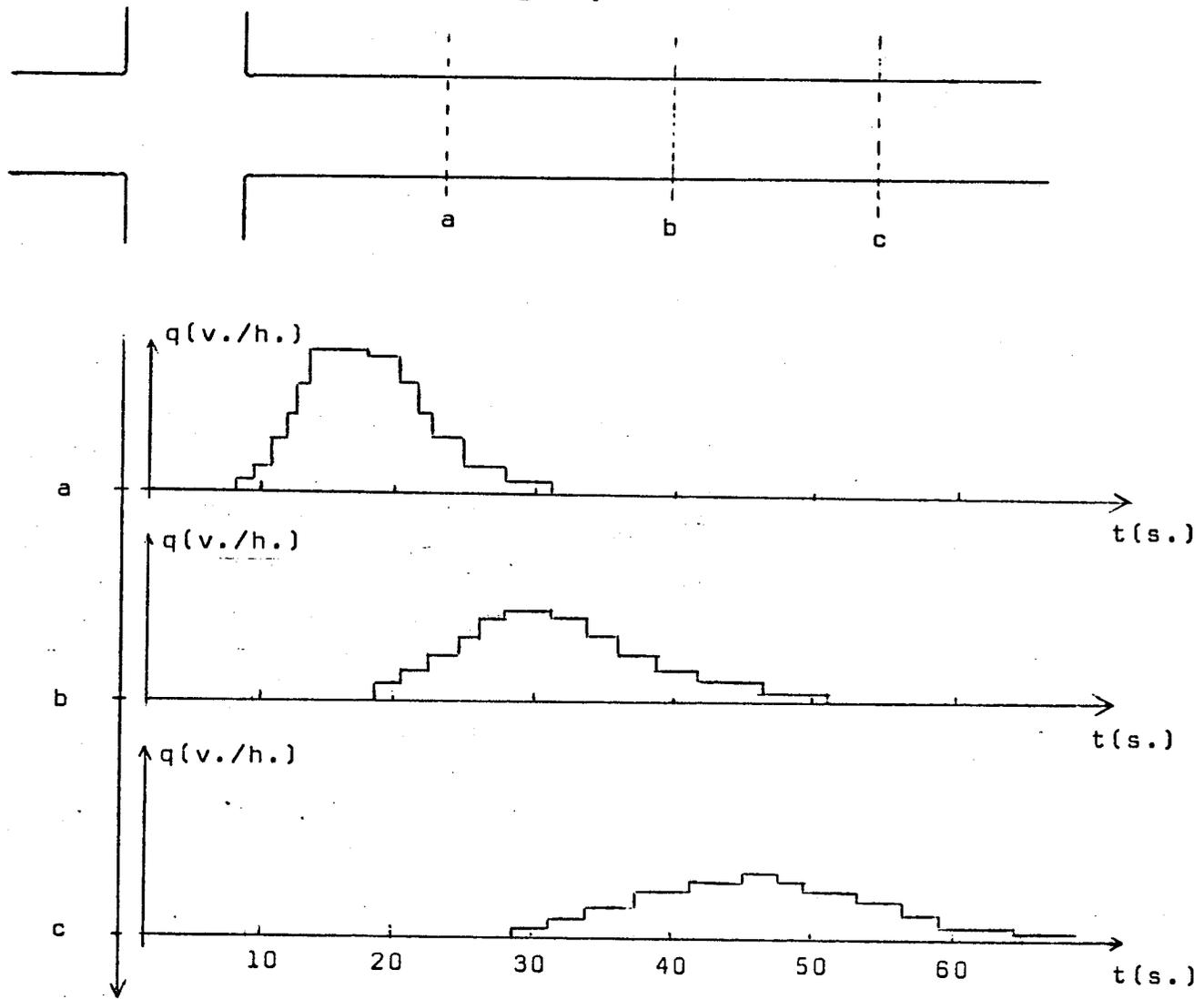


Fig. A.II.1 - Histogramas de pelotões de veículos dispersos.

73.

Para que fosse possível a previsão teórica da dispersão a partir de um fluxo de entrada conhecido, montou-se a relação recorrente:

$$q'_{(i+t)} = F \cdot q_i + (1-F) \cdot q'_{(i+t-1)}$$

onde

$q'_{(i+t)}$: fluxo de veículos no instante $(i+t)$ do pelotão previsto

t : tempo de percurso mínimo da distância para a qual se quer calcular como se dispersa o pelotão. Equivalente a $0,8 \cdot T$ onde T é o tempo médio de percurso dessa distância, medido em DT.

$q_{(i)}$: fluxo de veículos no instante i do pelotão inicial.

$q'_{(i+t-1)}$: fluxo de veículos no instante anterior a $(i+t)$, do pelotão previsto.

F : fator de dispersão.

e todos os índices de tempo são dados em DT.

As medidas de q e de q' foram feitas imediatamente após o semáforo, e a distância de 100 m., 200 m. e 300 m. Observa-se que os postos de observação não podem estar próximos de um possível semáforo seguinte (pois isso afetaria os fluxos medidos, que devem ter relação apenas com o semáforo do início da rua), nem a via deve ser influenciada por outras transversais.

Os dados foram agrupados de acordo com um nível de fluxo médio na via medido por cinco minutos. Para cada nível de fluxo foram considerados, em cada posto de observação medidas de mínimo 24 pelotões para termos um comportamento médio. O total de pelotões medidos superou 700.

Os fatores F encontrados para cada distância de farol, pelo tempo médio de percurso, foram

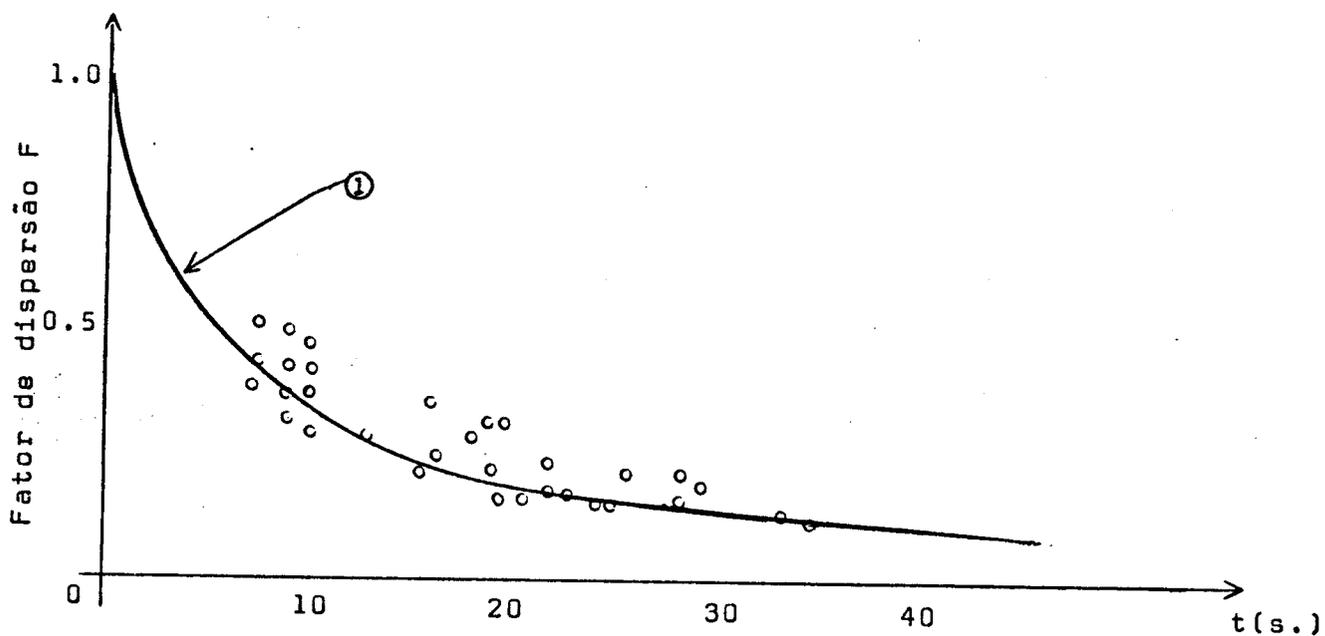


Fig. A.II.2 - O fator de dispersão

Na figura acima, a curva que melhor se adequa aos dados é indicada por ①, e sua equação

$$F = (1 + 0,4 \cdot T)^{-1}$$

É razoável supor-se que o fator de dispersão deva ser ainda influenciado por fatores como: largura da rua, existência de fluxo oposto, composição do fluxo, situações de aclive ou declive, etc. Tais aspectos não foram ainda investigados.

O processo de dispersão refere-se a comportamento médio de pelotões. O comportamento aleatório e seus efeitos são tratados noutra parte do trabalho, em II.3.3.

BIBLIOGRAFIA

1. AUTHIÉ, G. : "Realisation d'un simulateur hybride de Trafic urbain et son utilization pour les methodes de conduite du trafic a cycle fixe". These de Docteur-Ingénieur - Université P. Sabatier , Toulouse 1971.
2. WOHL, M. and MARTIN, B.V. : "Traffic System Analysis for Engineers and Planners". McGraw-Hill, New York, 1967.
3. FERNANDES, J., FRANÇA, P., ALBUQUERQUE, R., SOARES, S. : "Conceitos Básicos em Tráfego Urbano". Publicação interna, 6/74, FEC-UNICAMP, Campinas.
4. FRANÇA, P. : "Coordenação de Semáforos I" - Tese de Mestrado Universidade Estadual de Campinas - Publicação Interna /74, FEC-UNICAMP, Campinas.
5. ROBERTSON, D.I. : "Transyt: a Traffic Network Study Tool" . RRL REPORT LR 253, Road Research Laboratory, Crowthorne, 1969.
6. FERNANDES, J.R. : "Implementação dos Modelos de Otimização COSE I e COSE II" - Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas. Publicação Interna /74, FEC-UNICAMP, Campinas.
7. WEBSTER, F.V. : "Traffic Signal Settings" - Road Research Tech. Paper 30, Road Research Laboratory, London, 1958.
8. SOARES, S. : "Simulador de Tráfego Urbano". Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Publicação Interna - /74, FEC-UNICAMP, Campinas.