

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

Departamento de Automação

OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE SEMÁFOROS
EM REDES DE TRÁFEGO NÃO SATURADAS:
UMA CONTRIBUIÇÃO AO SEU ESTUDO E
REALIZAÇÃO EM COMPUTADORES HÍBRIDOS

BASÍLIO ERNESTO DE ALMEIDA MILANI

Orientador: YARO BURIAN JUNIOR

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia da Universida-
de Estadual de Campinas como
parte dos requisitos para ob-
tenção do título de "MESTRE
EM CIÊNCIAS".

outubro - 1974

UNICAMP

SUMÁRIO

Uma versão contínua do modelo de tráfego do TRANSYT é proposta. Os estudos de tráfego que deram origem ao modelo são apresentados e o comportamento do mesmo, em regime permanente, é analisado.

São propostos: um novo método para otimização do tempo de verde e defasagem dos semáforos, e um programa híbrido para cálculo das equações do modelo e condução do processo de otimização. O desempenho do método de otimização e o do programa híbrido no cálculo das equações do modelo são comparados com os do TRANSYT.

C O N T E Ú D O

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO	1
	1.1 - Considerações Iniciais	1
	1.2 - Objetivos e Roteiro	3
CAPÍTULO II	- CONCEITOS PRELIMINARES	5
	2.1 - Fluxo de Veículos	5
	2.2 - Semáforos	5
	2.3 - Relações de Capacidade	7
	2.4 - Atraso de Veículos em Intersecções Sinalizadas	10
CAPÍTULO III	- O MODELO DE SIMULAÇÃO	16
	3.1 - A Rede de Tráfego com Semáforos	16
	3.2 - Equações dos Elementos da Rede	17
	3.3 - Índice de desempenho	22
	3.4 - Comportamento em Regime Permanente das Equações da Rede	23
CAPÍTULO IV	- OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE SEMÁFOROS	29
	4.1 - Determinação do Tempo de Verde Efetivo e Ciclo Iniciais dos Semáforos	31
	4.2 - Determinação das Defasagens Absolutas	34
	4.3 - Determinação Conjunta do Tempo de Verde e Defasagem Absoluta dos Semáforos	37
	4.4 - Análise do Desempenho do Método	38
CAPÍTULO V	- O PROGRAMA HÍBRIDO	42
	5.1 - Introdução	42
	5.2 - Dados Necessários	43
	5.3 - Programação Analógica	45
	5.4 - O Programa Digital	52
	5.5 - Análise do Programa e Conclusões	99
APÊNDICE 1	- APRESENTAÇÃO SUMÁRIA DO MÉTODO TRANSYT	105
REFERÊNCIAS		109

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento acelerado das cidades e do número de veículos para transporte individual, fazem com que os problemas de tráfego na área urbana tomem uma significação econômica cada vez maior.

A otimização do controle de tráfego por semáforos, não só é a etapa final geralmente necessária em projetos de sistemas viários, como também é uma das maneiras a curto prazo de atenuar problemas de trânsito.

Quanto ao nível de utilização de sua capacidade de escoamento, as redes de tráfego se classificam em dois tipos básicos: saturadas e não saturadas. A otimização de desempenho de redes saturadas está mais para o aumento da capacidade do sistema viário existente e remanejamento dos volumes de tráfego, que para a regulação dos semáforos. Em redes de tráfego não saturadas, a experiência tem mostrado que a utilização de um sistema de semáforos coordenados, com a duração das indicações otimizadas através de simulações em computadores, tem resultado em benefícios para o sistema viário que permitem recuperar rapidamente os investimentos feitos. [11]

Simulação em computadores é um método de obtenção, pela "força bruta", de solução para problemas complexos ou de cálculo trabalhoso, que mesmo quando não usada especificamente para fins didáticos, fornece ao usuário da técnica uma quantidade de informações que ajudam a compreender melhor a dinâmica do processo sendo simulado.

Uma representação matemática fina para simulação em computadores de uma rede de tráfego com semáforos, resulta necessariamente em um modelo matemático contendo muitas variáveis aleatórias de grande variância, relacionadas por equações de forma com-

plexa, cuja solução em computadores é bastante dispendiosa. A complexidade do modelo e o tempo de computação envolvido na solução de um caso particular, tornam impraticável a utilização do modelo num processo de cálculo iterativo de obtenção de solução ótima.

Um modelo de tráfego para otimização da política de semáforos é um compromisso entre a fidelidade para com a realidade e a adequação aos meios de cálculo disponíveis. A adequação aos meios de cálculo, significa que o processo de otimização utilizando computadores, não seja dispendioso em demasia e apresente resultados confiáveis.

Os resultados de testes, envolvendo vários métodos existentes de otimização da política de semáforos, apresentados nas referências [1] e [12], são unânimes em apresentar como melhores, os resultados obtidos com o TRANSYT [1], descrito sumariamente no Apêndice 1 deste trabalho. Algumas das características principais do método são:

- Modelo de tráfego empírico, composto por equações a diferenças finitas lineares por partes, com parâmetros baseados em dados históricos da rede.
- Algoritmo de procura de mínimo do tipo "Hill Climbing", aplicável com sucesso a redes com ciclo único.
- Índice de Desempenho representando o atraso total médio em regime permanente, dos veículos junto aos semáforos, durante um ciclo fundamental da rede.
- Utiliza como meio de cálculo um sistema de computação digital.

A razão principal do sucesso do TRANSYT sobre seus concorrentes é o modelo de tráfego mais completo. Por outro lado, a complexidade do modelo dificulta o processo de otimização e consome maior tempo de computação. Uma possibilidade de cálculo mais eficiente das equações do modelo melhora as perspectivas de utilização de processos de otimização mais sofisticados, melhorando a

confiabilidade nas aplicações do método em redes com topologia complexa.

As equações do modelo do TRANSYT, sugerem que um modelo contínuo equivalente, composto por equações diferenciais lineares por partes, pode usufruir favoravelmente em um sistema de computação híbrido, da velocidade e simultaneidade da solução de equações diferenciais de um computador analógico. A precisão do calculador analógico é geralmente menor que a de um computador digital, porém no caso em questão é mais que suficiente.

1.2 - OBJETIVOS E ROTEIRO

A motivação principal deste trabalho é estudar o método TRANSYT e verificar a possibilidade de obtenção de vantagens computacionais na utilização de uma versão do mesmo para sistemas de computação híbridos, em substituição da original para computadores digitais. O objetivo final é perseguido numa forma que permite utilizar a didática dos métodos de simulação auxiliando o estudo do modelo de tráfego, suas origens, características de comportamento e suas implicações da escolha de algoritmos de otimização e no desempenho da própria simulação.

A distribuição da matéria ao longo dos capítulos é a seguinte:

Capítulo 2 : Trata dos conceitos de tráfego envolvidos no modelo. Em particular, os trabalhos de Webster sobre o atraso de veículos em intersecções sinalizadas isoladas e os de Robertson, Hillier e Rothery para intersecções não isoladas, que formam a base do modelo do TRANSYT, são apresentados com comentários sobre suas semelhanças.

Capítulo 3 : O modelo de tráfego e o Índice de Desempenho são apresentados na forma de equações de estado e o comportamento em regime permanente das equações é discutido.

Capítulo 4 : Trata da otimização da política se semáforos. O problema da otimização da política de semáforos coordenados é conceituado. Um método de otimização é proposto e o seu desempenho, em redes com semáforos de ciclo na forma CM , CM/2 , é comparado com o do TRANSYT.

Capítulo 5 : Um programa experimental, para o sistema de computação híbrido EAI-690 existente na UNICAMP, utilizado nos cálculos necessários nos capítulos 3 e 4, é apresentado em detalhes. O esquema de simulação adotado, utiliza ao máximo a capacidade de cálculo do computador analógico e minimiza a utilização de conversões A/D e D/A, procurando dessa forma minimizar o tempo de solução das equações.

O desempenho do programa no cálculo das equações do modelo e índice de desempenho é analisado e comparado com o do programa do TRANSYT. Dos resultados obtido, conclusões são tiradas sobre a viabilidade de sua utilização.

CAPÍTULO II

CONCEITOS PRELIMINARES

O objetivo deste capítulo é conceituar as variáveis de tráfego envolvidas no modelo de simulação a ser descrito no próximo capítulo.

Os estudos de Webster para um cruzamento isolado e de Robertson, Hillier e Rothery para intersecções não isoladas são apresentados de modo a realçar suas semelhanças.

Os conceitos aqui expostos representam a validação do modelo de tráfego. Para maiores detalhes é recomendado a leitura das referências [1], [2] e [3].

2.1 - FLUXO DE VEÍCULOS

O fluxo de veículos em um dado ponto de uma rede de tráfego é o número de veículos que passa pelo ponto na unidade de tempo considerada. Para simplicidade de cálculo o fluxo é considerado como uma variável contínua.

No caso de fluxo de veículos em intersecções sinalizadas, para levar em conta a diferença de performance dos vários meios de locomoção, a contagem dos veículos é feita, associando a cada tipo o seu equivalente em número de carros de passageiros.

Para cálculos de capacidade e atraso de veículos em intersecções sinalizadas, os equivalentes em carros de passageiros para alguns tipos de veículos são mostrados na tabela 2.1, obtida na referência [2]. Os dados se referem a veículos europeus, a validade dos mesmos no caso do Brasil deve ser discutida.

2.2 - SEMÁFOROS

Os semáforos utilizados pelo modelo de simulação são de ciclo fixo, duas fases, com indicações de verde, vermelho, âmbar da forma mostrada na figura 2.1.

2.2.1 - Fase

Fase do semáforo é uma sequência completa de indicações aplicada simultaneamente a uma ou mais correntes de tráfego chegando à intersecção.

2.2.2 - Ciclo

Ciclo é o intervalo de tempo necessário a uma sequência completa de indicações: vermelho, vermelho/âmbar, verde, âmbar.

2.2.3 - Sistema de semáforos coordenados

Um sistema de semáforos coordenados é um conjunto de semáforos onde as mudanças de estado são sincronizadas por um relógio central.

O ciclo dos semáforos são fixos e geralmente na forma CM, CM/2 onde CM é o ciclo fundamental da rede.

2.2.4 - Defasagem

Em um sistema coordenado, a diferença de posição entre semáforos é medida pela defasagem:

- Defasagem absoluta

Defasagem absoluta de um semáforo é o intervalo de tempo entre o instante inicial e o instante da primeira mudança de vermelho/âmbar para verde. (figura 2.4)

- Defasagem relativa

D_{12} - Defasagem do semáforo 1 em relação ao semáforo 2

D_1 - Defasagem absoluta do semáforo 1

D_2 - Defasagem absoluta do semáforo 2

$$D_{12} = D_1 - D_2 \quad (2.1)$$

2.2.5 - Vermelho para pedestres

Vermelho para pedestres é o tempo durante o qual as duas fases do semáforo indicam vermelho, proporcionando assim uma tra-

vessia segura para pedestres em intersecções com ruas de mão de direção dupla.

2.3 - RELAÇÕES DE CAPACIDADE

2.3.1 - Fluxo de saturação

Fluxo de saturação, em uma rua controlada por semáforo, é o fluxo mais ou menos constante de descarga de veículos de uma fila, durante o tempo de verde da fase do semáforo que controla a rua. Normalmente é expresso em carros de passageiros por hora, podendo ser medido no local ou estimado através de fórmulas [2] (figura 2.2)

2.3.2 - Tempos perdidos

- Tempo perdido no início do verde.

É o tempo para se colocar a fila de veículos em movimento. (figura 2.2)

- Tempo perdido no fim do âmbar.

É o tempo que leva o último carro que atravessa o cruzamento durante o âmbar, para atravessar e desocupar a intersecção. (figura 2.2)

Tempo de verde + âmbar insuficiente para escoar toda a fila:

$F(t)$ - Fluxo de veículos descarregando a fila.

FS - Fluxo de saturação da rua.

TI - Instante de tempo correspondente ao início do verde.

TF - Instante de tempo correspondente ao fim do âmbar.

$T1$ - Instante de tempo após o início do verde a partir do qual $F(t) = FS$.

$T2$ - Instante de tempo durante o âmbar a partir do qual $F(t) < FS$

TP1 - Tempo perdido no início do verde.

TP2 - Tempo perdido no fim do âmbar.

$$TP1 = \frac{1}{FS} \int_{TI}^{T1} [FS - F(t)] dt \quad (2.2)$$

$$TP2 = \frac{1}{FS} \int_{T2}^{TF} [FS - F(t)] dt \quad (2.3)$$

2.3.3 - Verde efetivo

O verde efetivo, de uma das fases de um semáforo, é obtido através da seguinte fórmula:

VE - Verde efetivo de uma fase

$$VE = \frac{1}{FS} \int_{TI}^{TF} F(t) dt = TF - TI - TP1 - TP2 \quad (2.4)$$

O verde efetivo total de um semáforo é a soma dos efetivos das fases.

VE1 - Verde efetivo da fase 1

VE2 - Idem para a fase 2

VET - Verde efetivo total

CI - Ciclo do semáforo

VP1 - Vermelho para pedestres da fase 1

VP2 - Idem para a fase 2

TP1 - Tempo perdido no início do verde da fase 1

TP1' - Idem para a fase 2

TP2 - Tempo perdido no final do âmbar da fase 1

TP2' - Idem para a fase 2

$$VET = VE1 + VE2 \quad (2.5)$$

Da figura 2.3, segue:

$$VET = CI - (VP1 + VP2 + TP1 + TP1' + TP2 + TP2') \quad (2.6)$$

2.3.4 - Grau de ocupação de uma rua com semáforo

Y - Grau de ocupação

F - Fluxo médio na rua durante um ciclo do semáforo

FS - Fluxo de saturação

$$Y = \frac{F}{FS} \quad (2.7)$$

2.3.5 - Capacidade de uma rua com semáforo

C - Capacidade

VE - Verde efetivo da fase que controla a rua

FS - Fluxo de saturação da rua

$$C = VE \cdot FS \quad (2.8)$$

2.3.6 - Grau de saturação de uma rua com semáforo

Grau de saturação é a razão entre o número de carros que passa pela rua durante um ciclo do semáforo e a capacidade da rua.

X - Grau de saturação

CI - Ciclo do semáforo

VE - Verde efetivo da fase do semáforo que controla a rua

F - Fluxo médio de veículos na rua durante um ciclo

FS - Fluxo de saturação

$$X = \frac{F \cdot CI}{VE \cdot FS} \quad (2.9)$$

2.4 - ATRASO DE VEÍCULOS EM INTERSECÇÕES SINALIZADAS

O atraso do fluxo de veículos, em intersecções sinalizadas, corresponde à soma dos tempos que cada veículo ficou parado na fila formada junto ao semáforo.

Assim sendo, tem-se:

ATR - Atraso médio dos veículos durante um ciclo do semáforo

Q - Quantidade média de veículos na fila

CI - Ciclo do semáforo

$$ATR = \int_0^{CI} Q(t)dt \quad (2-10)$$

2.4.1 - Intersecções isoladas

Webster [2], considerando a natureza aleatória do fluxo de veículos chegando em uma intersecção isolada, baseado em estudos de simulação, comparados com dados reais, desenvolveu uma fórmula que permite o cálculo do atraso médio por veículo em uma rua controlada por semáforo de ciclo fixo:

ATMV - Atraso médio por veículo

CI - Ciclo

VE - Verde efetivo da fase que controla a rua

X - Grau de saturação da rua

F - Fluxo médio de veículos na rua

$$ATMV = \frac{CI (1-\lambda)^2}{2 (1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2F (1-X)} - 0,65 \left(\frac{C}{F^2}\right)^{\frac{1}{3}} X^{(2+5\lambda)} \quad (2.11)$$

onde

$$\lambda = \frac{VE}{CI} \quad (2.12)$$

O modelo de simulação considera o semáforo com indicações de vermelho e verde, sendo a duração do verde igual ao verde efetivo da fase em questão.

O fluxo de veículos, saindo da intersecção durante o verde, é igual ao fluxo de saturação enquanto houver fila e igual ao fluxo de chegada em caso contrário.

Um modo interessante de interpretar a fórmula (2.11) é considerar o primeiro termo como o atraso obtido para um fluxo de chegada $\bar{F}$, constante, e os outros dois termos como uma correção - devida às características aleatórias do fluxo de veículos.

2.4.2 - Intersecções não isoladas

Os semáforos tendem a agrupar veículos em filas e soltá-los em grupos, frequentemente chamados de pelotões (Platoons), onde o intervalo de tempo entre um veículo e outro é mais uniforme do que deveria ser se não houvesse o semáforo e portanto menos aleatório que o previsto no caso da intersecção isolada.

2.4.2.1 - Difusão de pelotões

O pelotão tende a se dispersar, à medida que se afasta do semáforo, devido à diferença de velocidade entre os veículos.

Robertson [1] analisou a difusão de 700 pelotões, em 4 locais diferentes, com observadores medindo o fluxo de veículos na saída do semáforo e à distância de 300, 600 e 1000 pés, comparando as formas. Baseado nos resultados, relacionou a forma em média dos pelotões, saindo de um ponto A, com a de um ponto B, através de uma recorrência de primeira ordem, cujos parâmetros dependem do tempo médio do percurso entre os pontos:

K - Instante de tempo discreto
 Δt - Intervalo de amostragem
 T - Tempo de percurso médio de A para B
 F - Fator de dispersão discreto
 a - Fator de dispersão contínuo
 q_A - Fluxo médio de veículos em A
 q_B - Fluxo médio de veículos em B
 t - tempo

$$q_B(k + tr) = F q_A(k) + (1 - F) q_B(k + tr - 1) \quad (2.13)$$

$$F = \frac{1}{1 + 0,5tr} \quad (2.14)$$

onde

$$tr = \frac{0,8T}{\Delta t} \quad (2.15)$$

A equação diferencial que aproxima a recorrência acima é:

$$\dot{q}_B(t + 0,8T) = -a q_B(t + 0,8T) + a q_A(t) \quad (2.16)$$

$$a = \frac{1}{0,4T} \quad (2.17)$$

É importante ressaltar que o processo de difusão acima se refere ao comportamento médio dos pelotões. Considerando pelotões isolados, veremos que suas formas apresentam um comportamento aleatório em torno da média prevista.

2.4.2.2 - Cálculo do atraso

O agrupamento em pelotões do fluxo de veículos em inter

secções vizinhas, faz com que o fluxo de veículos chegando a um semáforo possua uma média que varia com o tempo ao longo do ciclo, fazendo com que o atraso dos veículos dependa da defasagem entre os semáforos.

Hillier e Rothery [1] usaram os dados obtidos por Robertson sobre a difusão de pelotões e com eles desenvolveram uma maneira de estimar o atraso de pelotões de veículos em semáforos, calculando, através de um modelo de simulação, o atraso devido ao pelotão médio e adicionando um termo empírico para levar em conta as flutuações aleatórias.

O modelo de simulação é o mesmo utilizado por Webster, descrito na secção 2.4, e o termo de correção é dado pela seguinte relação:

ATA - Atraso médio extra, por unidade do ciclo do semáforo, devido às flutuações aleatórias na forma dos pelotões.

X - Grau de saturação da rua

$$ATA = \frac{X^2}{4(1 - X)} \quad (2.18)$$

TIPO DO VEÍCULO	Equivalente em carros de passageiros
Veículos pesados e médios novos	1,75
Ônibus	2,25
Veículos leves novos	1,00
Motocicletas	0,33
Bicicletas	0,20

Tabela 2.1 - Equivalente em carros de passageiros de alguns tipos de veículos.

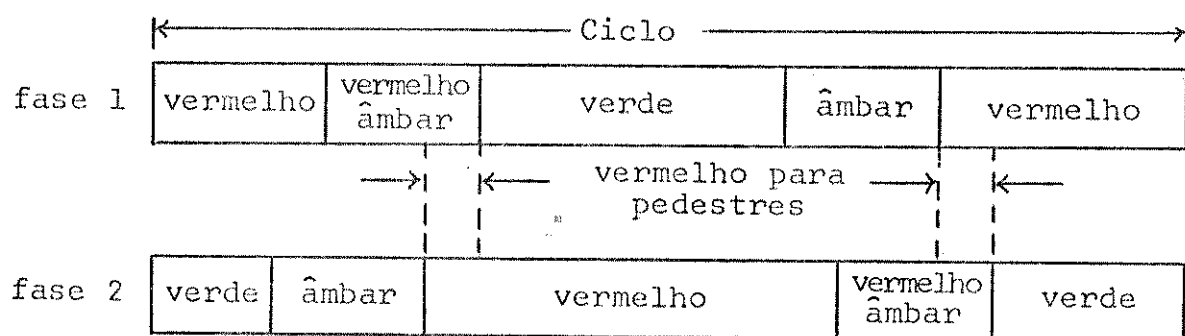


Fig. 2.1 - Sequência de indicações de um semáforo.

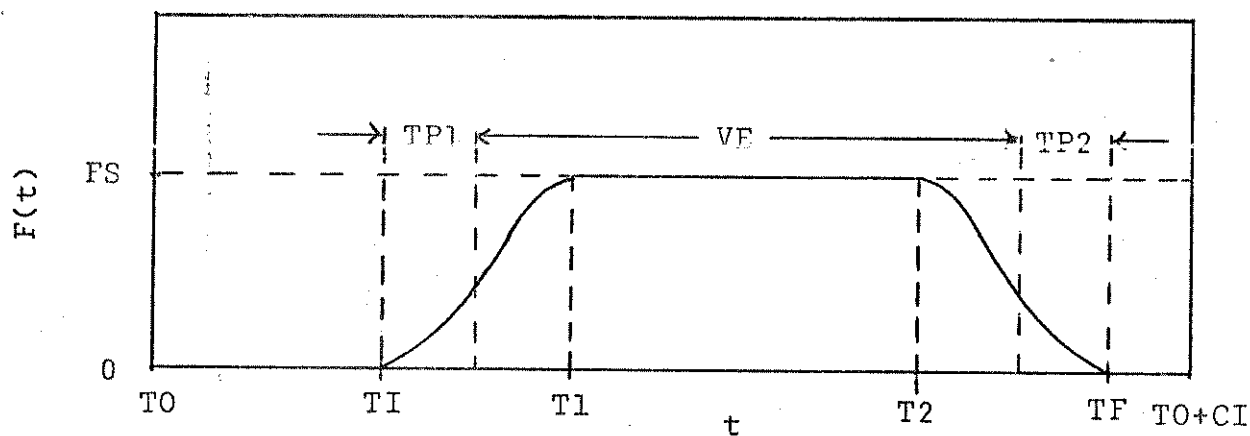
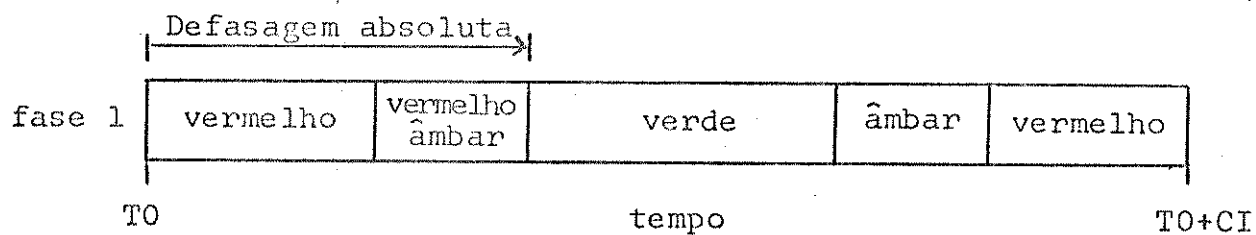
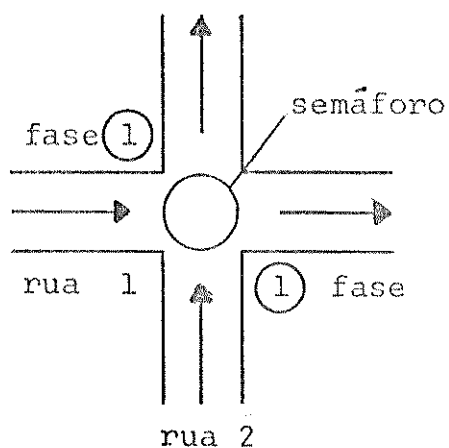


Fig. 2.2 - Tempos perdidos e verde efetivo.



T_0 - Instante inicial
 CI - Ciclo do semáforo

Fig. 2.4 - Defasagem absoluta de um semáforo.



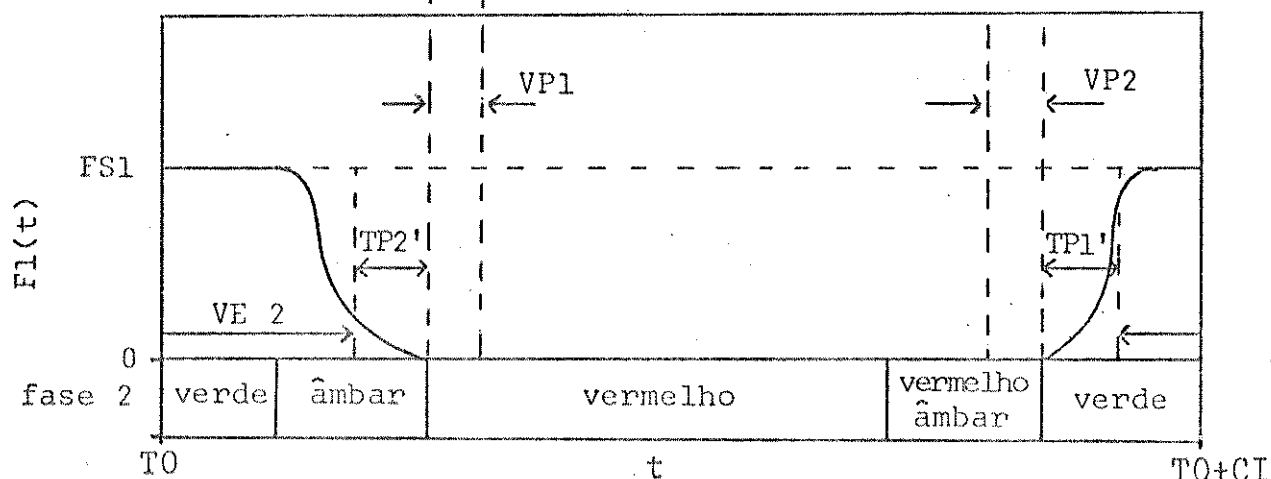
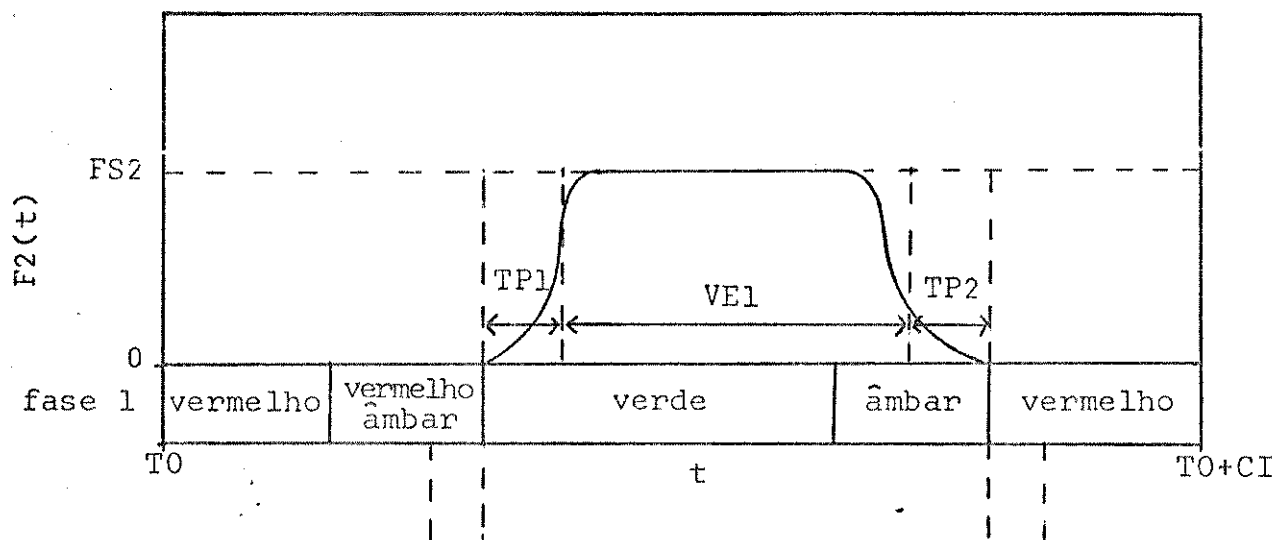
FS1 - Fluxo de saturação da rua 1

FS2 - Fluxo de saturação da rua 2

F1 - Fluxo de descarga da fila de veículos na rua 1

F2 - Fluxo de descarga da fila de veículos no ramo 2

(A)



(B)

Fig. 2.3 - (A) Intersecção sinalizada, (B) Gráfico do fluxo de descarga das filas de veículos nas ruas da intersecção, supondo tempo de verde insuficiente para escoar todos os veículos.

CAPÍTULO III

O MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo é macroscópico, empírico, baseado nos valores médios instantâneos do fluxo e fila de veículos tomados em pontos estratégicos na rede de tráfego, relacionando os com a política de semáforos. O índice de desempenho, associado ao modelo, representa o atraso total médio, em regime permanente, dos veículos junto aos semáforos, durante um ciclo fundamental da rede.

3.1 - A REDE DE TRÁFEGO COM SEMÁFOROS

Um sistema de tráfego urbano com semáforos é representado por uma rede onde os ramos são as mãos de direção das ruas e os nós são os semáforos. Dentre os ramos, distinguem-se as seguintes categorias: entrada, intermediários e saída.

Ramos intermediários são aqueles contidos entre dois semáforos.

Ramos de entrada são os que chegam a um semáforo e não são provenientes de um outro.

Ramos de saída são aqueles que saem de um semáforo sem se dirigirem a nenhum outro.

A movimentação dos veículos entre os vários ramos é feita através dos semáforos e é governada pelas porcentagens de conversão entre os ramos. As porcentagens exprimem o percentual do fluxo de saída de outros ramos que entra em um determinado ramo.

A figura 3.1 contém a representação gráfica adotada para as redes de tráfego neste trabalho.

São adotadas as seguintes hipóteses:

- Ramos não saturados (grau de saturação < 1)
- Fluxo de veículos constante nos ramos de entrada

- Porcentagens de conversão constantes e independentes da regulação dos semáforos
- Semáforos de duas fases e ciclos na forma CM , $CM/2$, onde CM é o ciclo fundamental da rede.

3.2 - EQUAÇÕES DOS ELEMENTOS DA REDE

A representação matemática dos elementos da rede é na forma de equações de estado. Os conceitos de tráfego envolvidos foram definidos no capítulo 2.

3.2.1 - Semáforos

Um semáforo com indicações vermelho, vermelho/âmbar, verde, âmbar, é representado por um par de funções periódicas $SM_{i,1}(t)$ e $SM_{i,2}(t)$ de períodos iguais ao ciclo do semáforo, assumindo valores zero e um na forma descrita pelo gráfico na figura 3.2, onde:

t - Tempo

I - Número do semáforo

D - Defasagem absoluta

$VP1$ - Vermelho para pedestres da fase 1

$VP2$ - Idem para a fase 2

CI - Ciclo

V - Tempo de verde da fase 1 (âmbar inclusive)

$TP1$ - Tempo perdido no início do verde da fase 1

$TP1'$ - Idem para a fase 2

$TP2$ - Tempo perdido no final do âmbar da fase 1

$TP2'$ - Idem para a fase 2

- I - Número do semáforo
- $SM_{i,j}(t)$ - Função semáforo: Função periódica de período CI_i representando a fase J do semáforo I
- DE - Defasagem absoluta efetiva
- VE - Verde efetivo da fase 1
- RI1 - Vermelho integral da fase 1
- RI2 - Idem para a fase 2

$$RI1_i = VP1_i + TP1_i + TP2'_i \quad (3.1)$$

$$RI2_i = VP2_i + TP2_i + TP1'_i \quad (3.2)$$

$$VE_i = V_i - TP1_i - TP2_i \quad (3.3)$$

$$DE_i = D_i + TP1_i \quad (3.4)$$

Como se pode constatar na figura 3.2, $SM(t)$ é completamente definida pelas variáveis CI , VE , DE , $RI1$, $RI2$.

$RI1$ e $RI2$ (equações 3.1, 3.2) são fixados pelas características particulares de cada intersecção.

As variáveis disponíveis para controle do fluxo de veículos são portanto: CI , VE , DE .

3.2.2 - Ramos

O comportamento de um ramo intermediário é descrito através da fila de veículos na linha de parada junto ao semáforo no fim do ramo e pelo fluxo de veículos nos seguintes pontos: entrada do ramo, saída do ramo e linha de parada junto ao semáforo. (figura 3.3).

Um ramo de entrada é um caso particular do intermediário: o fluxo na entrada e na linha de parada são iguais e constantes.

Nos ramos de saída considera-se apenas o fluxo de veículos na entrada. A finalidade deles é possibilitar a contagem do número de veículos saindo da rede.

Considerando:

t - tempo

I - Número do ramo

NRI - Número de ramos intermediários

NRE - Número de ramos de entrada

NRS - Número de ramos de saída

Ramos intermediários

TP - Tempo médio de percurso do ramo

A - Fator de difusão

FI - Fluxo médio de veículos em regime permanente

FIS - Fluxo de saturação

ICI - Número do semáforo no fim do ramo

IFI - Número da fase em que o ramo chega

IN - Fluxo médio instantâneo de veículos entrando no ramo

OUTI - Fluxo médio instantâneo de veículos saindo do ramo

GO - Fluxo médio instantâneo de veículos chegando à linha de parada no fim do ramo

QI - Fila média instantânea de veículos junto a linha de parada

Ramos de entrada

- FES - Fluxo de saturação do ramo
FE - Fluxo médio de veículos no ramo
ICE - Número do semáforo no fim do ramo
IFE - Número da fase em que o ramo chega
OUTE - Fluxo médio instantâneo de veículos saindo do ramo
QE - Fila média instantânea de veículos na linha de parada

Ramos de saída

- FS - Fluxo médio instantâneo de veículos no ramo

Matrizes de Conversões

- $PEI_{i,j}$ - Fração do fluxo de veículos saindo do ramo de entrada I que entra no ramo intermediário J
 $PES_{i,j}$ - Idem para o ramo de entrada I e ramo de saída J
 $PII_{i,j}$ - Idem para os ramos intermediários I e J
 $PIS_{i,j}$ - Idem para o ramo intermediário I e ramo de saída J
 $SM_{i,j}(t)$ - Função semáforo, representando a fase J do semáforo I

Função auxiliar

$$SG(Z, Y, W) = \begin{cases} Y & \text{se } Z > 0 \\ W & \text{se } Z = 0 \end{cases}$$

As equações dos ramos serão:

- Ramos de entrada:

$$QE_i(t) = FE_i - OUTE_i(t) \quad (3.5)$$

onde

$$OUTE_i(t) = SG(QE_i(t), FES_i, FE_i) SM_{m,n}(t) \quad (3.6)$$

$$m = ICE_i$$

$$n = IFE_i$$

- Ramos intermediários:

$$GO_i(t) = -A_i GO_i(t) + A_i IN_i(t - 0,8 TP_i) \quad (3.7)$$

$$QI_i(t) = GO_i(t) - OUTI_i(t) \quad (3.8)$$

onde

$$OUTI_i(t) = SG(QI_i(t), FIS_i, GO_i(t)) SM_{m,n}(t) \quad (3.9)$$

$$IN_i(t) = \sum_{J=1}^{NRE} PEI_{j,i} OUTE_j(t) + \sum_{J=1}^{NRI} PII_{j,i} OUTI_j(t) \quad (3.10)$$

$$A_i = \frac{1}{0,4 TP_i}$$

$$m = ICI_i$$

$$n = IFI_i$$

- Ramos de saída:

$$FS_i(t) = \sum_{J=1}^{NRI} PIS_{j,i} OUTI_j(t) + \sum_{J=1}^{NRE} PES_{j,i} OUTE_j(t) \quad (3.11)$$

3.3 - ÍNDICE DE DESEMPENHO

O índice de performance adotado representa o atraso total médio em regime permanente dos veículos junto aos semáforos por unidade do ciclo fundamental da rede. Incluída no atraso computado há uma penalização em tempo por cada parada de veículo em semáforo. [4]

Considerando:

t - tempo

CM - Ciclo fundamental da rede

ATRT - Índice de desempenho

ATF - Atraso dos veículos nas filas junto dos semáforos

AU - Atraso uniforme

ATA - Atraso aleatório

NTP - Número total de paradas

ATP - Atraso de paradas

K - Penalização em tempo por parada de veículo

XE - Grau de saturação de um ramo de entrada

XI - Grau de saturação de um ramo intermediário

$$ATF(t) = \sum_{I=1}^{NRE} QE_i(t) + \sum_{I=1}^{NRI} QI_i(t) \quad (3.12)$$

$$NTP(t) = \sum_{I=1}^{NRE} SC(QE_i(t), FE_i, 0.) + \sum_{I=1}^{NRI} SG(QI_i(t), GO_i(t), 0.) \quad (3.13)$$

$$ATA = \frac{1}{4} \left(\sum_{I=1}^{NRI} \frac{XI^2}{1 - XI} + \sum_{I=1}^{NRE} \frac{XE^2}{1 - XE} \right) \quad (3.14)$$

$$AU = \lim_{t \rightarrow \infty} [(ATF(t + CM) - ATF(t))/CM] \quad (3.15)$$

$$ATP = \lim_{t \rightarrow \infty} [k(NTP(t + CM) - NTP(t))/CM] \quad (3.16)$$

$$ATRT = AU + ATP + ATA \quad (3.17)$$

Unidades:

- FE, GO - Carros de passageiros/segundo
- QE, QI - Carros de passageiros
- CM, k - Segundos
- ATF - Carros de passageiros-segundos
- NTP - Carros de passageiros
- ATA - Carros de passageiros-segundos/segundo
- ATRT - Carros de passageiros-Segundos/segundo
- AU, ATP - Carros de passageiros-segundos/segundo

3.4 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE DAS EQUAÇÕES DA REDE

Uma rede de tráfego com NRE ramos de entrada, NRI ramos intermediários, NRS ramos de saída e NF semáforos, formam um sistema de equações diferenciais não lineares, com atraso de transporte, composto por $2NRI + NRE$ equações de estado com $2NF$ entradas $SM(t)$. (tabela 3.1)

3.4.1 - Solução periódica

Desde que as hipóteses formuladas na secção 3.1 deste capítulo sejam satisfeitas, o sistema de equações apresentará em regime permanente um comportamento periódico, função apenas dos

parâmetros da rede e da política de semáforos adotada.

A afirmação acima foi verificada através de simulação. Uma prova teórica para uma rede genérica é muito difícil devido ao número de variáveis envolvidas e as não linearidades nas equações.

3.4.2 - Fluxo médio de veículos nos ramos intermediários

FI_i - Fluxo médio de veículos chegando à linha de parada no fim do ramo I.

$$FI_i = \frac{1}{CM} \int_t^{t+CM} GO_i(t) dt \quad (3.18)$$

Em um ramo intermediário:

$$\dot{GO}_i(t) = -A_i GO_i(t) + A_i IN_i(t - 0,8 TP_i) \quad (3.19)$$

$$\dot{QI}_i(t) = GO_i(t) - OUTI_i(t) \quad (3.20)$$

$$IN_i(t) = \sum_{j=1}^{NRE} PEI_{j,i} OUTE_j(t) + \sum_{j=1}^{NRI} PII_{j,i} OUTI_j(t) \quad (3.21)$$

Em um ramo de entrada:

$$\dot{QE}_i(t) = FE_i - OUTE_i(t) \quad (3.22)$$

Em regime permanente, supondo solução periódica de período CM:

$$\int_t^{t+CM} FE_i dt = FE_i CM = \int_t^{t+CM} OUTE_i(t) dt \quad (3.23)$$

$$\int_t^{t+CM} GO_i(t)dt = FI_i \text{ CM} = \int_t^{t+CM} OUTI_i(t)dt \quad (3.24)$$

$$\int_t^{t+CM} GO_i(t)dt = FI_i \text{ CM} = \int_t^{t+CM} IN_i(t-0,8TP_i)dt = \int_t^{t+CM} IN_i(t)dt \quad (3.25)$$

Substituindo (3.19) em (3.24):

$$FI_i \text{ CM} = \sum_{J=1}^{NRE} PEI_{j,i} OUTE_j(t) + \sum_{J=1}^{NRI} PII_{j,i} OUTI_j(t) \quad (3.26)$$

Substituindo (3.24) e (3.25) em (3.26):

$$FI_i \text{ CM} = \sum_{J=1}^{NRE} PEI_{j,i} FE_j \text{ CM} + \sum_{J=1}^{NRI} PII_{j,i} FI_j \text{ CM} \quad (3.27)$$

e portanto:

$$FI_i - \sum_{J=1}^{NRI} PII_{j,i} FI_j = \sum_{J=1}^{NRE} PEI_{j,i} FE_j \quad (3.28)$$

onde

$$PII_{i,i} = 0$$

$$I = 1 \text{ até } I = NRI$$

Para se obter o fluxo de veículos em regime permanente nos ramos intermediários, a partir das matrizes de conversões PII e PEI e do fluxo de veículos nos ramos de entrada FE, basta resolver o sistema de equações formado pelas NRI equações 3.28 apresentadas acima.

TABELA 3.1 - Equações da rede e índice de desempenho

Equações da rede:

$$\dot{Q}E_i(t) = FE_i - OUTE_i(t)$$

$$OUTE_i(t) = SG(QE_i(t), FES_i, FE_i) SM_{m,n}(t)$$

$$m = ICE_i$$

$$n = IFE_i$$

$$I = 1 \quad \text{até} \quad I = NRE$$

$$\dot{G}O_i(t) = -A_i GO_i(t) + A_i IN_i(t-0,8TP_i)$$

$$\dot{Q}I(t) = GO_i(t) - OUTI_i(t)$$

$$OUTI_i(t) = SG(QI_i(t), FIS_i, GO_i(t)) SM_{m,n}(t)$$

$$IN_i(t) = \sum_{j=1}^{NRE} PEI_{j,i} OUTE_j(t) + \sum_{j=1}^{NRI} PII_{j,i} OUTI_j(t)$$

$$A_i = \frac{1}{0,4TP_i}$$

$$m = ICI_i$$

$$n = IFI_i$$

$$I = 1 \quad \text{até} \quad I = NRI$$

Índice de desempenho

$$ATF(t) = \sum_{I=1}^{NRE} QE_i(t) + \sum_{I=1}^{NRI} QI(t)$$

$$NTP(t) = \sum_{I=1}^{NRE} SG(QE_i(t), FE_i, 0) + \sum_{I=1}^{NRI} SG(QI_i(t), GO_i(t), 0)$$

$$ATA = \sum_{I=1}^{NRE} \frac{XE^2}{1 - XE} + \sum_{I=1}^{NRI} \frac{XI^2}{1 - XI}$$

$$AU = \lim_{t \rightarrow \infty} [(ATF(t+CM) - ATF(t))/CM]$$

$$ATP = \lim_{t \rightarrow \infty} [k(NTP(t+CM) - NTP(t))/CM]$$

$$ATRT = ATA + ATP + AU$$

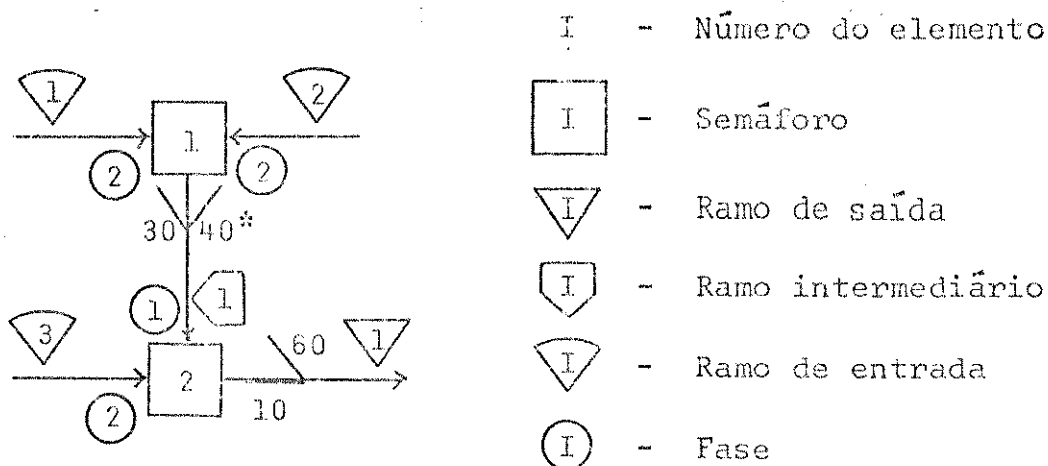


Fig. 3.1 - Representação gráfica dos elementos de uma rede de tráfego neste trabalho.

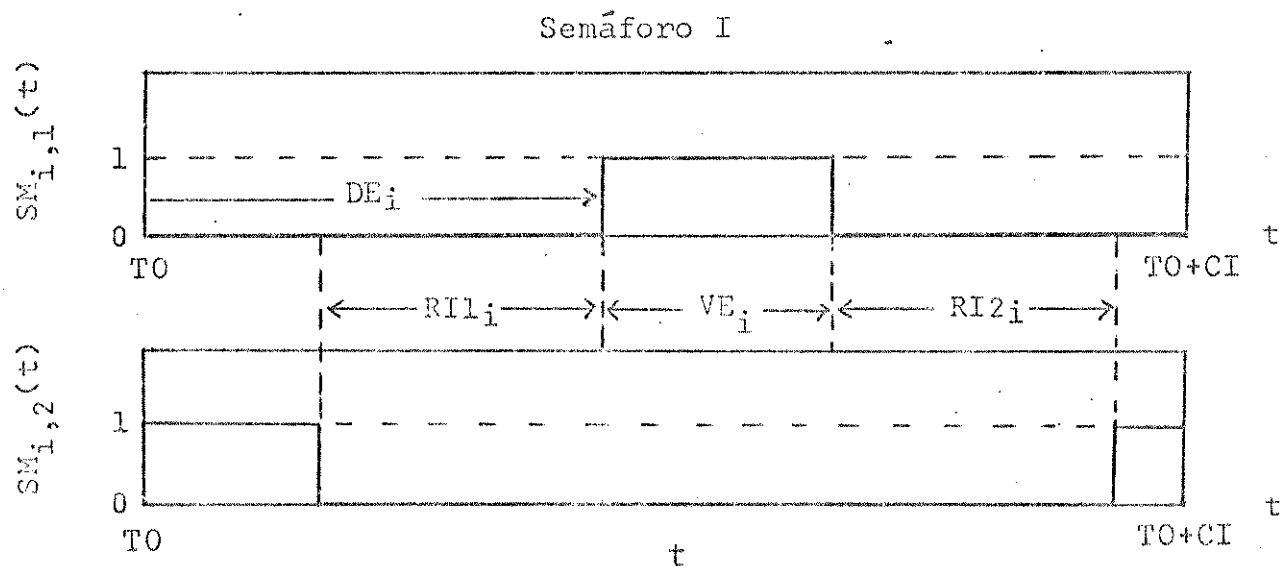
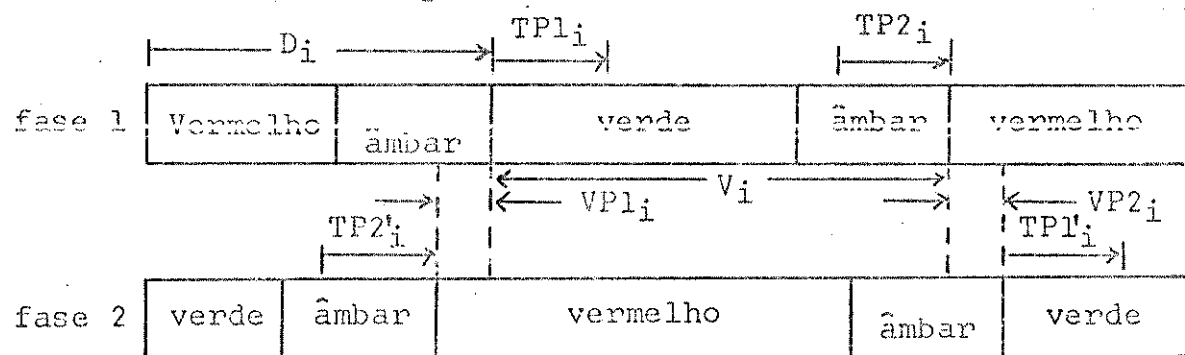


Fig. 3.2 - Um semáforo e o gráfico de suas correspondentes funções $SM(t)$.

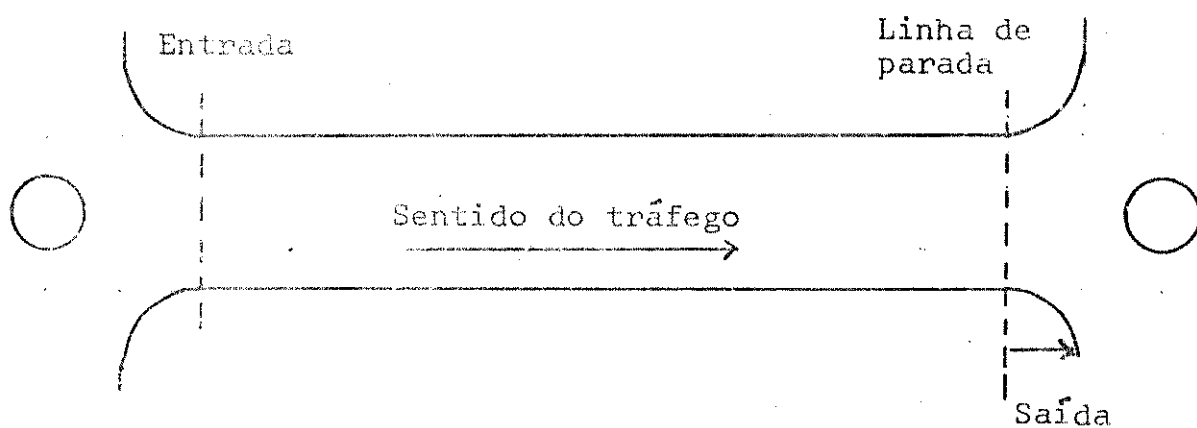


Fig. 3.3 - Pontos em que são considerados os fluxos e filas em um ramo intermediário.

CAPÍTULO IV

OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE SEMÁFOROS

A otimização da política de semáforos em uma rede de tráfego, representada pelo modelo e índice de desempenho associados descritos no capítulo anterior, consiste no seguinte problema:

Dados as equações e o índice de desempenho da rede reunidos na tabela 3.1, obter o conjunto de funções:

$$\{ SM_{i,j}(t) : I=1, NF; J=1, 2 \}$$

que minimiza o índice de desempenho $ATRT$.

No caso de semáforos com indicações pré-estabelecidas, as funções $SM(t)$ possuem forma conhecida e como foi visto na secção 3.2.1, são completamente determinadas pelas variáveis dos semáforos a que se referem:

- CI - Ciclo do semáforo
- VE - Verde efetivo da fase 1
- DE - Defasagem absoluta efetiva
- RI1 - Vermelho integral da fase 1
- RI2 - Vermelho integral da fase 2

RI1 e RI2 são determinados pelas características de cada intersecção e pelo tempo de vermelho para pedestres necessário. (secção 3.2.1)

O ciclo dos semáforos deverá ser na forma $CM, CM/2$ onde CM é o ciclo fundamental da rede.

A defasagem absoluta dos semáforos depende da origem de tempo considerada (secção 2.2.4). Como o índice de desempenho $ATRT$ independe das condições iniciais da rede e portanto da ori-

gem de tempo considerada, a mesma pode ser escolhida de modo a fi xar o valor da defasagem absoluta de um semáforo em zero. Assim sendo, o número de semáforos com defasagem a ser pesquisada dimi nue de um.

O problema da otimização da política de semáforos, trans forma-se no seguinte:

Determinar:

{ CI_i , VE_i , $i=1, NF$; DE_i , $i=1, NF-1$ onde $CI_i=CM$ ou $CI_i=CM/2$ }

que minimiza $ATRT$.

As equações da rede são não lineares e $ATRT$ é uma fun-
ção não convexa de CI , VE , DE . Não é conhecido método teórico pa-
ra solução do problema e os métodos iterativos neste caso não ga-
rantem que o ponto de mínimo obtido seja o global.

A solução é procurar estimar os valores iniciais das va
riáveis com cuidado para que o processo de busca do ponto de míni
mo inicie se possível dentro da região atrativa do ponto de míni
mo global. Após atingido um ponto de mínimo deve-se fazer testes
para verificar se não há outros melhores.

Em qualquer uma das etapas acima, maior esforço computa-
cional significa resultados mais confiáveis, porém não se deve es
quecer que os valores estimados para os parâmetros do modelo: Flu-
xo de saturação, tempos de percurso, fluxos médios, possuem gran-
de variância pois se referem a um fenômeno físico sujeito a varia-
ções aleatórias de grande amplitude. Por exemplo, testes feitos
em Londres e São Francisco mostraram que o desvio padrão do atra-
so de veículos em uma intersecção sinalizada isolada é cerca de
75 % do valor médio obtido. [3]

Da tabela 3.1, tem-se:

$$ATRT = AU + ATP + ATA$$

AU - Função de CI , VE , DE

ATP - Função de CI, VE, DE

ATA - Função de CI, VE

Nos ramos de entrada, devido à suposição de que o fluxo de veículos é constante ao longo do ciclo do semáforo controlando o ramo, AU e ATP são funções apenas de CI e VE.

Em uma rede de tráfego, fixados VE e CI, a variação de ATRT com DE é igual à variação de ATP + AU.

O processo de otimização proposto neste capítulo consta de duas partes:

- Determinação do ciclo e tempo de verde efetivo iniciais dos semáforos.
- Determinação da defasagem absoluta e do tempo de verde efetivos dos semáforos.

4.1 - DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE VERDE EFETIVO E CICLO INICIAIS DOS SEMÁFOROS

O procedimento para determinar o ciclo e o verde efetivo iniciais dos semáforos é o seguinte:

- Considera-se que o fluxo de veículos chegando ao semáforo em todos os ramos da rede é constante e igual ao fluxo médio atravessando o ramo em regime permanente.
- Cálculo do índice de desempenho da rede em função do ciclo e do verde efetivo dos semáforos.
- Determinação do ciclo e verde dos semáforos que minimizam o índice de desempenho.

Considerando:

NF - Número de semáforos na rede

I - Número do semáforo

- J - Número do ramo chegando ao cruzamento
- F - Fluxo médio de veículos em regime permanente chegando ao cruzamento sinalizado.
- FS - Fluxo de saturação dos ramos chegando ao cruzamento
- TPT - Tempo perdido total durante um ciclo
- VE - Verde efetivo da fase 1 do semáforo
- VET - Verde efetivo total do semáforo
- CI - Ciclo do semáforo
- CM - Ciclo fundamental da rede
- ATR - Valor do índice de desempenho para um cruzamento sinalizado
- ATRT - Índice de desempenho da rede
- K - Penalização em tempo por parada de veículo junto ao semáforo

Para um cruzamento como o da figura 4.1.

$$ATR_i(CI_i, VE_i) = \sum_{j=1}^4 \left[\frac{F_{i,j} CI_i (1 - \lambda_{i,j})^2}{2(1 - Y_{i,j})} + \frac{K F_{i,j} (CI_i - V_{i,j})}{CI_i (1 - Y_{i,j})} + \frac{X_{i,j}^2}{4(1 - X_{i,j})} \right] \quad (4.1)$$

onde

$$V_{i,j} = VE_i \quad \text{para} \quad J = 1 \quad \text{até} \quad J = 2$$

$$V_{i,j} = VET_i - VE_i \quad J = 3 \quad \text{até} \quad J = 4 \quad VET_i = CI_i - TPT_i$$

$$\lambda_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{CI_i}$$

$$Y_{i,j} = \frac{F_{i,j}}{FS_{i,j}}$$

$$X_{i,j} = \frac{F_{i,j} CI_i}{FS_{i,j} V_{i,j}} < 1.$$

Impondo a condição de que os ciclos dos semáforos devem ser na forma CM ou CM/2 e adotando como verde efetivo de cada semáforo o verde que minimiza para um dado CI a função $ATR(VE, CI)$, o índice de desempenho $ATRT$ fica:

$$ATRT(C) = \sum_{I=1}^{NF} \min_{VE} \{ \min_{VE} ATR_i(C, VE), \min_{VE} ATR_i(C/2, VE) \} \quad (4.2)$$

O ciclo fundamental da rede é o ponto de mínimo global de $ATRT(C)$: $CM = C$ tal que $ATRT$ é mínimo.

O ciclo de cada semáforo é:

$$CI_i = \begin{cases} CM & \text{se } \min_{VE} ATR_i(CM, VE) < \min_{VE} ATR_i(CM/2, VE) \\ CM/2 & \text{se } \min_{VE} ATR_i(CM/2, VE) < \min_{VE} ATR_i(CM, VE) \end{cases} \quad (4.3)$$

O verde efetivo de cada semáforo é: .

$$VE_i = VE \text{ tal que } ATR_i(CI_i) \text{ é mínimo} \quad (4.4)$$

O intervalo de procura de CM e VE_i é:

$$25s < CM < 200s \quad (4.5)$$

$$L_i - \frac{CI_i}{24} < VE_i < L_i + \frac{CI_i}{24} \quad (4.6)$$

$$L_i = \frac{\max\{Y_{i,1}, Y_{i,2}\}}{\max\{Y_{i,1}, Y_{i,2}\} + \max\{Y_{i,3}, Y_{i,4}\}} VET_i$$

4.2 - DETERMINAÇÃO DAS DEFASAGENS ABSOLUTAS

A obtenção do conjunto de defasagens absolutas que minimizam o índice de desempenho ATPT é feito através de um método de procura de mínimo iterativo utilizando um sistema de computação híbrido para solução das equações da rede e cálculo do índice de desempenho. As defasagens absolutas são representadas dentro do algoritmo de otimização por um conjunto de defasagens relativas escolhido convenientemente.

4.2.1 - Representação das defasagens absolutas por defasagens relativas

Em uma rede de tráfego com NF semáforos em que a defasagem de um deles foi fixada em zero, as NF-1 defasagens absolutas restantes podem ser determinadas a partir de uma combinação de NF-1 defasagens relativas (secção 2.2.4), tomadas sobre os ramos de uma árvore da rede de tráfego. A árvore escolhida na rede será denominada de "árvore de referência de defasagens" e as defasagens de "defasagem base" (figura 4.2)

O motivo da utilização das defasagens relativas é que em redes onde a maioria dos ramos possuem grau de saturação acima de 0,7, o efeito normalizador de fluxos, inerente aos semáforos é bastante acentuado [5], e a contribuição ao índice de desempenho de um ramo da rede de tráfego em função das defasagens é devida principalmente à defasagem relativa entre os semáforos nas extremidades do ramo, pouco sendo influenciada por variações em outras defasagens. O gráfico da figura 4.3 mostra a variação de $ATP + AU$ em um ramo intermediário em função da variação da defasagem absoluta do semáforo na entrada de um ramo intermediário - contíguo que lhe fornece veículos, ficando inalterada a defasagem relativa dos semáforos nas suas extremidades.

O período aproximado da variação da contribuição de um ramo intermediário ao índice de performance, em função da defasagem entre os semáforos nas suas extremidades é CM ou CM/2, dependendo do ciclo dos semáforos e da orientação do ramo. (figura 4.3)

CIF - Ciclo do semáforo no fim do ramo

CII - Ciclo do semáforo no início do ramo

CVD - Período aproximado da variação de $ATP + AU$ no ramo devido à variação da defasagem relativa entre os semáforos nas extremidades.

$$\begin{aligned} \text{CVD} &= \text{CM}/2 \quad \text{se} \quad \left[\begin{array}{l} \text{CIF} = \text{CM}/2 \\ \text{ou} \\ \text{CIF} = \text{CM} \quad \text{e} \quad \text{CII} = \text{CM}/2^* \end{array} \right. \\ \text{CVD} &= \text{CM} \quad \text{se} \quad \text{CIF} = \text{CM} \quad \text{e} \quad \text{CII} = \text{CM} \end{aligned}$$

O período aproximado da variação do índice de desempenho em redes de tráfego com malhas em função de uma das defasagens "base", depende do período das contribuições individuais de cada um dos ramos da rede, cuja defasagem relativa entre os semáforos nas suas extremidades depende da defasagem base em questão. Em redes sem malhas os únicos a contribuírem são os ramos "cobertos" com a própria defasagem base.

4.2.2 - O método de otimização

O método a ser utilizado consiste em selecionar convenientemente uma árvore de referência, aplicando às defasagens base uma sequência de "passagens" onde elas são variadas de um valor fixado por uma fração do período da variação de $ATRT$ com a defasagem sendo pesquisada.

4.2.2.1 - Escolha da árvore de referência de defasagem

A árvore de referência escolhida deve ser aquela que "a coberte" os ramos da rede mais significativos para o índice de desempenho, no que diz respeito a variações de defasagem relativa de semáforos nas suas extremidades.

Em caso de necessidade, a orientação para escolha dos

* Supondo que o grau de saturação dos ramos que fornecem veículos ao ramo em questão, seja aproximadamente igual ou superior a 0,7

ramos a não serem "cobertos" pela árvore é:

- Ramos com fluxo de veículos muito baixo
- Ramos próximos da saturação
- Ramos muito longos

4.2.2.2 - Descrição das "passagens"

As "passagens" do processo de otimização são aplicadas sequencialmente. A sequência e as variações de defasagens utilizadas estão reunidas na tabela 4.1.

Uma passagem consiste no seguinte procedimento, aplicando sequencialmente a todas as defasagens base.

A defasagem escolhida é variada: se ocasionou decréscimo no índice de desempenho, a mesma variação continua a ser aplicada até não mais causar reduções; se a primeira variação ocasionar um aumento no valor do índice, a variação oposta é aplicada enquanto causar decréscimos.

número da passagem	variação de defasagem
1	CVD/8
2	3CVD/8 e CVD/2
3	CM/48
4	CM/48

CVD - Período aproximado da variação do índice ATRT com a defasagem da árvore de referência sendo variada.

CM - Ciclo fundamental da rede

TABELA 4.1 - Magnitude da variação de defasagens das "passagens" do processo de otimização.

4.3 - DETERMINAÇÃO CONJUNTA DO TEMPO DE VERDE E DEFASAGEM ABSOLUTA DOS SEMÁFOROS

A obtenção conjunta do tempo de verde e defasagem dos semáforos, uma vez fixado o ciclo dos mesmos, é feita através de uma sequência de passagens iguais as da secção 4.2, onde são variadas alternadamente defasagens relativas ou verde efetivo de semáforos. O valor das variações envolvidas e a sequência das passagens estão reunidas na tabela 4.2

Número da passagem	Variação de defasagem	Variação de verde
1	CVD/8	-
2	3CVD/8 e CVD/2	-
3	-	CM/48
4	CVD/8	-
5	3CVD/8 e CVD/2	-
6	CM/48	-
7	-	CM/48
8	CM/48	-

Tabela 4.2 - Magnitude das variações de defasagens e verde efetivo das passagens do processo de otimização.

4.4 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MÉTODO

A impossibilidade de uma verificação teórica do desempenho do método de otimização proposto nas seções 4.2 e 4.3 e dada a dificuldade e o trabalho envolvido em uma verificação experimental, que somente pode concluir de modo definitivo quando ocorrer a detecção de uma falha do método, nesta seção, será feita apenas uma análise comparativa entre o desempenho do novo método de otimização de verdes e defasagens e o utilizado pelo método do TRANSYT (apêndice 1).

O método de otimização de defasagens e verde proposto é uma modificação do método do TRANSYT, visando melhorar o desempenho de suas "passagens" relacionadas com variações de defasagens, nas aplicações em redes com ciclos na forma CM, CM/2. Como as modificações introduzidas não afetam o número e a ordem das "passagens" do método original, mantendo ainda inalteradas as "passagens" relacionadas com variações de verde, é razoável esperar que a qualidade do desempenho do método proposto, na otimização dos tempos de verde, seja mantida.

Na rede da figura 4.3, a variação isolada da defasagem absoluta do semáforo 1 é equivalente à variação da defasagem relativa $D_{1,2}$. Como pode ser verificado no apêndice 1, o valor das variações médias e grandes de defasagem, previstas pelo método do TRANSYT para a rede em questão, são respectivamente $VD_1 = 11.2$ e $VD_2 = 32$. No gráfico da variação do índice de desempenho do ramo intermediário 1 em função de $D_{1,2}$, pode ser visto que partindo do ponto de mínimo local, $D_{1,2} = 35$, a variação VD_1 testa os pontos $D_{1,2} = 46.2$ e $D_{1,2} = 23.8$ e a variação VD_2 testa os pontos $D_{1,2} = 67$ e $D_{1,2} = 3$, nenhum deles com valores próximos do ponto de mínimo global $D_{1,2} = 53.6$, o que mostra a inadequação do método do TRANSYT quando aplicado a redes com ciclos CM e CM/2. Na mesma situação, o método proposto atinge o ponto de mínimo global com a sua variação de defasagem máxima, $VD = 20$.

O desempenho do método proposto, tem grande possibilidade de se apresentar sempre superior ao do TRANSYT, quando aplica-

do a redes sem malhas, supondo uma boa escolha dos CVDs das defasagens "base". Os motivos desta afirmação são os seguintes:

- A utilização de defasagens relativas, dá consistência ao processo sequencial de aplicação de variações de defasagem utilizado nas "passagens" do método proposto, pois explora o efeito normalizador de fluxos dos semáforos, que se completo, faz com que o mínimo global da rede seja obtido através dos mínimos globais das contribuições isoladas de cada uma das defasagens "base".

- Os histogramas de influência de uma defasagem "base" no índice de desempenho da rede, geralmente são mais simples que os devidos à variação isolada de uma defasagem absoluta, pois a variação isolada de uma defasagem absoluta, afeta uma ou mais defasagens relativas. Por exemplo, na rede apresentada na figura 4.3, o histograma de variação do índice de desempenho com a defasagem absoluta do semáforo 2, é praticamente a combinação dos histogramas das defasagens relativas $D_{1,2}$ e $D_{2,3}$.

Finalmente, quanto ao desempenho do método quando aplicado em redes com malhas, pode-se dizer que ele será satisfatório sempre que as malhas puderem ser abertas, sem que o índice de desempenho da rede seja afetado significativamente. O processo de abertura de uma malha consiste em substituir um ramo da malha por um ramo de entrada com mesmo fluxo. O critério para escolha do ramo da rede a ser substituído é o mesmo da secção 4.2.2.1, para escolha dos ramos de uma rede com malhas a não serem "cobertos" pela árvore de referência de defasagens.

O processo de otimização de defasagens e verde deve ser repetido para diferentes valores de ciclos, no entorno do valor previsto na secção 4.1, antes da escolha do valor final para o ciclo dos semáforos. A amplitude da busca é difícil de ser generalizada e uma sugestão, de "bom senso", é utilizar como valores iniciais, para a divisão de tempo de verde entre as fases e a defasagem dos semáforos, o valor final obtido na tentativa anterior que resultou no menor índice de desempenho.

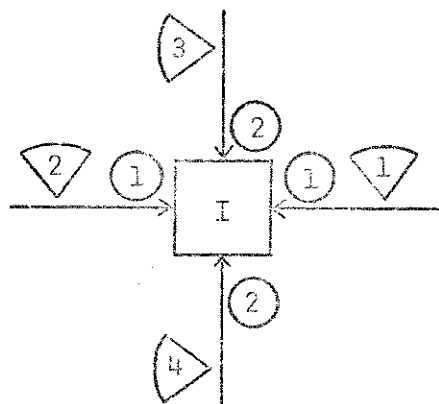
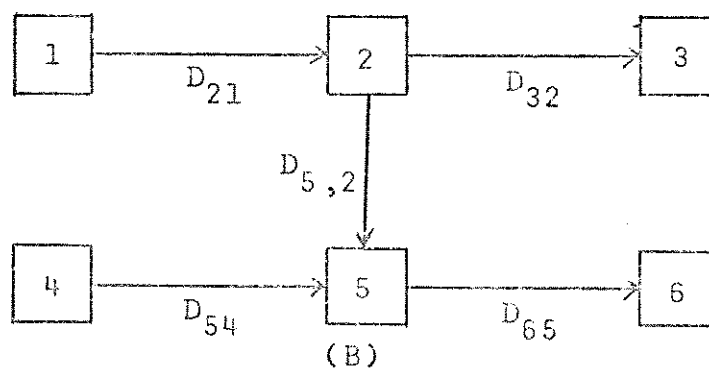
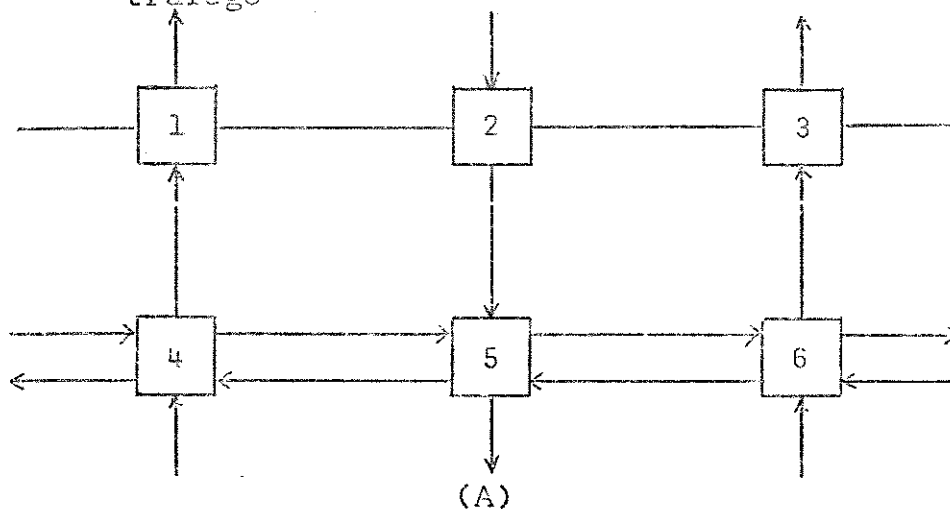


Fig. 4.1 - Convenção utilizada na numeração dos ramos com relação a fase de chegada ao semáforo, para cálculo do ciclo e verde efetivo dos semáforos em uma rede de tráfego



$D_{i,j}$ - Defasagem do semáforo i em relação ao semáforo j

Fig. 4.2 - (A) Rede de tráfego e
(B) Uma de suas possíveis "árvores" de referência de defasagens

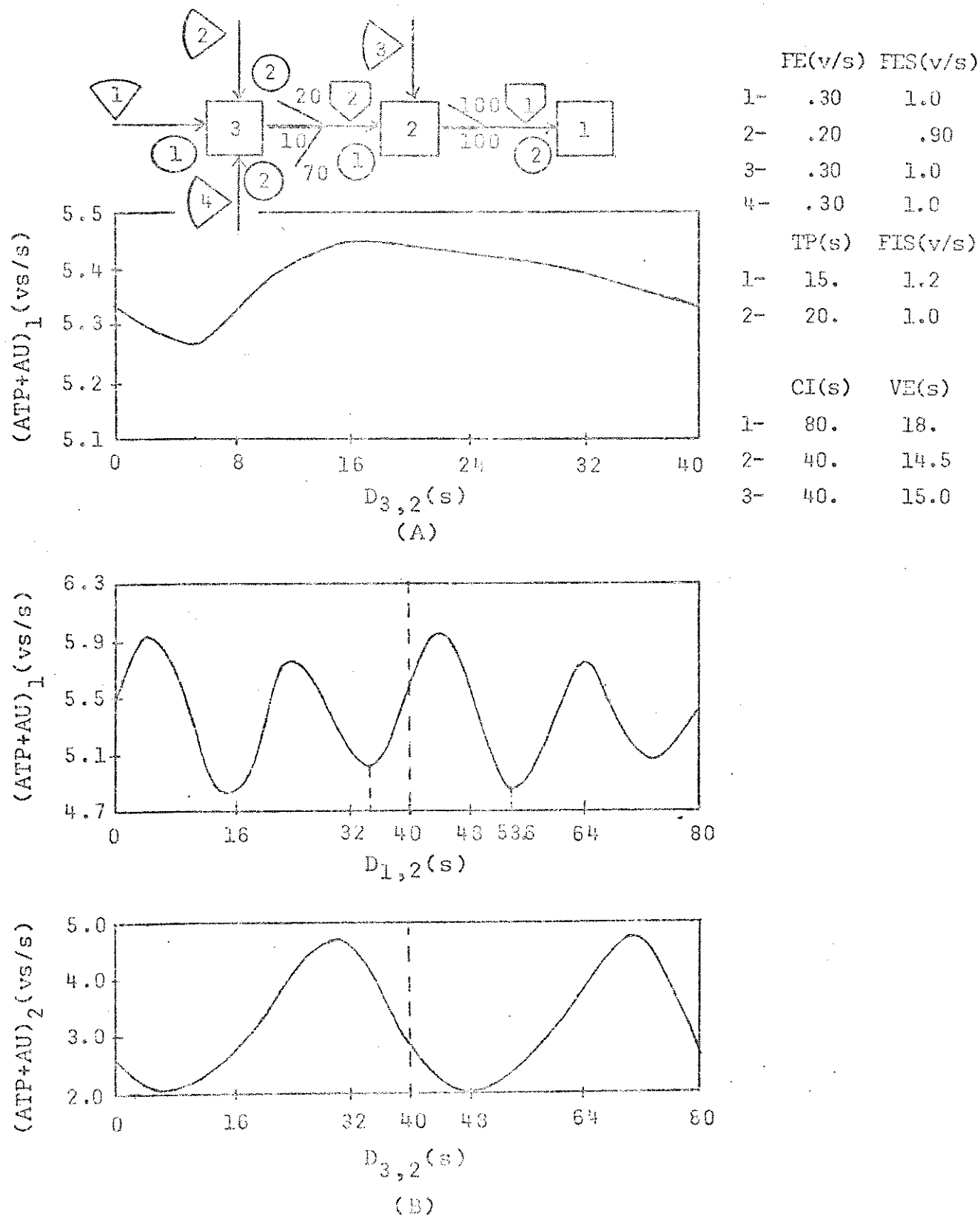


Fig. 4.3 - (A) Exemplo de variação de ATP+AU em um ramo interme-
diário em função da defasagem relativa dos semáforos
nas extremidades de um outro ramo a ele contíguo
(B) Exemplo de variação de ATP+AU em ramos intermedi-
ários em função da defasagem relativa dos semáforos
nas suas extremidades.

CAPÍTULO V

O PROGRAMA HÍBRIDO

5.1 - INTRODUÇÃO

Um sistema de computação híbrido reúne as facilidades de operações algébricas e ordenação de decisões lógicas de um computador digital, com a velocidade e simultaneidade de solução de equações diferenciais de um computador analógico.

No presente caso, as equações reunidas na tabela 3.1 são simuladas de acordo com o esquema da figura 5.1.

O tempo é discretizado em intervalos de CM/48s e o sincronismo entre os computadores é obtido através de Interrupções do Relógio da Interface (EAI-693 TIMER)

A programação analógica é feita de modo que o usuário tenha liberdade de escolha da posição no computador dos elementos analógicos envolvidos na simulação. O escalonamento de magnitude e tempo para os ramos de entrada e intermediários é padronizado, o que facilita a programação. O escalonamento de magnitude do índice de desempenho não pode ser previsto com antecedência e fica a critério do usuário.

O programa digital é composto de um programa principal e um conjunto de subrotinas, cada qual com uma das funções abaixo:

- Geração da representação interna dos semáforos
- Variação da política de semáforos
- Solução das equações da rede e obtenção do Índice de performance para uma dada política de semáforos.
- Processo de otimização
- Saída de dados

A forma da subrotina relacionada com o processo de otimização é prevista de modo a permitir ao usuário utilizar o pro-

cesso de otimização de defasagens e verdes no capítulo 4 ou outro qualquer, desde que convenientemente programado, podendo envolver a variação simultânea do ciclo verde e defasagem dos semáforos.

5.2 - DADOS NECESSÁRIOS

Nesta secção são apresentados os dados necessários ao programa digital e ao circuito analógico. A simbologia usada é a mesma dos capítulos 3 e 4.

Rede de tráfego:

- CM - Ciclo fundamental
- NF - Número de semáforos
- NRI - Número de ramos intermediários
- NRE - Número de ramos de entrada
- NRS - Número de ramos de saída
- PEI - Matriz de conversões dos ramos de entrada nos intermediários
- PES - Idem para os ramos de entrada e ramos de saída
- PII - Idem entre os ramos intermediários
- PIS - Idem para os ramos intermediários e de saída

Ramos de entrada:

- ICE - Número do semáforo de chegada do ramo
- IFE - Número da fase do semáforo que controla o ramo
- FE - Fluxo de veículos no ramo
- FES - Fluxo de saturação do ramo

Ramos intermediários:

- ICI - Número de semáforo de chegada do ramo
- IFI - Número da fase do semáforo que controla o ramo
- A - Fator de difusão do ramo
- TP - Tempo de percurso médio do ramo
- FI - Fluxo médio em regime permanente no ramo
- FIS - Fluxo de saturação do ramo

Circuito analógico:

- SQT - Escala de tempo global da programação analógica
- SQC - Escala de tempo do circuito analógico
- SQF - Escala de magnitude do atraso devido às filas
- SQP - Escala de magnitude do número de paradas
- NP - Número de potenciômetros utilizados no circuito
- ADR - Endereço do potenciômetro no painel do computador
- IVAL - Valor do potenciômetro

Semáforos:

- CI - Ciclo
- VE - Verde efetivo da fase 1
- DE - Defasagem efetiva absoluta
- RI1 - Vermelho integral da fase 1
- RI2 - Idem para a fase 2
- VEM1 - Verde efetivo mínimo da fase 1

VEM2 - Idem para a fase 2

Defasagem base :

NDEB - Número de semáforos afetados pela variação da defasagem base

NDEA - Matriz contendo o número dos semáforos afetados pela defasagem base

CVB - Período aproximado da variação do índice de desempenho com as defasagens base.

Os dados VEM1 e VEM2 somente são necessários quando o processo de otimização incluir a variação do tempo de verde dos semáforos.

Os dados CI, VE, DE correspondem aos valores iniciais - das variáveis no caso de se utilizar um processo de otimização em que CI, VE e DE são variados simultaneamente.

No caso de se adotar o processo de otimização proposto no capítulo 4, CI e VE deverão ser calculados previamente por um programa para computador digital e DE é a defasagem absoluta inicial dos semáforos.

5.3 - PROGRAMAÇÃO ANALÓGICA

Nos diagramas apresentados nesta secção, os elementos do circuito analógico, com posição no painel fixada pelo programa no computador digital, possuem o correspondente número. A posição dos não numerados é livre. A escala de tempo SQC deve ser escolhida de modo que SQT possa ter o seu valor máximo permitido (secção)

5.3.1 - Ramos de Entrada

O circuito analógico para simulação de um ramo de entrada (equações 3.5 e 3.6) é apresentado na figura 5.2, onde :

I - Número do ramo

$VEM_{m,n}$ - Verde efetivo mínimo da fase N do semáforo M

- SQE_i - Valor máximo previsto para a fila de veículos em um ramo de entrada
- L - Número da Linha de Controle ("Control Line") relacionada com a função semáforo $SM(t)$ controlando o ramo

$$SQE_i = FES_i (CI_m - VEM_{m,n}) \quad (5.1)$$

onde:

$$M = ICE_i$$

$$N = IFE_i$$

$$L_i = (ICE_i - 1)^2 + IFE_i - 1 \quad (5.2)$$

5.3.2 - Ramos intermediários

O circuito analógico de um ramo intermediário (equações 3.7, 3.8, 3.9, 3.10) é apresentado na figura 5.3, onde:

- I - Número do ramo
- $VEM_{m,n}$ - Vide seção 5.3.1
- L - Número da linha de controle relacionada com a função semáforo $SM(t)$ que controla o ramo
- SQI - Valor máximo previsto para a fila de veículos em um ramo intermediário
- PE_j - Valor do potenciômetro ligando o fluxo de saída do ramo de entrada J com a entrada do ramo intermediário I
- PI_j - Valor do potenciômetro ligando o fluxo de saída do ramo intermediário J com o ramo intermediário I

$$SQI_i = FIS_i (CI_m - VEM_{m,n}) \quad (5.3)$$

onde

$$M = ICI_i$$

$$N = IFI_i$$

$$PE_j = FES_j PEI_{j,i} A_i SQC/FIS_i \quad (5.4)$$

$$PI_j = FIS_j PII_{j,i} A_i SQC/FIS_i \quad (5.5)$$

$$L = (ICI_i - 1) 2 + IFI_i - 1 \quad (5.6)$$

5.3.3 - Índice de desempenho e número de veículos na rede

No computador analógico é obtido parte dos componentes AU e TP do índice de desempenho. Os valores obtidos são enviados ao computador digital para o cálculo de ATRT através da equação 3.11.

O incremento do número de veículos na rede durante um intervalo de tempo $[t, t+CM]$ é utilizado pelo computador digital para detectar a condição de regime permanente nas equações da rede.

$NV(\tau_1, \tau_2)$ - Incremento do número de veículos na rede durante o intervalo de tempo $[\tau_1, \tau_1+\tau_2]$

$ATFA(\tau_1, \tau_2)$ - Incremento do atraso de veículos nas filas junto aos semáforos durante o intervalo de tempo $[\tau_1, \tau_1+\tau_2]$

$NTPA(\tau_1, \tau_2)$ - Incremento do número de paradas veículos junto aos semáforos durante o intervalo de tempo $[\tau_1, \tau_1+\tau_2]$

$$NV(\tau_1, \tau_2) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\sum_{I=1}^{NRE} FE_i - \sum_{I=1}^{NRS} FS_i \right) dt \quad (5.7)$$

onde FS_i é dado pela equação 3.11.

$$ATFA(\tau_1, \tau_2) = ATF(\tau_2) - ATF(\tau_1) \quad (5.8)$$

$$NTPA(\tau_1, \tau_2) = NTP(\tau_2) - NTP(\tau_1) \quad (5.9)$$

onde $ATF(t)$ e $NTP(t)$ são dados pelas equações 3.12 e 3.13.

Na figura 5.4 é apresentado o diagrama do circuito analógico para obtenção de $ATFA(\tau_1, \tau_2)$, $NTPA(\tau_1, \tau_2)$, $NV(\tau_1, \tau_2)$ onde:

SQF - Valor máximo estimado para $ATFA(\tau_1, CM)$

SQP - Valor máximo estimado para $NTPA(\tau_1, CM)$

SQV - Valor máximo estimado para $NV(\tau_1, CM)$

$$\tau_1 = PIN(t/CM) \quad CM \quad (5.10)$$

$$\tau_2 = PFR(t/CM) \quad (5.11)$$

onde

$PIN(X)$ - Parte inteira de X

$PFR(X)$ - Parte fracionária de X

5.3.4 - Lógica paralela associada ao Relógio da Interface (EAI 693-TIMER)

Na figura 5.5 é apresentado o circuito lógico associado ao relógio da interface onde:

FCI - Frequência dos pulsos entrando no relógio

Quando o modo lógico do computador é RUN, FCI=500KHz

NOTA: Antes da execução do programa, a seleção da escala de tempo no console do computador analógico deve ser feita manualmente.

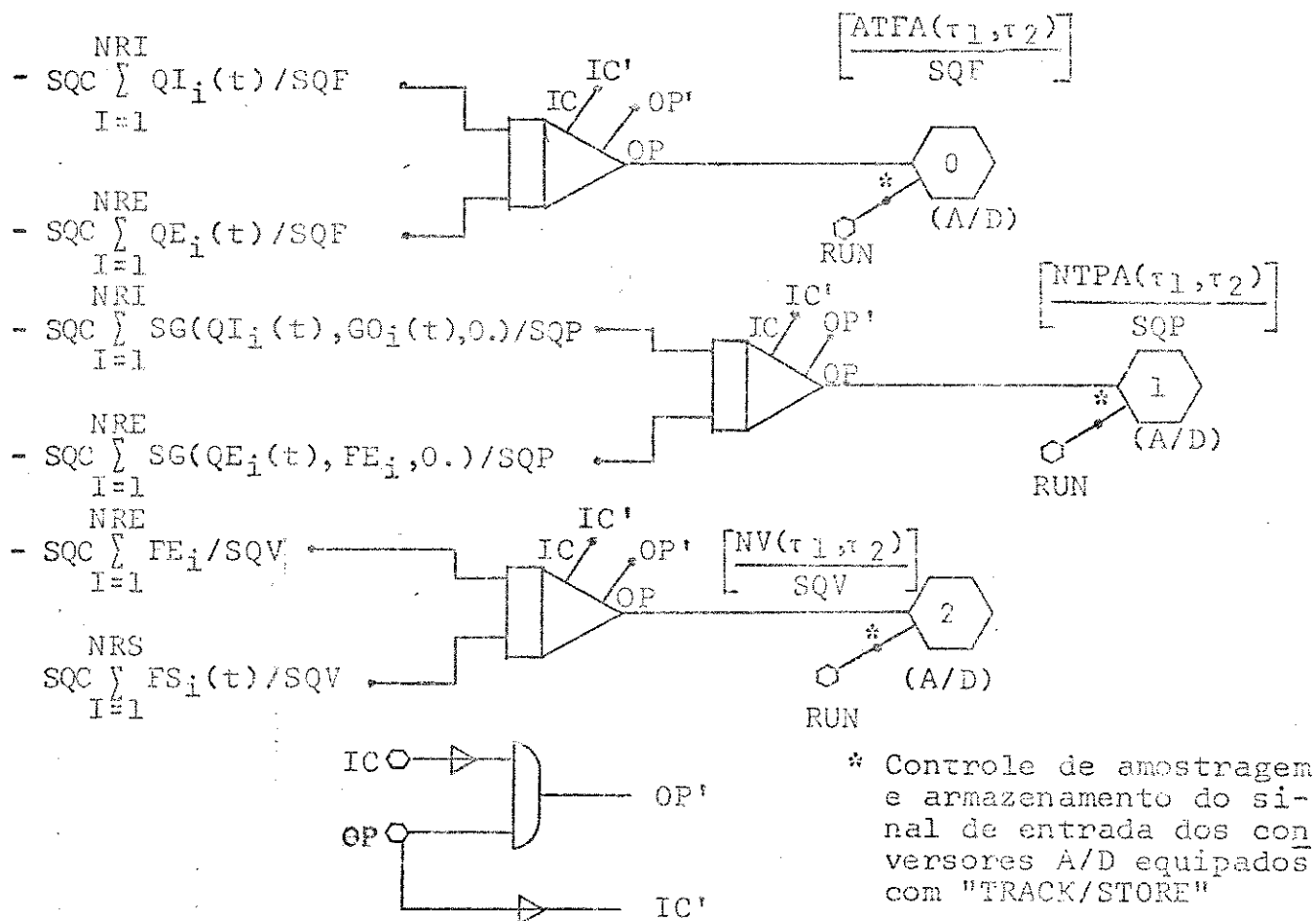


Fig. 5.4 - Circuito analógico para simulação de $\text{ATFA}(\tau_1, \tau_2)$, $\text{NTPA}(\tau_1, \tau_2)$, $\text{NV}(\tau_1, \tau_2)$

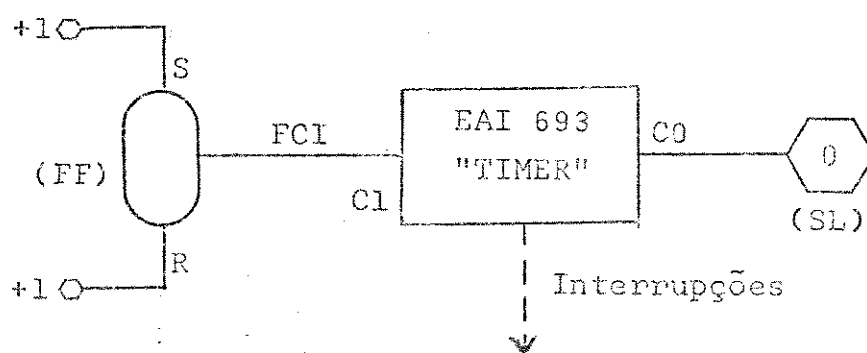


Fig. 5.5 - Circuito lógico paralelo associado com o Relógio da Interface

5.4 - O PROGRAMA DIGITAL

A linguagem de programação utilizada é FORTRAN IV utilizando codificação Assembler interna. [8]

A memória requerida pelo programa é 16 K palavras para redes com: 16 ramos de entrada, 16 ramos intermediários e 8 semáforos de duas fases.

O sistema de computação previsto é o sistema híbrido EAI-690 com a seguinte configuração:

Teletipo - Teletetype ASR33 - Saída de dados

Leitora de cartões - EAI-640/500 - Entrada de dados

Computador digital - EAI-640 ou PACER-100

Computador analógico - EAI-680

Interface EAI-693

Objetivando maior versatilidade de utilização, as partes principais do programa foram programadas na forma de subrotinas coordenadas por um programa principal.

A descrição da programação é feita através de diagramas de bloco.

Para uma boa compreensão de todos os passos do programa é importante conhecer a arquitetura e instruções de máquina do computador EAI-640 e interface EAI-693. [6], [7]

5.4.1 - O Programa Principal

O programa principal consta das seguintes partes:

- Inicialização do console analógico.

A inicialização consiste em zerar as linhas de controle ("Control Lines"), os canais D/A, e selecionar o modo lógico CLEAR.

- Reconhecimento e atendimento de Interrupções

O reconhecimento de Interrupções da interface e do controle analógico pelo computador digital em um sistema EAI-690

é controlado pelas seguintes máscaras ligadas em série: máscara do console, máscara da interface ("External Mask"), máscara do computador digital ou Interna (Registro K - "Program Status Word") e "Master Interrupt bit".

Na figura 5.6 é apresentada a configuração de "bits" nas diversas máscaras de modo a permitir o reconhecimento de Interrupções do "EAI-693 TIMER" e falhas em componentes analógicos, incluindo saturação de amplificadores.

A máscara do console é zerada pois ela se relaciona apenas com as Interrupções programadas no console analógico (GPI - "General Purpose Interrupts") não utilizados na presente programação.

O controle final de reconhecimento de Interrupções é feito pelo "Master interrupt bit" que atua da maneira indicada no diagrama de blocos na secção 5.4.1.2 .

As Interrupções reconhecidas são servidas pelas subrotinas de serviço OPER, FAULT, DUMY da seguinte forma:

Interrupção do EAI-693 TIMER → Subrotina OPER

Interrupção de Falha → Subrotina FAULT

As Interrupções do "TIMER" e falha pendentes são desarmadas pela subrotina DUMY.

- Leitura de dados
Ver secção 5.4.1.1

- Posicionamento de Potenciômetros

O posicionamento dos potenciômetros é feito através de uma subrotina da EAI(QWPS) no início do programa.

- Ordem se chamada das subrotinas
Ver diagrama de blocos na secção 5.4.1.2

- Saída de dados

A saída de dados ocorre no início do programa (Políti

ca de semáforos inicial e correspondente índice de desempenho) e no final do programa (Política de semáforos ótima e correspondente índice de desempenho). Ver subrotina SAÍDA

5.4.1.1 - Entrada de dados

A sequência da leitura de cartões de dados é a seguinte:

- Um cartão contendo os dados da rede:

CM, TOL, NF, NRI, NRE (Formato F10.0)

- Um cartão contendo o número de semáforos afetados por cada uma das defasagens base

NDEB_i ; I = 1, NF-1 (Formato F10.0)

- Um cartão contendo o período aproximado da variação do índice de desempenho com cada uma das defasagens base :

CVB_i, I = 1, NF - 1 (Formato F10.0)

- NF-1 cartões contendo cada um deles os números dos semáforos afetados por uma defasagem base, ordenados de acordo com o número da defasagem na árvore de referência

NDEA_{i,j} ; j = 1, NDEB_i (Formato F10.0)

- Um cartão contendo as escalas do circuito analógico:

SQT, SQF, SQP, NP (Formato F10.0)

- N cartões contendo o endereço e o valor dos NP potenciômetros do circuito analógico no console um. Cada cartão contém 4 potenciômetros.

ADR, IVAL (Formato A4,6X,S10)

- NF cartões, cada um contendo os dados correspondentes a um semáforo. Os cartões são ordenados de acordo com o número do semáforo

CI, DE, VE, RI1, RI2, VEM1, VEM2 (Formato F10.0)

- NRE cartões contendo os dados correspondentes a um ramo de entrada, ordenados de acordo com o número do ramo.

FE, FES, ICE, IFE (Formato F10.0)

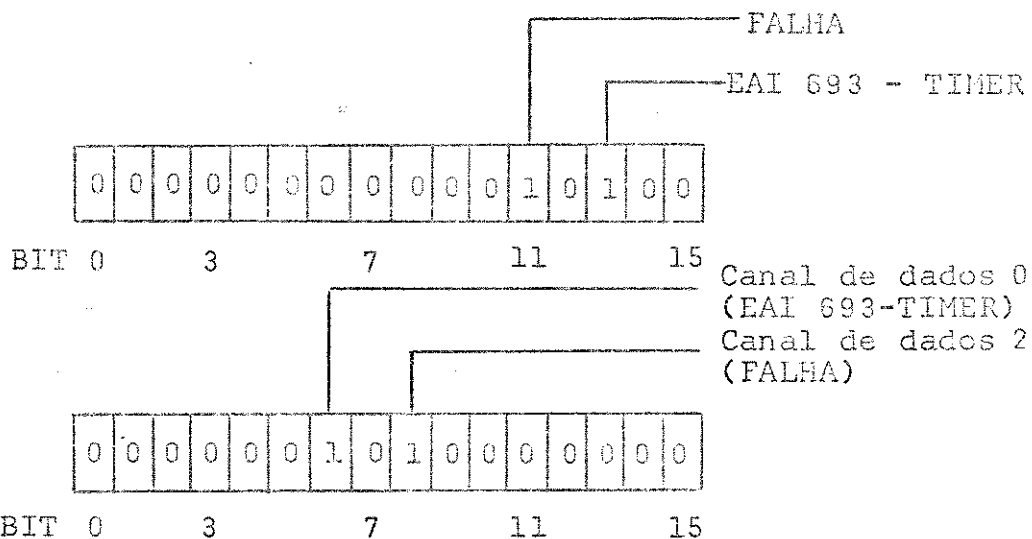
- NRI cartões contendo os dados correspondentes a um ramo intermediário, ordenados de acordo com o número do ramo

TP, FI, FIS, ICI, IFI (Formato F10.0)

máscara
do console



máscara
Externa



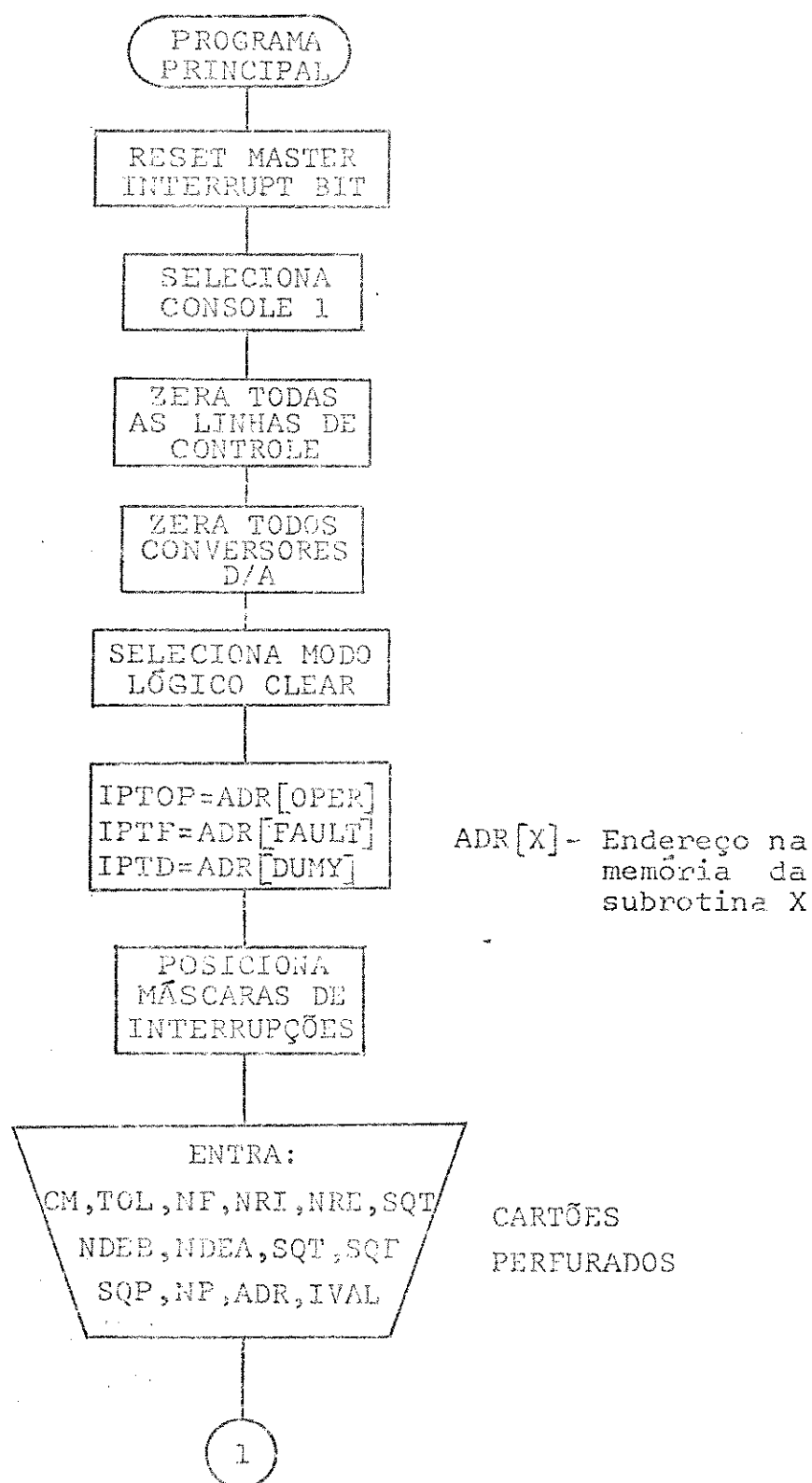
Master
Interrupt Bit

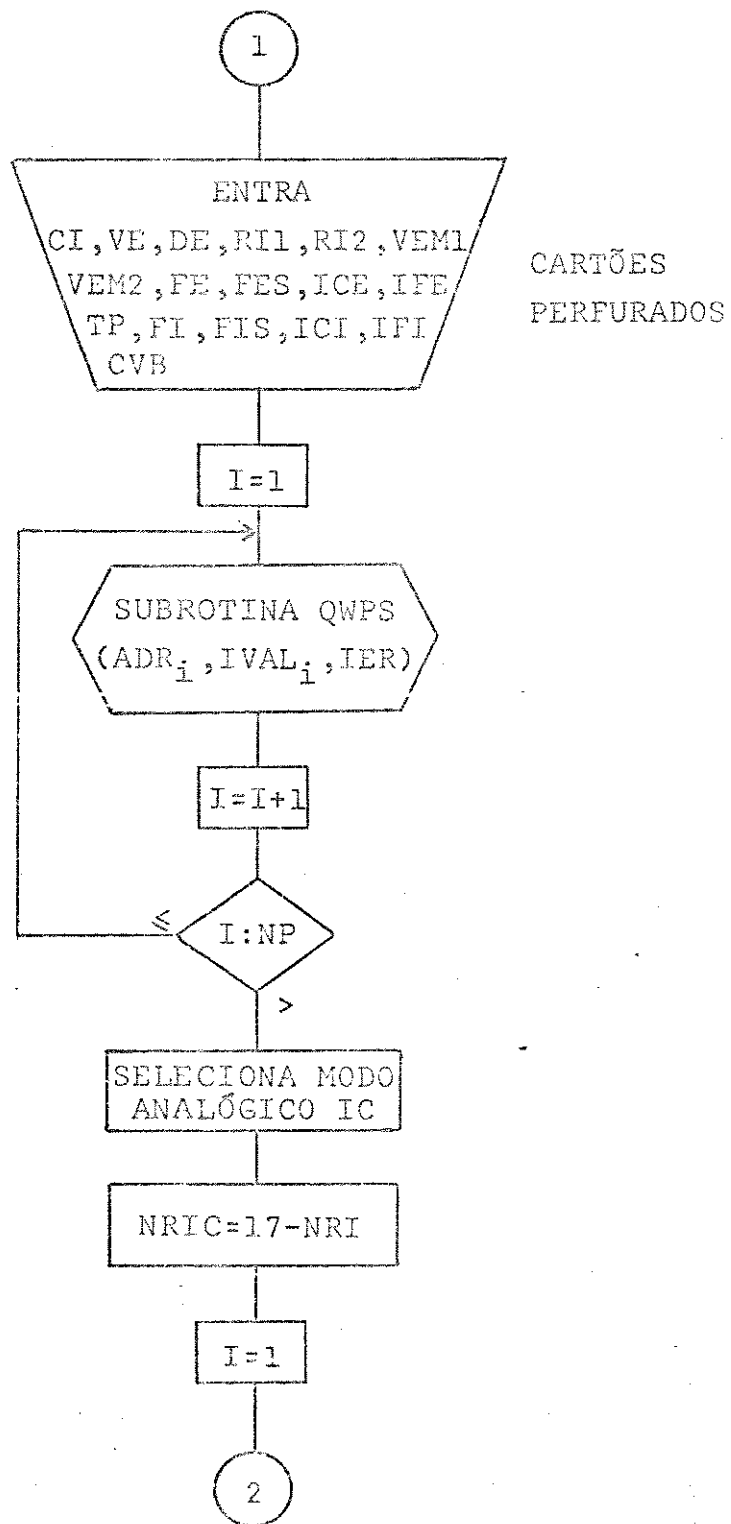


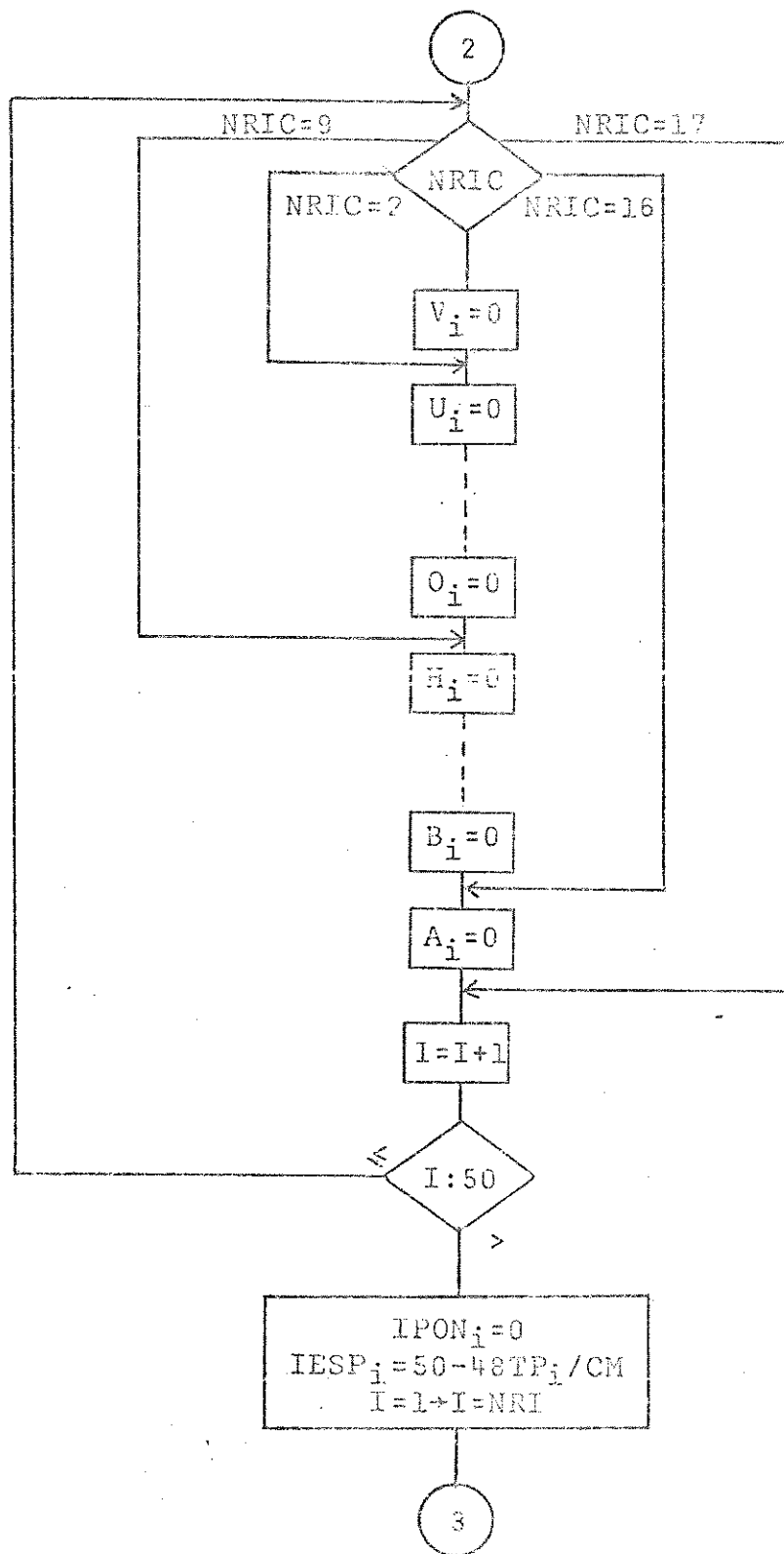
*I - Variável lógica controlada pelas instruções
"RESET MASTER INTERRUPT BIT" e "SET MASTER
INTERRUPT BIT" no diagrama de blocos na
secção 5.4.1.2

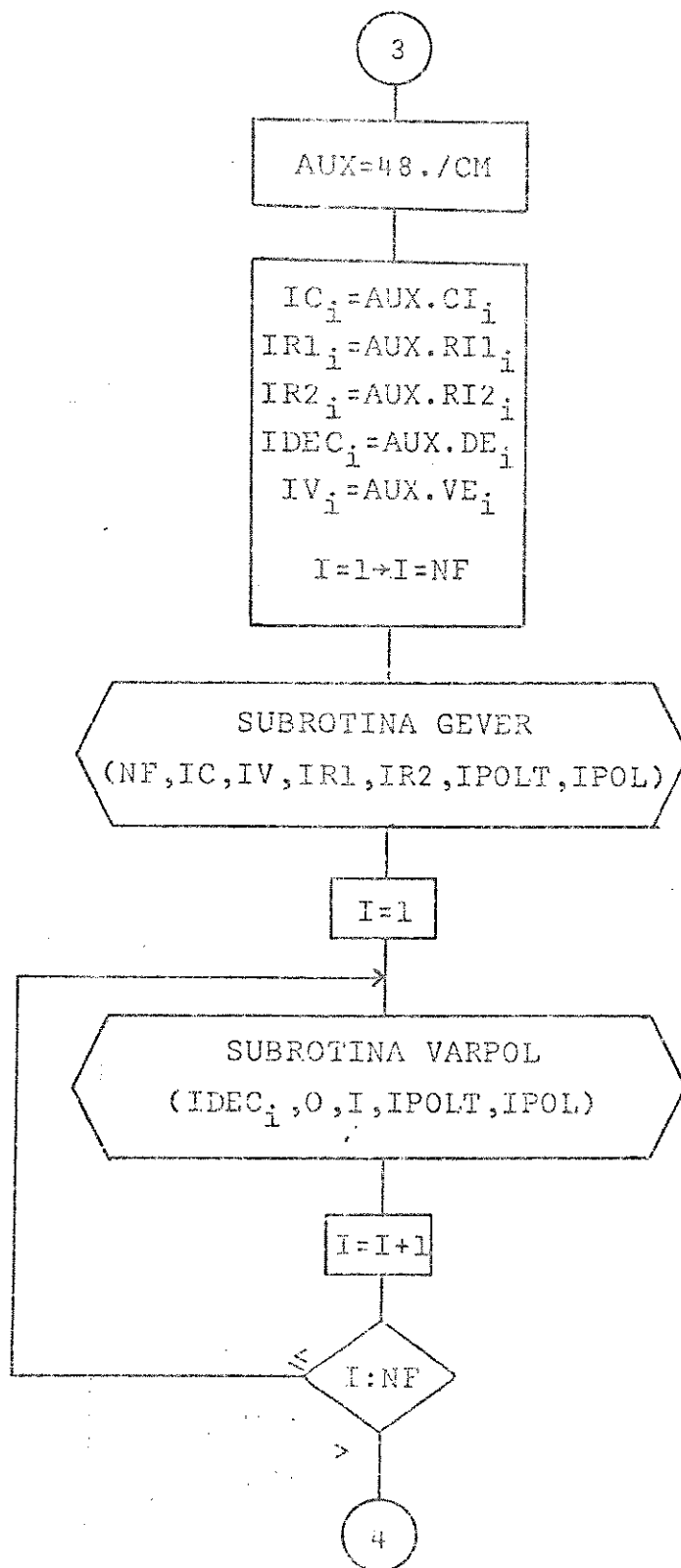
Fig. 5.6 - Estado de Bits nas máscaras de interrupções

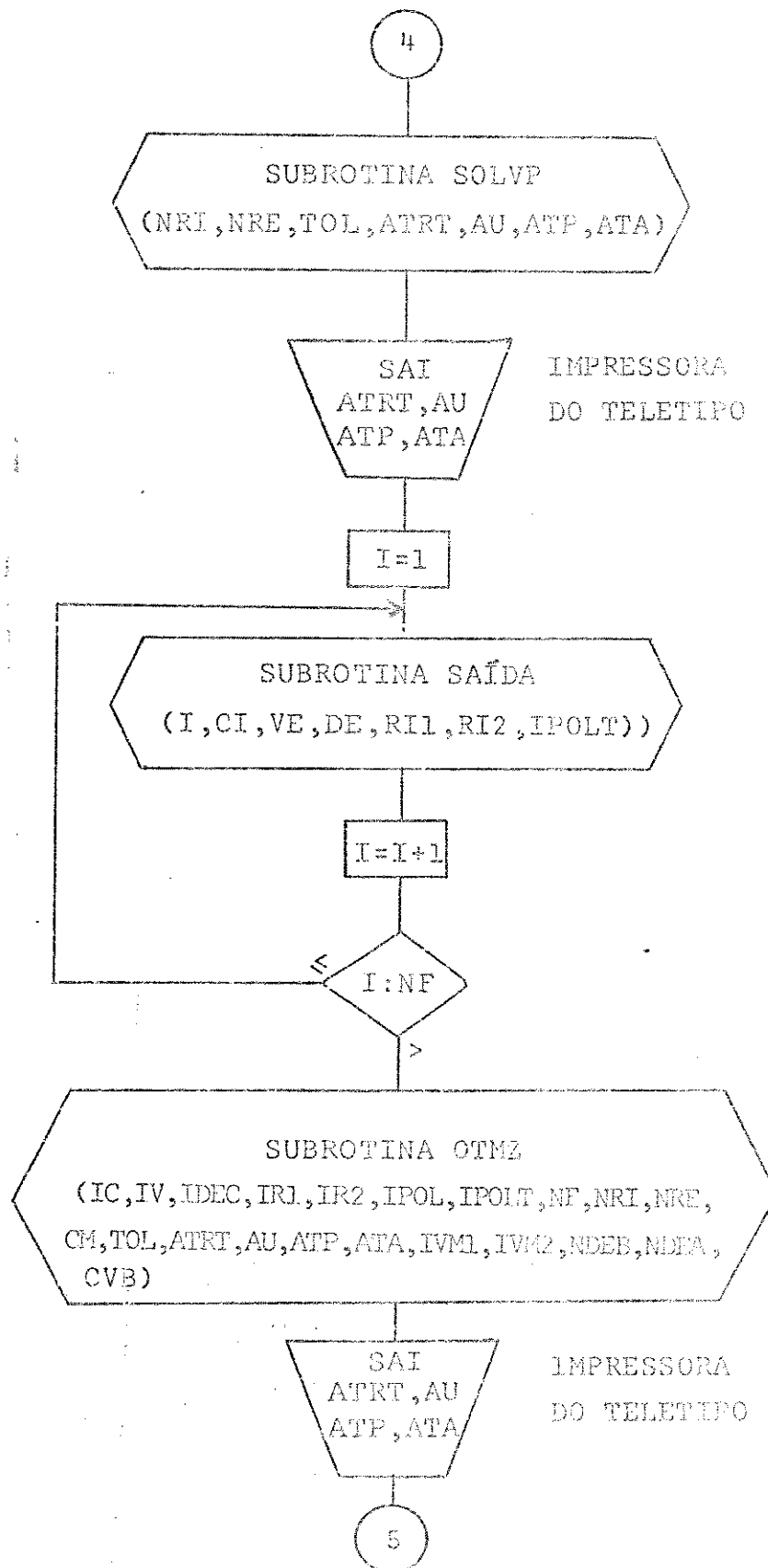
5.4.1.2 - Diagrama de Blocos

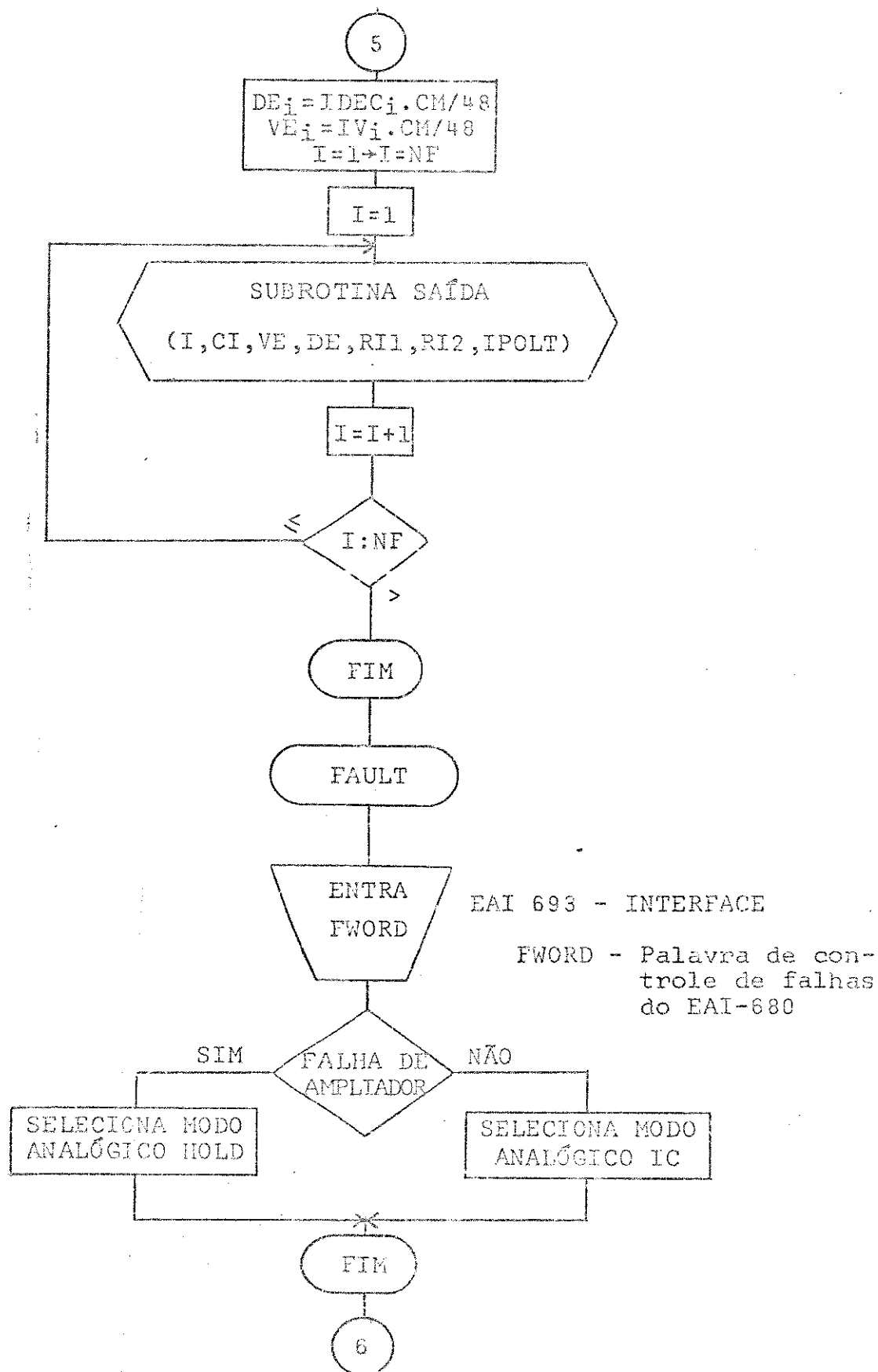


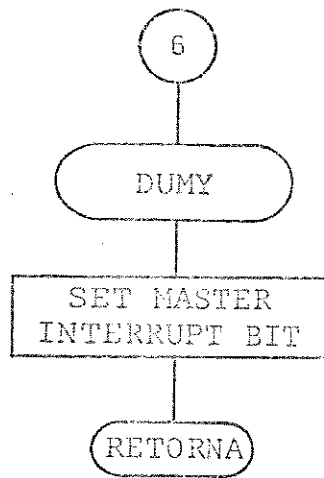












5.4.2 - Subrotina GEVER

5.4.2.1 - Função

Geração da representação interna dos semáforos com defasagem absoluta nula, dados os tempos de ciclo, verde e vermelhos integrais

5.4.2.2 - Chamada

CALL GEVER (NF, IC, IV, IR1, IR2, IPOLT, IPOL)

Onde:

- NF - Inteiro especificando o número de semáforos na rede
- IC - Matriz inteira contendo o ciclo dos semáforos em número de intervalos de tempo, ordenados de acordo com o número dos semáforos
- IV - Matriz inteira contendo o tempo de verde efetivo da fase um dos semáforos em número de intervalos de tempo, ordenados de acordo com o número do semáforo
- IR1 - Matriz inteira contendo o tempo de vermelho integral da fase um dos semáforos em número de intervalos de tempo, ordenados de acordo com o número do semáforo.
- IR2 - Matriz inteira contendo o tempo de vermelho integral da fase dois dos semáforos, ordenados segundo o número dos mesmos.
- IPOLT - Matriz inteira contendo o estado de cada uma das fases dos semáforos no tempo, ordenados de acordo com o número do semáforo e da fase
- IPOL - Matriz inteira contendo o estado de todos os semáforos da rede, ordenados segundo o número do intervalo de tempo

- Argumentos para transferência de dados do programa -

principal para a subrotina:

NF, IC, IV, IR1, IR2

- Argumentos para retorno de resultados:

IPOLT, IPOL

5.4.2.3 - Descrição

Esta subrotina, a partir dos dados dos semáforos expressos em intervalos de tempo do ciclo fundamental da rede, constroeu uma matriz de elementos Lógicos L correspondendo à discretização com "segurador de ordem zero" das funções $SM_{i,j}(t)$

I - Número do semáforo

J - Número da fase

K - Número do intervalo de tempo

Δ_t - Comprimento do intervalo de tempo

CM - Ciclo fundamental da rede

$$L_{i,j,k} = SM_{i,j}((K-1)\Delta_t) = \begin{matrix} 0 & \text{vermelho} \\ 1 & \text{verde} \end{matrix} \quad (5.12)$$

onde

$$\Delta_t = CM/48$$

Os elementos da matriz L são armazenados no computador na forma das matrizes IPOLT, IPOL, relacionando o estado de cada "bit" das posições de memória ocupadas pelas matrizes com um elemento de L.

Na figura 5.2 está esquematizada a maneira como os elementos da matriz L foram armazenados nos elementos da matriz IPOLT.

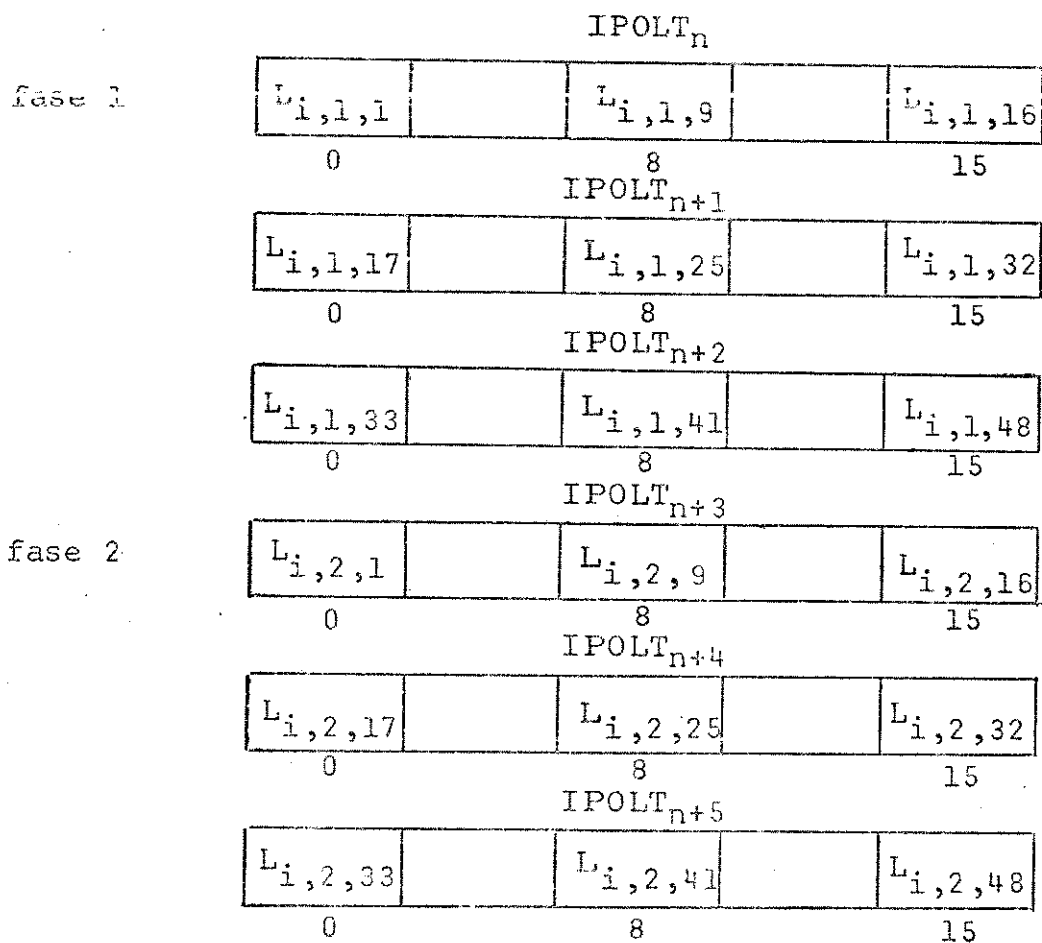
Um elemento da matriz IPOL representa o estado dos semáforos da rede num intervalo de tempo. A configuração de "bits" em um elemento de IPOL é obtida de L do seguinte modo:

- I - Número do semáforo
 J - Número da fase
 K - Instante de tempo
 $EPL_{K,m}$ - Estado do "bit" m de $IPOL_K$

$$EPL_{K,m} = L_{i,j,k} \quad (5.13)$$

onde

$$M = 2I + J - 3$$

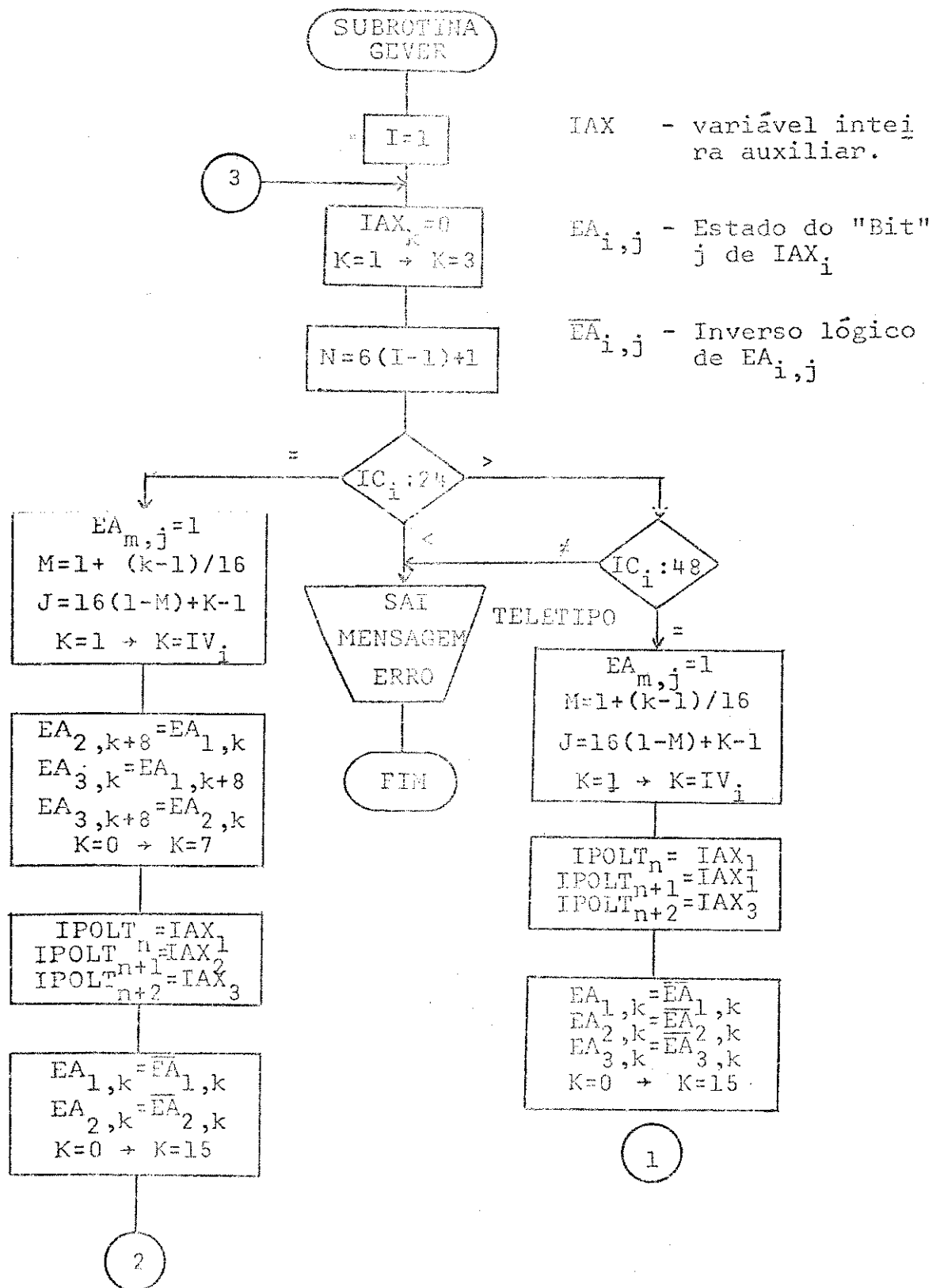


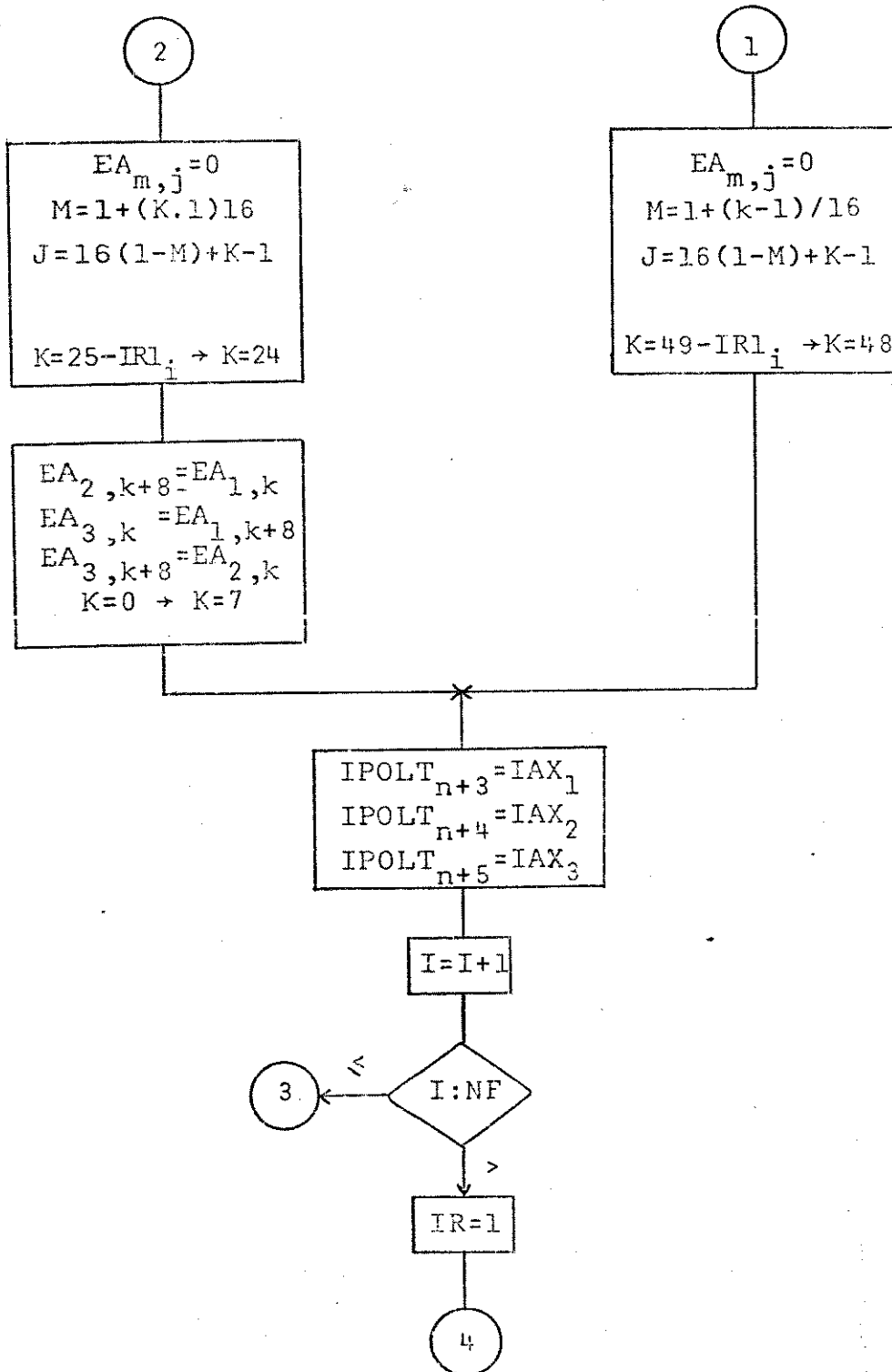
I - Número do semáforo

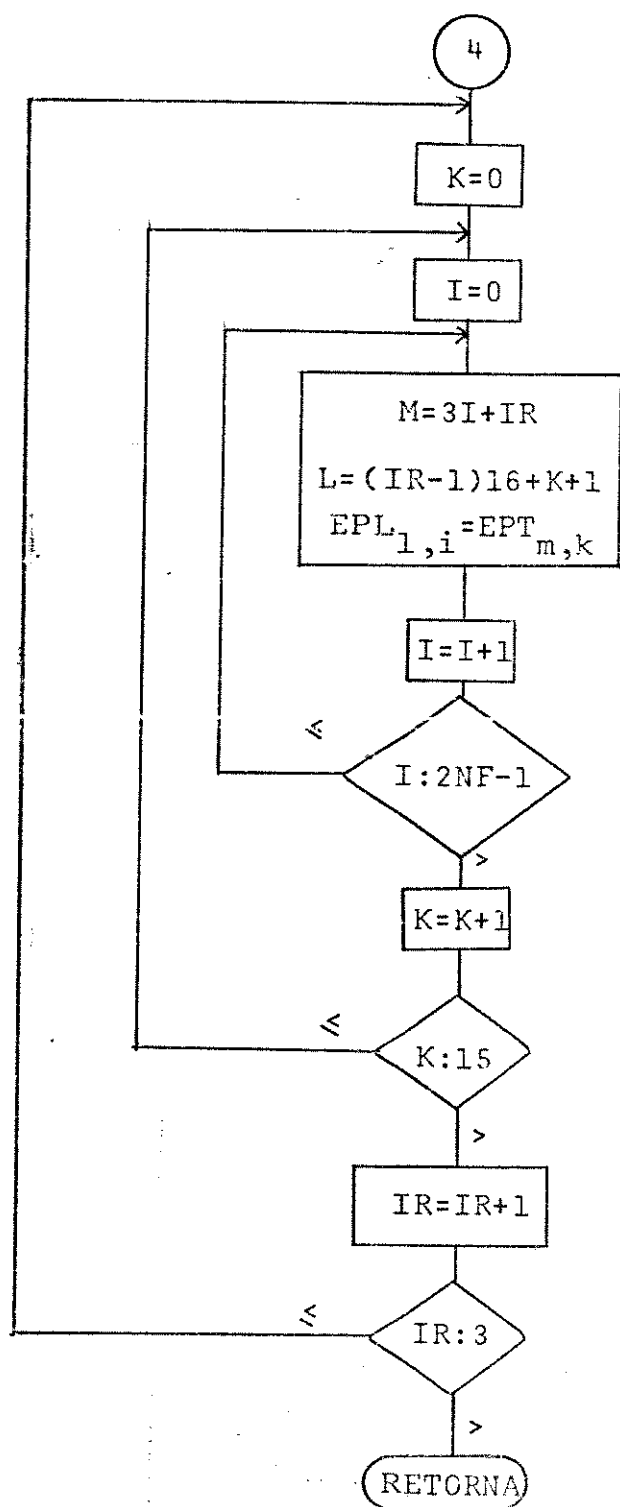
$$N = 6I - 5$$

Fig. 5.7 - Representação na memória do estado de um semáforo no tempo: Matriz $IPOL$

5.4.2.4 - Diagrama de Blocos







$EPL_{i,j}$ - Estado do "Bit"
 J de $IPOL_i$
 $EPT_{i,j}$ - Estado do "Bit"
 J de $IPOLT_i$

5.4.3 - Subrotina VARPOL

5.4.3.1 - Função

Variação do tempo de verde e defasagem de um semáforo.

5.4.3.2 - Chamada

CALL VARPOL (IX, IY, J, IPOLT, IPOL)

Onde :

- IX - Variável inteira contendo a variação de defasagem em número de intervalos de tempo do ciclo fundamental
- IY - Idem para a variação do tempo de verde da fase um do semáforo IY somente pode tomar os valores: -1,0,1.
- J - Variável inteira contendo o número do semáforo.
- IPOLT - Matriz inteira com 48 elementos
ver GEVER
- IPOL - Idem - ver GEVER

- Argumentos para transferência de dados do programa principal para a subrotina:

IX, IY, J, IPOLT, IPOL

- Argumentos para retorno de resultados:

IPOLT, IPOL

5.4.3.3 - Descrição

A subrotina VARPOL seleciona em IPOLT os elementos que correspondem ao semáforo J, efetuando neles as modificações correspondentes a uma variação de defasagem absoluta IX e uma variação de verde IY.

A variação de defasagem absoluta é obtida efetuando-se um deslocamento circular conjunto ("Ring SHIFT") com os três ele

mentos de IPOLT representativos de cada uma das fases do semáforo (figura 5.8).

Uma variação positiva IX corresponde a um deslocamento para a direita de valor IX. No caso de variação negativa, o deslocamento é para a esquerda.

A variação de verde é feita de modo a não alterar a defasagem do semáforo, para isso, os instantes de verde acrescentados ou retirados situam-se ao término do tempo de verde.

Uma variação positiva IY corresponde ao acréscimo de um intervalo de tempo no verde da fase um e conseqüente decréscimo da fase dois.

Após modificar IPOLT, a subrotina com os resultados obtidos modifica os "Bits" de IPOL correspondentes ao semáforo.

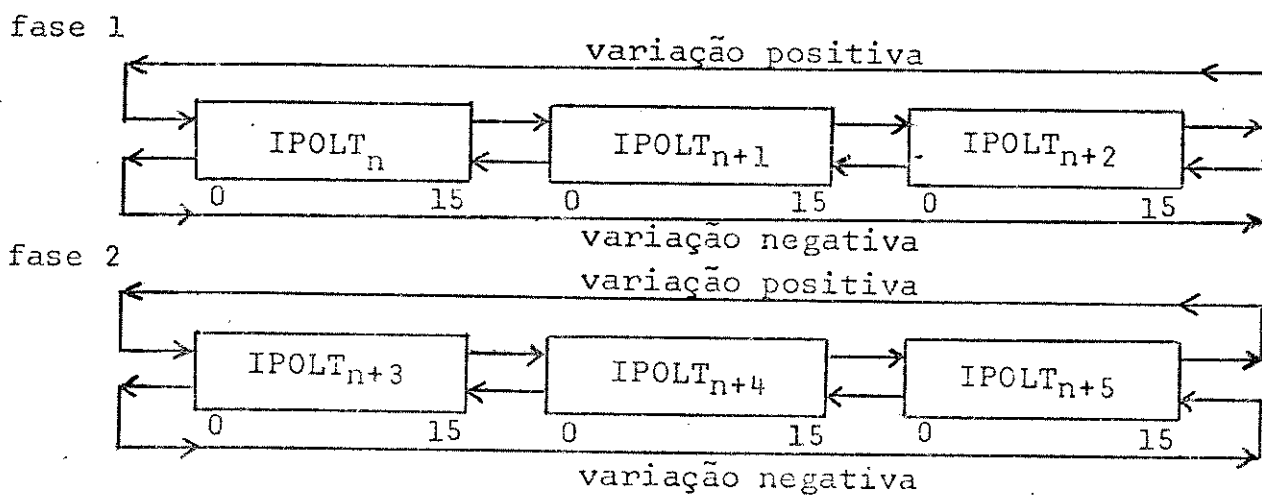
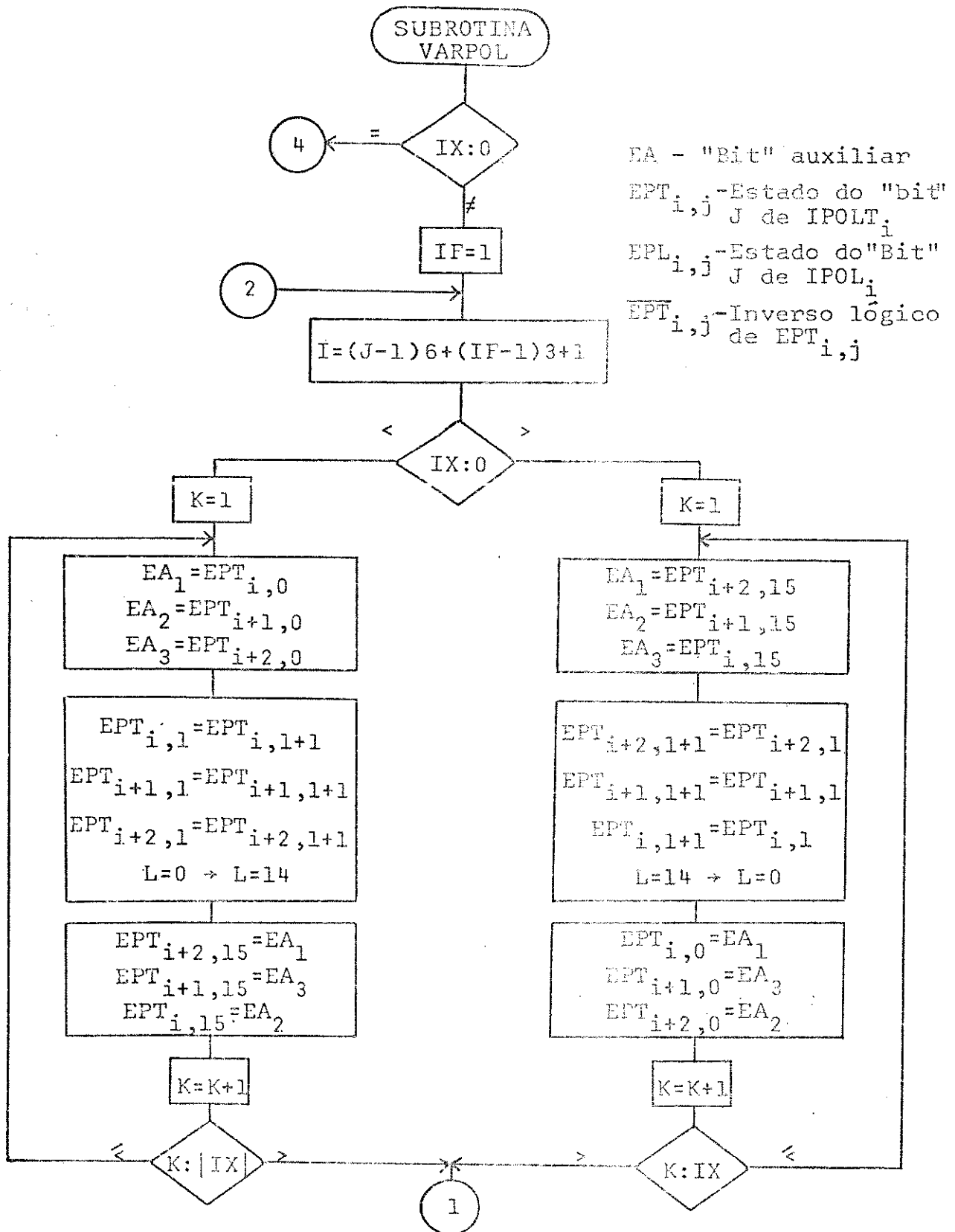
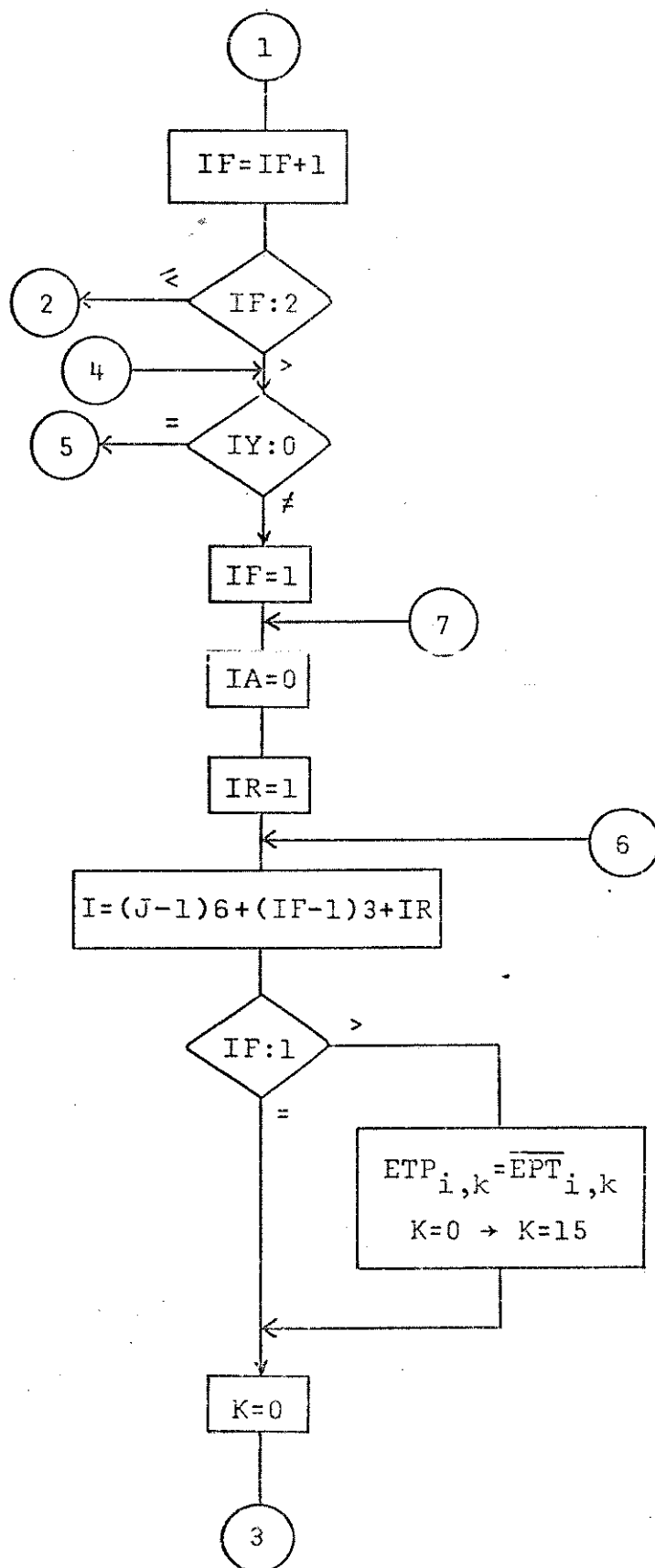
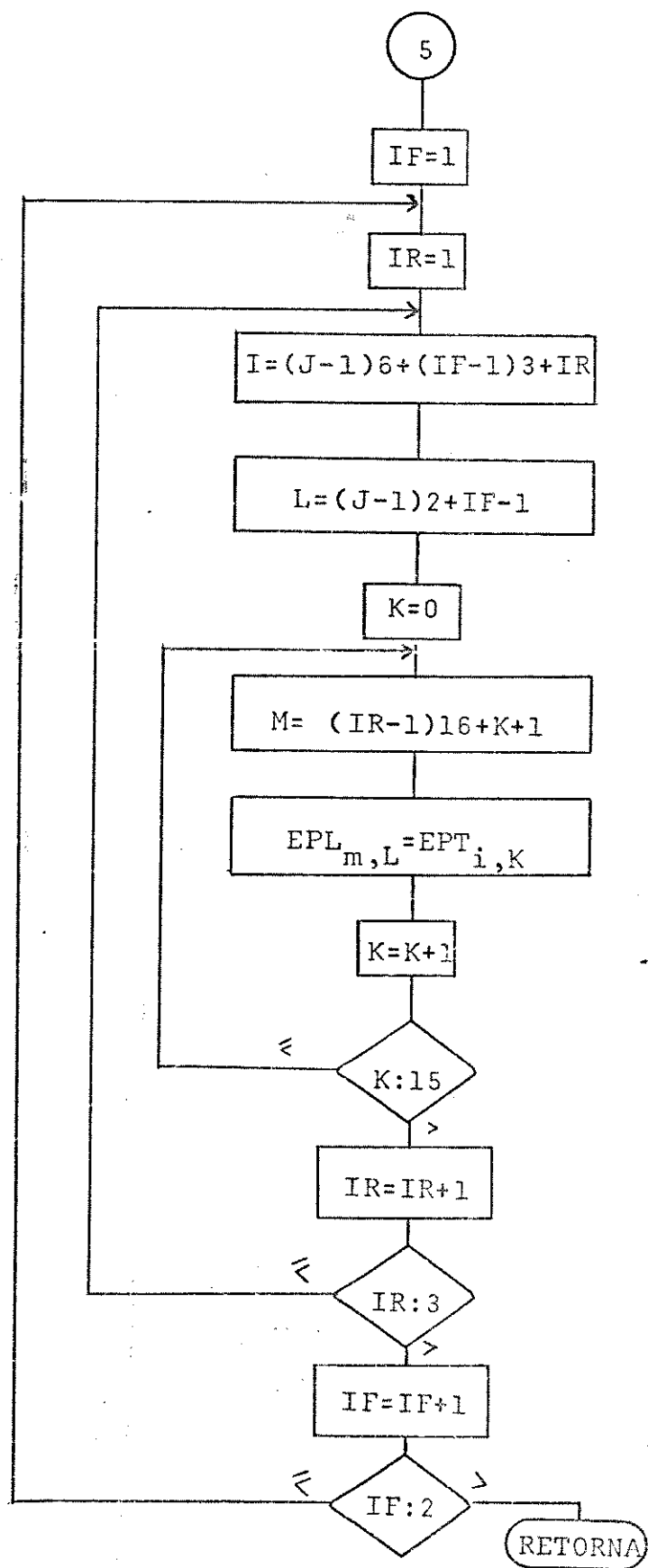


Fig. 5.8 - Variação da defasagem de um semáforo (deslocamentos circulares)

5.4.3.4 - Diagrama de Blocos







5.4.4 - Subrotina SOLVP

5.4.4.1 - Função

Obtenção da solução de regime das equações da rede e cálculo do índice de desempenho para uma dada política de semáforos.

5.4.4.2 - Variáveis armazenadas em área de comum acesso com outros programas

Programa principal :

COMMON/SOL/IV,IC,FE,FES,ICE,IFE,FI,FIS,ICI,IFI,CM,SQF,SQP,SQT,
IPTOP,IPTD,IPTF

Subrotina OPER:

COMMON/OP/I,ICT

Onde:

- IV - Matriz inteira contendo o tempo de verde efetivo da fase um dos semáforos em número de intervalos de tempo, ordenados de acordo com o número do semáforo.
- IC - O mesmo para o ciclo dos semáforos
- FE - Matriz real contendo o fluxo de veículos nos ramos de entrada ordenados de acordo com o número do ramo.
- FES - O mesmo para o fluxo de saturação nos ramos de entrada
- FI - O mesmo para o fluxo médio de veículos durante um ciclo fundamental da rede nos ramos intermediários.
- FIS - O mesmo para o fluxo de saturação dos ramos intermediários.
- ICE - Matriz inteira contendo o número do cruzamento de chegada dos ramos de entrada ordenados de acordo com o número do ramo

- IFE - O mesmo para a fase de chegada dos ramos de entrada.
- ICI - O mesmo para o número do semáforo de chegada dos ramos intermediários.
- IFI - O mesmo para o número da fase de chegada dos ramos intermediários.
- CM - Variável real contendo o ciclo fundamental da rede.
- SQF - O mesmo para a escala de magnitude do atraso uniforme.
- SQP - O mesmo para a escala de magnitude do número de paradas
- SQT - O mesmo para a escala de tempo do programa analógico
- IPTOP - Variável inteira contendo o endereço em octal da subrotina de serviço de interrupções OPER.
- IPTD - O mesmo para a subrotina DUMY
- IPTF - O mesmo para a subrotina FAULT
- I - Variável inteira contendo o número do intervalo de tempo na simulação.
- ICT - Variável inteira contendo o número a ser carregado no "Interface Timer" para se obter interrupções em intervalos $\Delta t = CM/(48SQT)$.

Todas as variáveis listadas acima, com exceção de I e ICT são dados necessários à subrotina SOLVP enviados pelo programa principal. ICT é calculado em SOLVP e enviado a subrotina OPER enquanto que I é calculado e utilizado tanto em OPER quanto em SOLVP.

5.4.4.3 - Chamada

CALL SOLVP(NRI,NRE,TOL,ATRT,AU,ATP,ATA)

Onde :

- NRI - Variável inteira contendo o número de ramos intermediários da rede.
- NRE - O mesmo para o número de ramos de entrada
- TOL - Variável real contendo a tolerância para determinação do regime periódico da rede
- ATRT - Variável real contendo o valor do Índice de desempenho da rede
- AU - Variável real contendo o valor do atraso uniforme da rede
- ATP - O mesmo para o Atraso de Paradas
- ATA - O mesmo para o Atraso Aleatório

5.4.4.4 - Descrição

A subrotina SOLVP em conjunto com a subrotina OPER conduz todo o procedimento lógico necessário à solução das equações da rede durante sucessivos ciclos fundamentais até a obtenção da solução de regime periódica e posterior cálculo do índice de desempenho ATRT.

A condição de regime é detectada verificando-se ao fim de cada ciclo a periodicidade da função TEST :

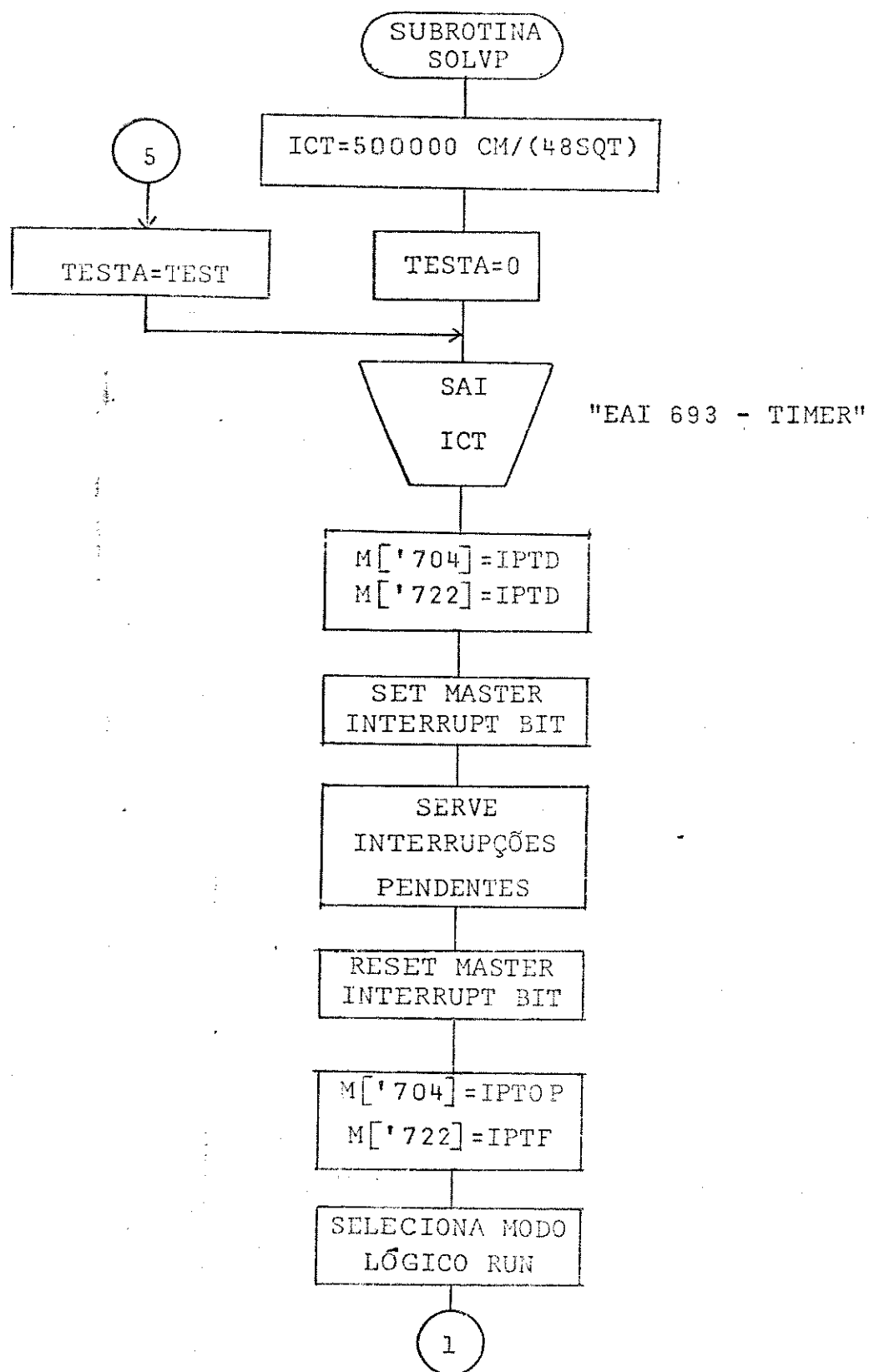
$$\text{TEST}(\tau_1) = \text{ATFA}(\tau_1, \text{CM}) / \text{SQP} + \text{NTPA}(\tau_1, \text{CM}) / \text{SQP} + \text{NV}(\tau_1, \text{CM}) / \text{SQV} \quad (5.14)$$

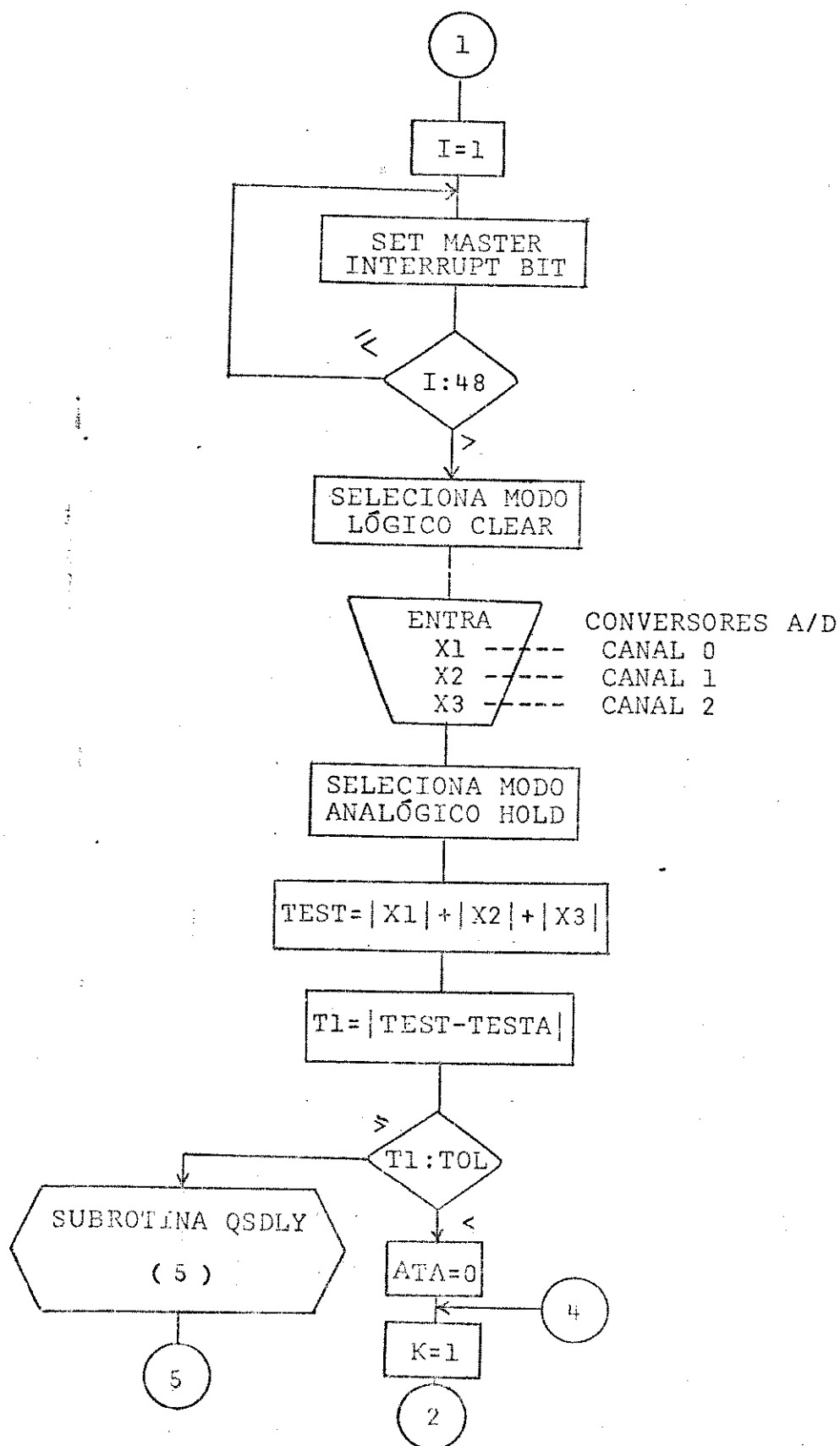
Onde

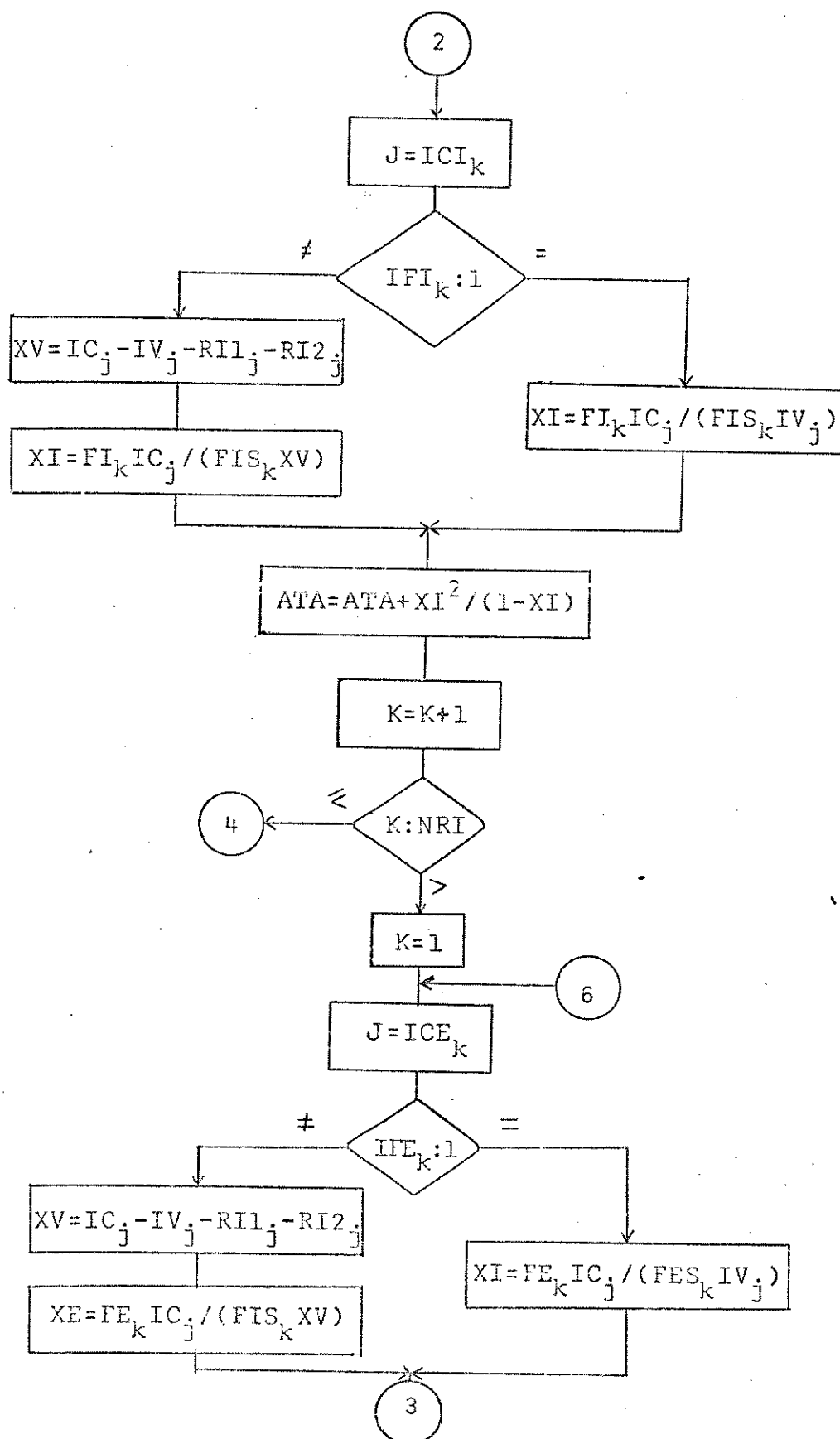
$$\tau_1 = \text{PIN}(\tau / \text{CM}) \text{ CM}$$

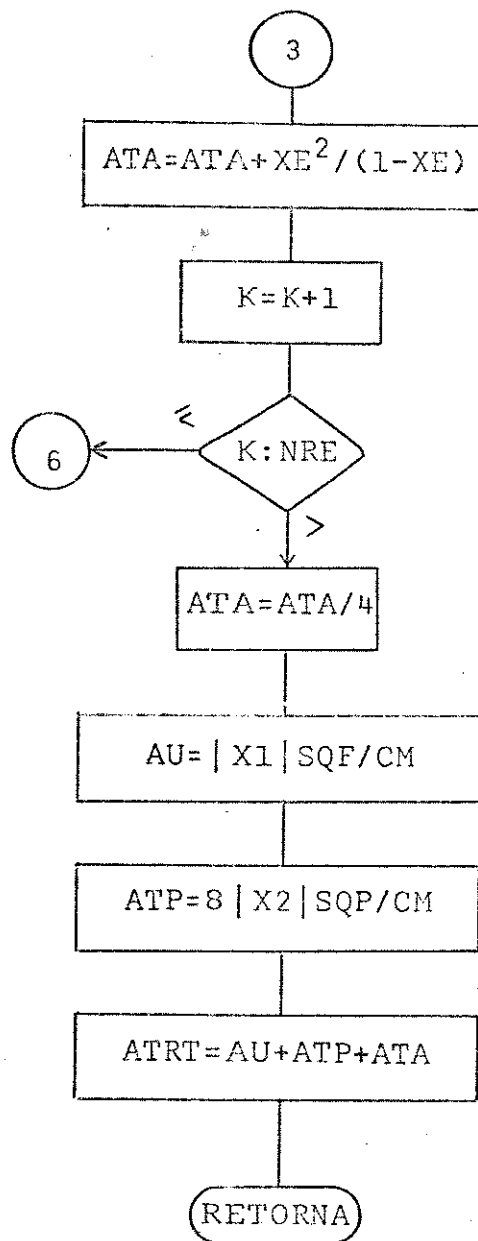
PIN (X) - Parte inteira de X

5.4.4.5 - Diagrama de Blocos









5.4.5 - Subrotina OPER

5.4.5.1 - Função

Enviar ao computador analógico por meio das Linhas de Controle o estado dos semáforos e chamar a subrotina que efetua o atraso de transporte nos ramos intermediários.

5.4.5.2 - Variáveis armazenadas em área de comum acesso com outros programas

Programa principal :

COMMON A,B,C,D,E,F,G,H,O,P,Q,R,S,T,U,V,IESP,IPON,NRI,IPOL

Subrotina SOLVP :

COMMON/OP/I,ICT

Onde :

- A,B ...H, O, ...V - Matrizes do tipo "Scaled Fraction" para armazenamento temporário da função a sofrer atraso de transporte nas subrotinas FDLYCV (devem ser zeradas antes da primeira chamada da subrotina OPER , ver FDLYCV)
- IESP - Matriz inteira contendo o espaçamento entre o valor lido e o escrito na tabela de armazenamento para obtenção do atraso de transporte nos ramos intermediários, ordenados - segundo o número do ramo (ver FDLYCV)
- IPON - O mesmo para a variável que armazena o ponto de entrada na tabela. (ver FDLYCV). Deve ser zerada antes da primeira chamada de OPER.
- IPOL - Matriz inteira contendo o estado dos semáforos, ordenados de acordo com o instante de tempo.
- NRI - Variável inteira contendo o número de ramos intermediários da rede.

ICT - O mesmo para o número a ser carregado no
 "TIMER".

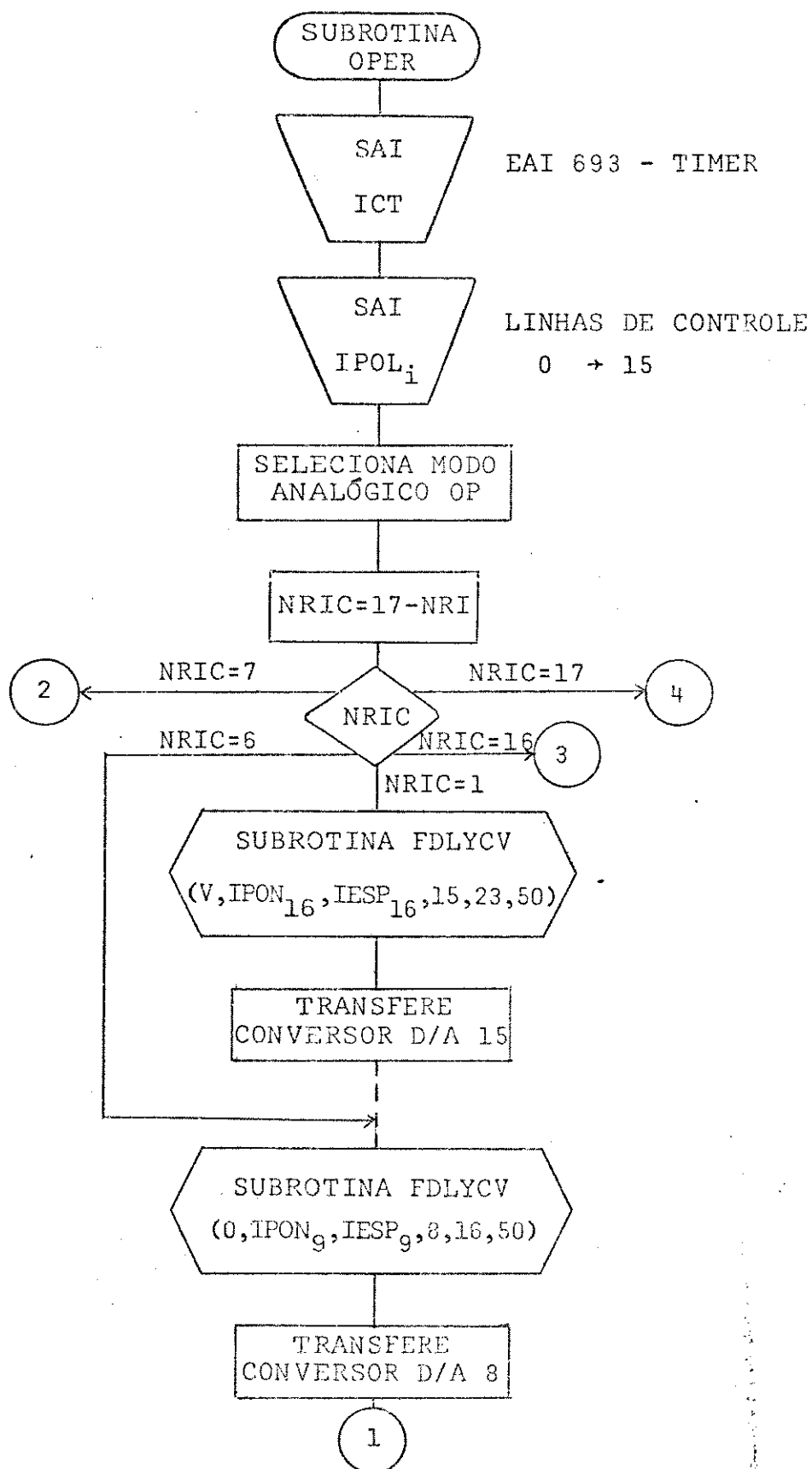
I - O mesmo para o número do intervalo de tempo

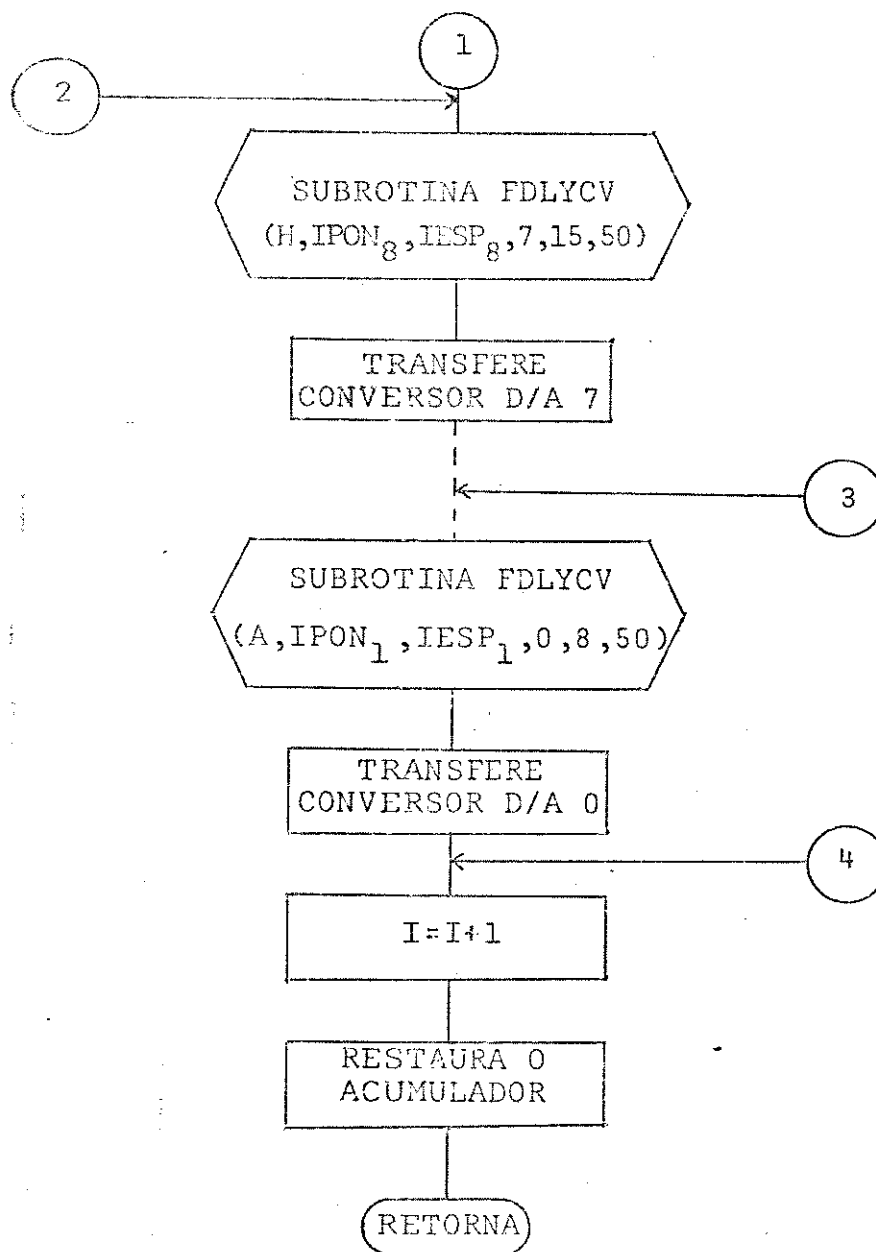
5.4.5.3 - Descrição

É uma subrotina de serviço associada com a interrupção do EAI 693 TIMER. Sua chamada ocorre automaticamente toda vez que uma interrupção é reconhecida.

A descrição completa do procedimento da subrotina é encontrada no diagrama de blocos na seção seguinte.

5.4.5.4 - Diagrama de Blocos





5.4.6 - Subrotina FDLYCV

- Função

Providenciar o atraso de uma função analógica por um período especificado, usando conversores A/D e D/A.

- Chamada

CALL FDLYCV(ITABLE,IPOINT, ISPACE,IDAC,IADC,ITBSIZ)

-- Lista de argumentos :

- ITABLE - Matriz do tipo "SCALED FRACTION" usada como tabela para armazenamento temporário da função
- IPOINT - Variável inteira contendo o ponto de entrada na tabela quando a subrotina é chamada (deve ser inicializado - com zero antes da primeira chamada).
- ISPACE - Variável inteira contendo o espaçamento entre o ponto de entrada e saída na tabela.
- IDAC - idem para o número do canal D/A usado
- IADC - idem para o canal A/D.
- ITBSIZ - idem para o tamanho da tabela

5.4.6a - Descrição

Esta subrotina para atraso de transporte é fornecida pela EAI juntamente com a "Run Time Library" e sua descrição pode ser encontrada na referência [8]

O funcionamento é baseado na entrada e saída de dados em uma tabela de tamanho conhecido. Quando o fim da tabela é alcançado, o programa recomeça no começo da tabela.

O valor do atraso obtido depende da frequência de chamada da subrotina e do comprimento da tabela.

Uma fórmula simples de computer o atraso em segundos é:

f - Frequência de chamada da subrotina

C - Número de posições na tabela

S - Espaçamento entre os pontos de entrada e saída na tabela.

D - Atraso de transporte

$$D = \frac{C-S}{f} \quad (5.15)$$

O tempo de execução desta subrotina é 80 μ s.

No presente caso, a subrotina FDLYCV é chamada por OPER para obtenção do atraso de transporte nos ramos intermediários.

A frequência de chamada é dada pelo EAI 693 TIMER e é coerente com a escala de tempo das equações no computador analógico.

O comprimento das tabelas é fixado em 50 posições.

As outras variáveis são calculadas do seguinte modo :

I - Número do ramo intermediário

TP - Atraso de transporte desejado

$$ISPACE_i = 50 - 48TP_i/CM \quad (5.16)$$

$$IDAC_i = I - 1 \quad (5.17)$$

$$IADC_i = 7 + I \quad (5.18)$$

5.4.7 - Subrotina FAULT

5.4.7.1 - Função

Monitorar os amplificadores no computador analógico durante a solução das equações da rede, interrompendo a execução no caso de saturação de amplificador, ou falha em algum elemento do circuito analógico.

É uma subrotina de serviço do tipo "open end" colocada no fim do programa principal e associada com a interrupção gerada

pelo "Hardware" do EAI - 680 no caso da ocorrência de falhas.

A chamada ocorre automaticamente toda vez que uma "interrupção" é reconhecida. O procedimento da subrotina é explicado no diagrama de blocos do programa principal (secção 5.4.1.2)

5.4.8 Subrotina DUMY

5.4.8.1 - Função

Desarmar as interrupções pendentes devidas ao EAI 693 - TIMER ou falhas nos elementos analógicos antes de conectar as subrotinas OPER, FAULT.

5.4.8.2 - Descrição

Quando conectada às interrupções do "Timer" e Falha é chamada automaticamente no caso de existir alguma interrupção pendente ainda não atendida.

É uma subrotina de serviço do tipo "Open end" colocada no fim do programa principal. O procedimento da subrotina é explicado no diagrama de blocos da secção 5.4.1.2.

5.4.9 - Subrotina OTMZ

5.4.9.1 - Função

Conduzir o processo de otimização da política de semáforos ou outra tarefa qualquer desde que convenientemente programada.

5.4.9.2 - Chamada

CALL OTMZ(IC,IV,IDEC,IR1, IR2,IPOL,IPOLT,NF,NRI,NRE,CM,TOL,ATRT,AU,ATP,ATA,IVM1,IVM2,NDEB,NDEA,CVD)

Onde :

IC,IV,IR1,IR2,IPOL,IPOLT,NF - Ver subrotina GEVER (secção 5.4.2)

NRI,NRE,CM,TOL,ATRT,AU,ATP,ATA - Ver subrotina SOLVP (secção 5.4.4)

IDEC - Matriz inteira contendo a defasagem absoluta dos semáforos

ros em intervalos de tempo do ciclo fundamental, ordenadas de acordo com o número do semáforo.

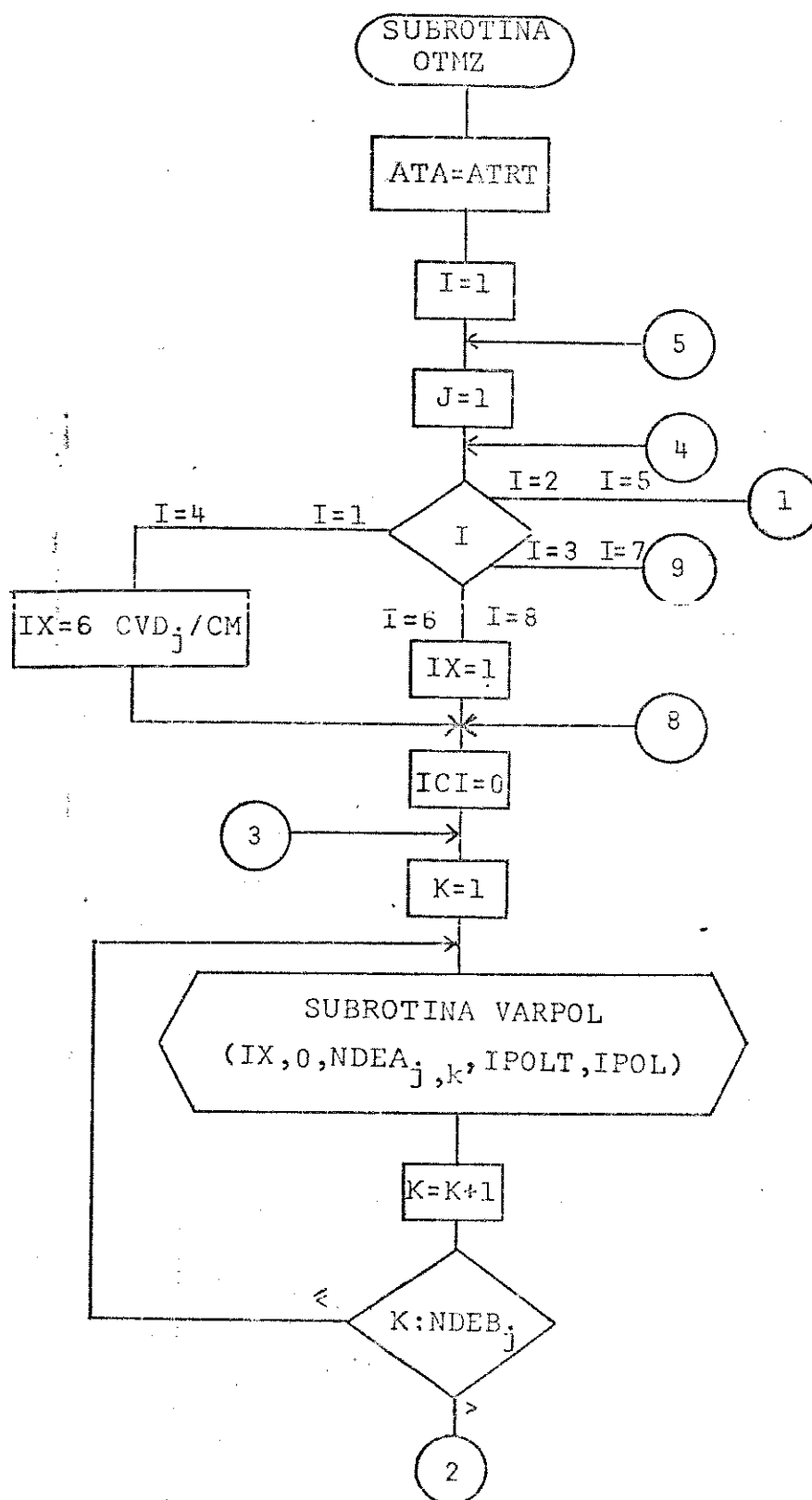
- IVM1 - O mesmo para o verde efetivo mínimo da fase 1 dos semáforos.
- IVM2 - O mesmo para o verde efetivo mínimo da fase 2 dos semáforos.
- NDEB - Matriz inteira contendo o número de semáforos afetados pela variação de cada uma das defasagens "base" ordenados de acordo com o número da defasagem.
- NDEA - Matriz inteira bidimensional, contendo em suas linhas o número dos semáforos afetados por cada uma das defasagens "base". As linhas são ordenadas de acordo com o número da defasagem "base".
- CVD - Matriz real contendo o período aproximado da variação de ATRT com as defasagens "base", ordenados de acordo com o número da defasagem.

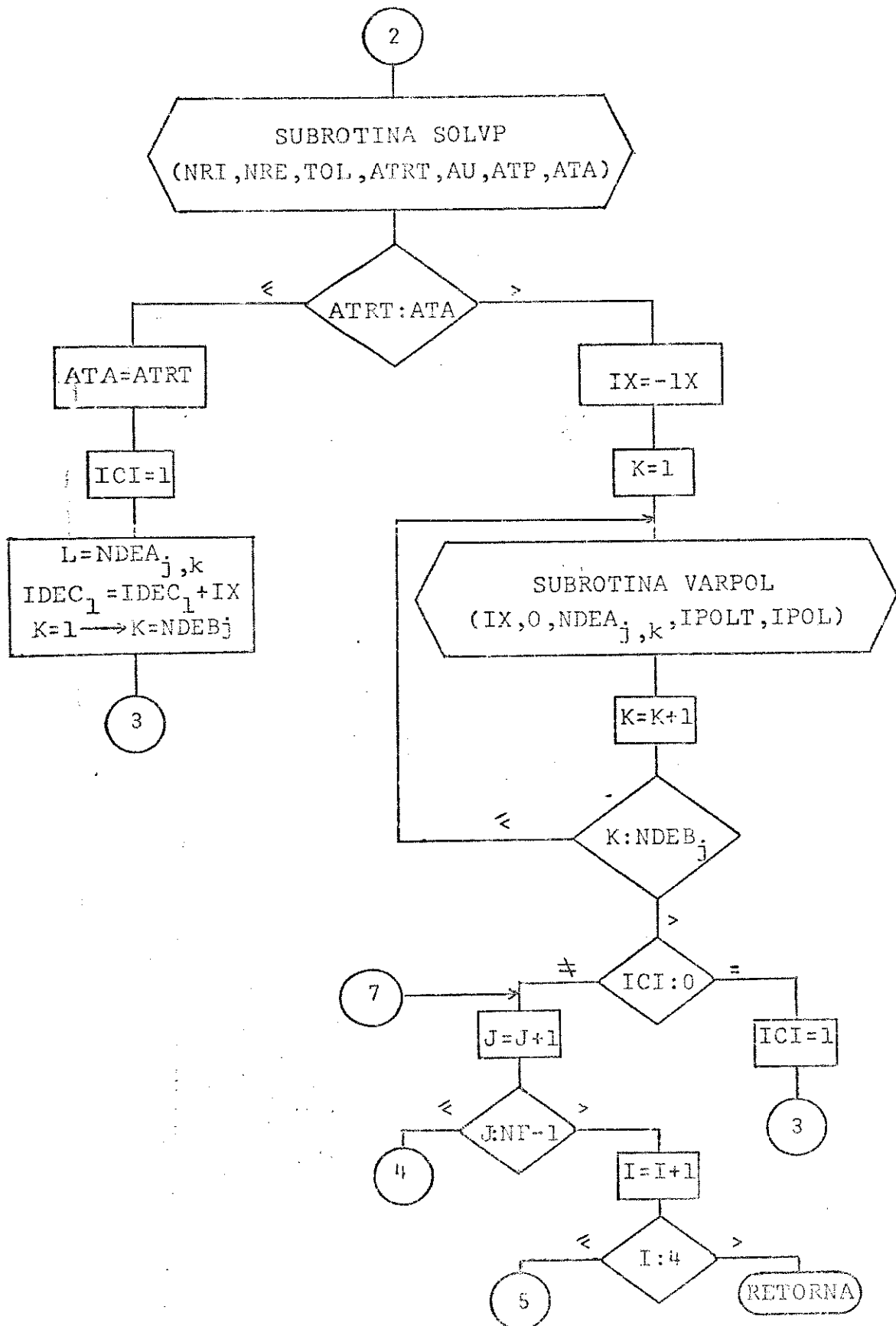
5.4.9.3 - Descrição

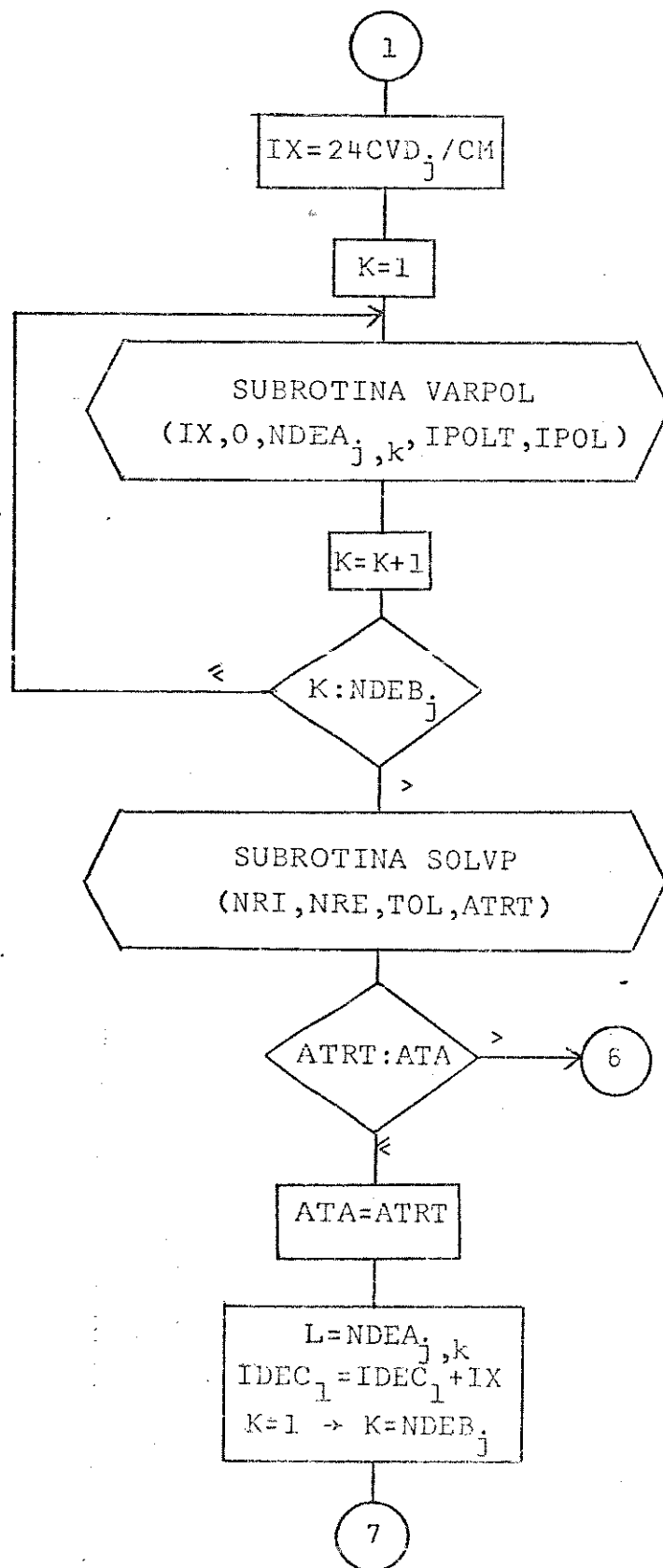
A lista de argumentos da subrotina OTMZ possibilita a transferência dos dados geralmente necessários para tarefas envolvendo o cálculo, do índice de performance, variação de política de semáforos, solução das equações da rede. No caso da tarefa a ser programada pelo usuário necessitar dados adicionais, a subrotina deverá conter comandos de entrada e saída que permitam a obtenção dos mesmos nos periféricos do computador.

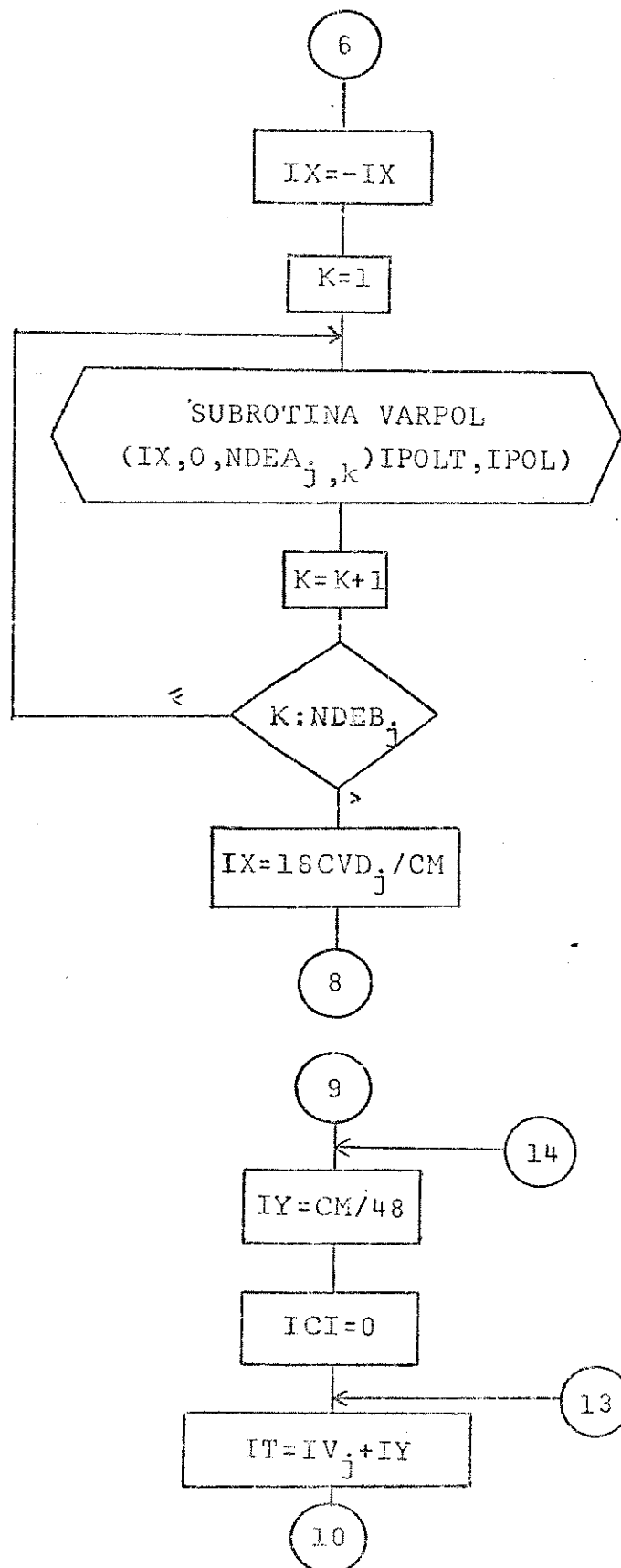
O diagrama de blocos apresentado na seção seguinte, corresponde à programação da subrotina OTMZ para conduzir o processo de otimização da política de semáforos de acordo com o processo de otimização descrito no capítulo 4.

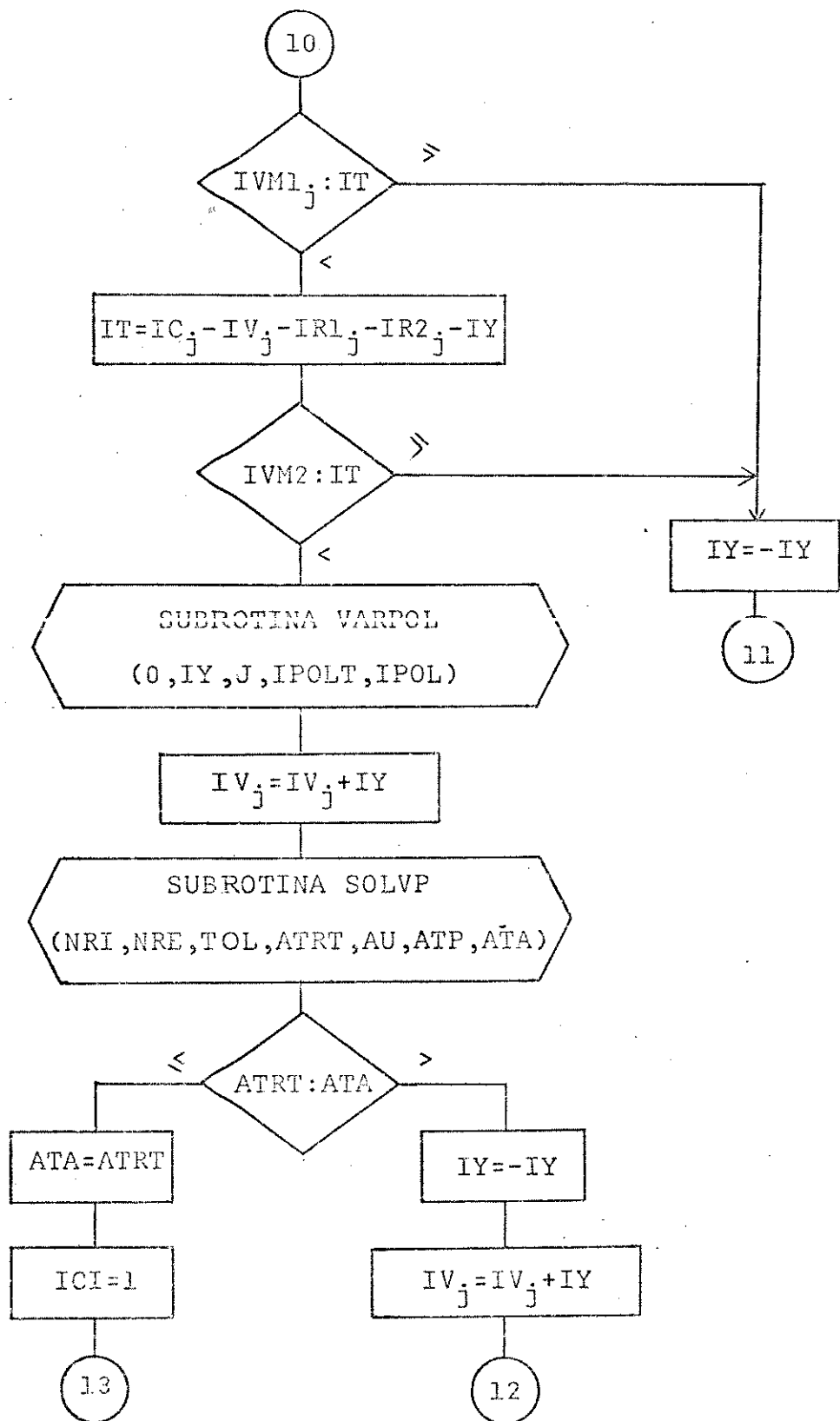
5.4.9.4 - Diagrama de Blocos

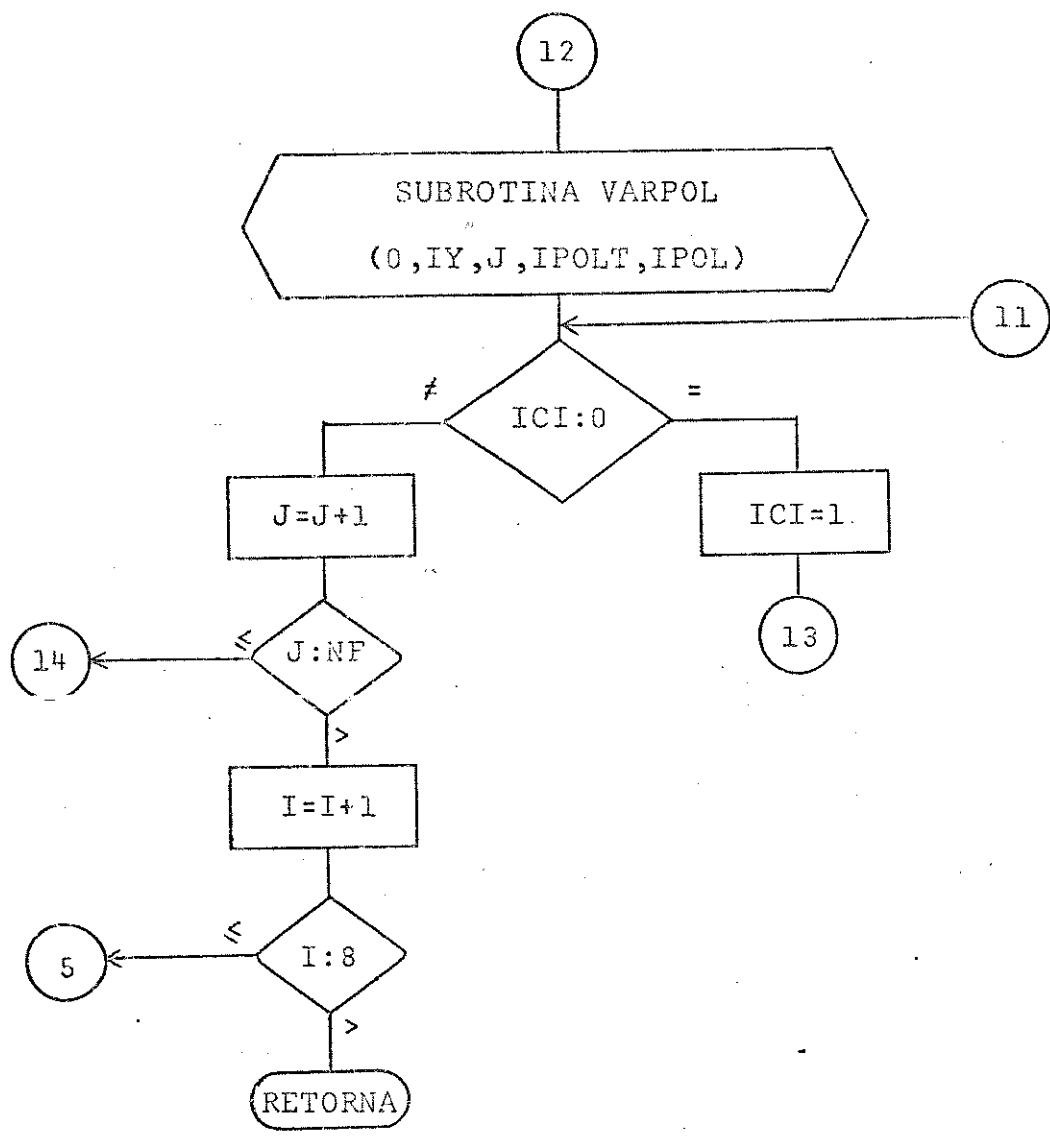












5.4.10 - Subrotina SAIDA

5.4.10.1 - Função

Imprimir no teletipo o estado dos "bits" dos elementos de IPOLT relacionados com um determinado semáforo.

5.4.10.2 - Chamada

CALLSAIDA (I,CI,VE,DE,RI1,RI2,IPOLT)

Onde :

i - Número do semáforo

CI,VE,DE,RI1,RI2,IPOLT - Ver subrotina GEVER (secção 5.4.2.4)

5.4.10.3 - Descrição

A subrotina SAIDA, a partir do número do semáforo, localiza os seis elementos de IPOLT que representam as duas fases do semáforo. Posteriormente, imprime no teletipo o estado dos Bits dos elementos de IPOLT escolhidos, como mostra a figura 5.9.

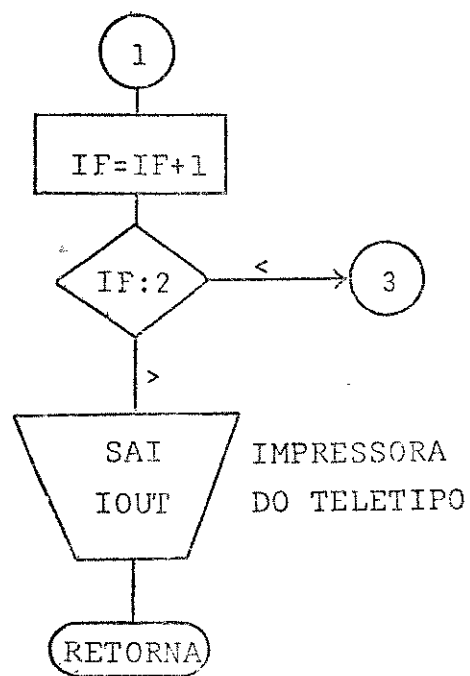
Semáforo 1

CI= 40. DE= 10. VE= 15.,RI1= 5. , RI2= 5.

Fase 1 000000000000111111111111111111110000000000

Fase 2 11111100000000000000000000000000000000001111

Figura 5.9 - Impressão no teletipo, do estado de um semáforo no tempo, feita pela subrotina SAIDA.



5.4.11 - Subrotina QSDLY

5.4.11.1 - Função

Causar um atraso específico num programa.

5.4.11.2 - Chamada

CALL QDLY (INT)

Onde

INT - Variável inteira especificando o número de milisegundos de atraso.

5.4.11.3 - Descrição

É uma subrotina fornecida pela EAI no bloco de subrotinas LINKN | 8 |

5.5 - ANÁLISE DO PROGRAMA E CONCLUSÕES

5.5.1 Programação Analógica

Na programação digital apresentada na seção 5.4, é previsto apenas um dos seis consoles analógicos EAI-680, possíveis de serem utilizados em um sistema híbrido EAI-690. Como pode ser visto na tabela 5.1, um console EAI-680 possui elementos suficientes para uma rede com oito semáforos, nove ramos intermediários e nove ramos de entrada. Em caso de necessidade, havendo disponibilidade, outros consoles analógicos podem ser utilizados, sem necessidade de modificar a programação, desde que seus modos de operação estejam subjugados ao console principal.

A aplicação do programa híbrido às redes de tráfego encontradas na prática, não é afetada pela utilização de apenas um console analógico, pelos seguintes motivos:

- A maneira de associar ramos de entrada e intermediários às mãos de direção das ruas, adotada pelo modelo de tráfego, faz que do ponto de vista da parte do método de otimização que utiliza a simulação da rede (defasagens e verdes), o conjunto inicial de semáforos seja dividido em várias redes independentes.

- O efeito normalizador de fluxos dos semáforos, dá grande possibilidade de aproximar redes de grande porte por um conjunto de redes menores independentes, pois como foi visto no capítulo 4, ele pode fazer com que o erro introduzido por uma aproximação conveniente (troca de um ramo intermediário por um ramo de entrada), fique restrito ao local da aproximação, atenuando consideravelmente o seu efeito relativo no total da rede.

A montagem completa do circuito analógico é trabalhosa, pois envolve grande número de ligações e aumenta muito a possibilidade de erros. O uso de montagens padrão, fixas no painel, para os diversos elementos da rede, deixa ao usuário apenas o trabalho de executar as ligações "topológicas" da rede, o que pode ser executado com segurança e rapidez.

5.5.2 - Programação Digital

945 Nas considerações sobre tempo de execução das partes do programa apresentadas nesta seção, a precisão de medidas diretas em redes particulares foi substituída por estimativas gerais, obtidas em parte através de medidas diretas e em parte deduzidas da lógica da programação e do comportamento das equações da rede. Na programação do método em FORTRAN IV com codificação "ASSEMBLER" - interna, as partes "híbridas" do programa que se mostraram significativas no cômputo do tempo global de execução do programa, foram: o posicionamento dos potenciômetros e a subrotina SOLVP (cálculo do Índice de Desempenho para uma dada política de semáforos).

O tempo de execução da subrotina QWPS(0,3 s) [8] e o número de potenciômetros envolvidos na simulação de uma rede apresentado na tabela 5.1, permite que o tempo gasto no posicionamento dos potenciômetros seja estimado pela fórmula 5.1

$$TNP = 2.4 NRI + 2.1 NRE \quad (5.1)$$

onde

TNP - Tempo gasto no posicionamento dos potenciômetros (segundos)

Em um sistema híbrido EAI-690 equipado com atenuadores digitais [8], a duração desta fase do programa perde seu significativo, mudando para:

$$TNAD = (95. + 25.6 NRI + 22.4 NRE) 10^{-6} \quad (5.2)$$

onde

TNAD - Tempo gasto no posicionamento dos atenuadores digitais (segundos)

O tempo de execução de SOLVP, dentro do processo de otimização, depende da escala de tempo global da programação analógica e do número de ciclos fundamentais da rede necessários para que o transitório ocasionado pela variação de um semáforo desapareça, dentro da precisão com que a condição de regime permanente da rede é detectada.

Considerando o efeito normalizador dos semáforos mostrado no capítulo 4, é razoável esperar que com 2% de precisão, estando a rede anteriormente em regime permanente, a perturbação causada pela variação de um semáforo, não se propague por mais que um ou dois ramos intermediários. Desta forma, a experiência tem mostrado que três ciclos fundamentais é um bom valor para o tempo de estabilização do Índice de Desempenho da rede.

TFDLV - Tempo de execução da subrotina FDLYCV (segundos). [8]

TOP - Tempo aproximado de execução da subrotina OPER (segundos)

SQTM - Máxima escala de tempo permitida à programação analógica (SQT máximo)

TSOL - Tempo médio aproximado de execução da subrotina SOLVP (segundos)

CM - Ciclo fundamental da rede (segundos)

O valor de TFDLV em um sistema EAI-690, utilizando os conversores A/D e D/A padrões é de 80×10^{-6} segundos, dos

quais 50 são gastos nas conversões D/A e A/D. Nessas condições, TOP pode ser estimado com segurança pela fórmula (5.3)

$$\begin{aligned} \text{TOP} &= (\text{NRI} + 2) \text{TFDLV} = 80 (\text{NRI} + 2) 10^{-6} \\ \text{TOP} &< \frac{\text{CM}}{48 \text{ SQT}} \quad \therefore \quad \text{SQTM} = \frac{\text{CM}}{48 \text{ TOP}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Considerando o tempo de estabilização do Índice de Desempenho igual a 3 CM, TSOL pode ser estimado através da fórmula (5.5).

$$\text{TSOL} = 35. \times 10^{-3} + 48 (\text{NRI} + 2) 3 \text{TFDLV} \quad (5.5)$$

ou

$$\text{TSOL} = 35. \times 10^{-3} + \frac{3 \text{ CM}}{\text{SQTM}} = 35 \times 10^{-3} + \frac{3 (\text{NRI} + 2)}{260} \quad (5.6)$$

Tomando como base uma rede com 9 ramos de entrada e 9 ramos intermediários, a comparação entre o tempo de execução da subrotina SOLVP e o da sua equivalente para o modelo do TRANSYT apresentado no apêndice 1, resulta no seguinte:

$$\text{Híbrido : } \text{TSOL}_h = 0,16 \text{ segundos}$$

$$\text{Digital : } \text{TSOL}_d = 0,29 \text{ segundos}$$

$$\frac{\text{TSOL}_d}{\text{TSOL}_h} = \frac{0.29}{0.16} = 1.8 \quad (5.7)$$

Para estimar a melhoria que poderia ser obtida em TSOL_h se um conjunto mais rápido de conversores D/A e A/D fosse utilizado, vamos desprezar em TFDLV o tempo de $50. \times 10^{-6}$ segundos utilizado nas conversões D/A e A/D. Desta forma, o novo valor para TFDLV será $30. \times 10^{-6}$ segundos.

Utilizando a fórmula (5.5), o novo valor para TSOL_h será:

$$TSOL_h = 0.082 \quad \therefore \quad \frac{TSOL_d}{TSOL_h} = 3.7 \quad (5.8)$$

Considerando:

- A maior versatilidade de uma programação digital nos aspectos relacionados com a topologia da rede: menores restrições sobre a magnitude da rede e possibilidade de mudanças programadas.

- A equivalência do computador MYRAID, utilizado no cálculo de $TSOL_d$, com o computador digital do sistema híbrido EAI-690 (EAI-640): Minicomputadores para controle de processos com aproximadamente mesmas características de memória e data inicial de fabricação.

- Que a grosso modo, o sistema híbrido EAI-690 pode ser considerado três vezes mais caro que um sistema de computação digital EAI-640 ou PACER-100.

- Que a estimativa para $TSOL_d$ foi obtida através de uma programação sofisticada praticamente em nível de "linguagem de máquina" e portanto não utilizável diretamente em computadores de outras marcas.

- Que a programação híbrida foi feita em FORTRAN IV, utilizável diretamente em computadores híbridos EAI e mais facilmente adaptável para uso em sistemas híbridos de outras marcas.

Pode ser concluído que:

- A vantagem em tempo obtida em (5.7) e as perspectivas em (5.8), não são suficientes para que seja proposto a utilização de um sistema híbrido, com a programação apresentada neste capítulo, para o cálculo das equações do modelo de tráfego, em substituição de uma programação digital elaborada.

- Para um usuário que já disponha de um sistema híbrido EAI-690 ou outro equivalente, a utilização do programa híbrido se justifica: pois os inconvenientes econômicos são descartados, restando as vantagens de utilização fácil de uma programação já feita, cuja velocidade, no cálculo das equações do modelo, só pode ser equiparada por uma programação digital sofisticada e de execução não trivial.

ELEMENTO	QUANTIDADE NECESSÁRIA	QUANTIDADE DISPONÍVEL
Integradores	$2NRI + NRE + 3$	30
Comparadores	$NRI + NRE$	24
Chaves Eletrônicas	$4 (NRI + NRE)$	24^{*1}
Potenciômetros	$8NRI + 7NRE^{*2}$	156
Atenuadores ^{*3} Digitais	$8NRI + 7NRE$	239
Conversores A/D	$NRI + 3$	23
Conversores D/A	NRI	16
Linhas de Controle	$2NF$	16

NRI - Número de ramos intermediários

NRE - Número de ramos de entrada

NF - Número de semáforos

*1 - Uma montagem separada contendo grande número de chaves pode ser utilizada, sem afetar a qualidade da simulação

*2 - Número provável

*3 - São opcionais em um console EAI-680. Sempre que houver disponibilidade, devem substituir os potenciômetros

Tabela 5.1 - Quantidade de elementos necessários para simulação de uma rede e a disponibilidade dos mesmos em um console EAI-680 completo.

APÊNDICE 1

APRESENTAÇÃO SUMÁRIA DO MÉTODO TRANSYT

Uma descrição completa do TRANSYT - Traffic Network Study Tool - pode ser encontrada na referência [1]. A simbologia utilizada é sempre que possível a mesma do capítulo 3.

A.1.1 - Equações do Modelo de Tráfego

- Semáforos

Ciclos na forma CM, CM/2

Apenas dois tipos de indicações: verde e vermelho. Variáveis: ciclo, verde efetivo e defasagem absoluta.

- Ramos intermediários

$$IN_i(k) = \sum_{J=1}^{NRI} OUTI_j(k) PII_{j,i} + \sum_{J=1}^{NRE} OUTE_j(k) PEI_{j,i}$$

$$GO_i(k) = F_i IN_i(k - tr_i) + (1 + F_i) GO_i(k - 1)$$

$$QI'_i(k) = QI_i(k - 1) + GO_i(k)$$

$$OUTI_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{se o semáforo indicar vermelho} \\ \min\{QI'_i(k), FIS_i \Delta t\} & \text{se o semáforo indicar verde} \end{cases}$$

$$QI_i(k) = \max\{QI'_i(k) - OUTI_i(k), 0\}$$

onde:

$$\Delta t = CM/50$$

$$tr_i = .8TP_i/50$$

$$F_i = \frac{1}{1 + .5t}$$

- Ramos de entrada

$$QE_i'(k) = QE_i(k-1) + FE_i$$

$$OUTE_i(k) = \begin{cases} 0 & \text{se o semáforo indicar vermelho} \\ \min\{QE_i'(k), FES_i \Delta t\} & \text{se o semáforo indicar verde} \end{cases}$$

$$QE_i(k) = \max\{QE_i'(k) - OUTE_i(k), 0\}$$

onde:

$$\Delta t = CM/50$$

- Índice de Desempenho

Supondo que a condição de regime permanente tenha sido obtida:

$$ATF = \frac{1}{50} \left[\sum_{I=1}^{NRE} \sum_{K=1}^{50} QE_i(k) + \sum_{I=1}^{NRI} \sum_{K=1}^{50} QI_i(k) \right]$$

$$ATP = \frac{KP}{CM} \left[\sum_{I=1}^{NRE} \sum_{K=1}^{50} \min\{QE_i(k), FE_i \Delta t\} + \sum_{I=1}^{NRI} \sum_{K=1}^{50} \min\{QI_i(k), GO_i(k)\} \right]$$

$$ATA = \frac{1}{4} \left[\sum_{I=1}^{NRI} \frac{XI_i^2}{1-XI_i} + \sum_{I=1}^{NRE} \frac{XE_i^2}{1-XE_i} \right]$$

$$ATRT = ATF + ATP + ATA$$

onde:

KP - penalização em tempo por parada de veículo junto a semáforo.

XE_i , XI_i - Grau de saturação do ramo.

A.1.2 - Método de otimização

O algoritmo de otimização utilizado é do tipo "Hill Climbing": fixados os ciclos para os semáforos, o algoritmo usa uma série de "passagens", onde são variados alternadamente o tempo de verde ou a defasagem absoluta dos semáforos. A magnitude das variações, dentro de uma "passagem", é fixa e igual para todos os semáforos.

Uma "passagem", consiste no seguinte procedimento aplicado em sequência a todos os semáforos da rede:

A variável escolhida (verde ou defasagem absoluta) é variada: se ocasionou decréscimo no Índice de Desempenho da rede, a mesma variação continua a ser aplicada até não mais causar reduções; se a primeira variação não apresentar sucesso, a variação oposta é aplicada enquanto causar decréscimo no Índice de Desempenho.

A magnitude das variações e a variável dos semáforos envolvidas em cada uma das passagens são apresentadas na tabela A.1.

A.1.3 - A Programação do Método

A referência [1], cita o tempo de computação médio para os cálculos das equações do modelo e índice de desempenho, para um ramo da rede, em um computador MYRAID. O programa foi feito em uma linguagem simplificada, que mantém uma relação de um para um com as instruções de máquina.

$$TRAMO = 16 \times 10^{-3} \text{ segundos}$$

$$TREDE = (NRI + NRE) 16 \times 10^{-3} \text{ segundos}$$

NÚMERO DA PASSAGEM	VARIAÇÃO DE DEFASAGEM	VARIAÇÃO DE VERDE
1	7CM/50	-
2	20CM/50	-
3	-	CM/50
4	7CM/50	-
5	20CM/50	-
6	CM/50	-
7	-	CM/50
8	CM/50	-

Tabela A.1 - Magnitude das variações de defasagem e verde das passagens do processo de otimização.

REFERÊNCIAS

- 1 - ROBERTSON D. I., TRANSYT, a Traffic Network Study Tool. Road Research Laboratory, Report LR 253, Crowthorne , Inglaterra, 1969.
- 2 - WEBSTER F. V., Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper nº 39, Road Research Laboratory, H.M.S.O, Inglaterra, 1958.
- 3 - WOHL and MARTIN , Traffic System Analysis for Engineers and Planners. Mac Graw-Hill, 1967.
- 4 - K. W. HUDDART, The Importance of Stops in Traffic Signal Progressions. Transportation Research, Vol. 3, pp. 143-150. Pergamon Press, Inglaterra 1969.
- 5 - K.W. HUDDART, Traffic Signal Progressions - G.L.C. Combination Method. Traffic Engineering and Control, pp. 320-322, Novembro de 1969.
- 6 - Eletronic Associates, 640 Digital Computing System Reference Handbook , Publ. nº 00800.9118-1, Long Branch, N.J. USA, 1972.
- 7 - Electronic Associates, PACER 600 Reference Handbook, Publ. nº 00800.3059.0, Long Branch, N.J., USA, 1972.
- 8 - Electronic Associates, PACER 100 Application Programming Manual, Publ. nº 00 827 0051-0, Long Branch, N.J., USA, 1972.
- 9 - Electronic Associates, 680 Analog Computing System Reference Handbook, Publ. nº 00800.2048.2, Long Branch, N.J. USA, 1969.
- 10- GARTNER N. E BEN URI, Computer-aided Coordination Strategy for Traffic Signals Networks. 1º Simposio Internacional sobre Regulação de Tráfego, Versailles, França, 1971.

- 11 - HOLROYD, J. e ROBERTSON, D.I., Strategies for Area Traffic Control Systems: Present and Future, Road Research Laboratory, Crowthorne, Inglaterra, 1972.
- 12 - AUTHIÉ, G. e LÉGLISE, M., Analyse Critique de la Conception et du Comportement de Cinq Modeles de Traffic, Transportation Research, vol.7 pp.371-391, Pergamon Press, Inglaterra, 1973.