

SP 05/94

NT 174/94

## **Reprogramação de semáforos:** **Método baseado em observação de campo**

**Engº Sergio Ejzenberg**

### 1. Apresentação

Um dos muitos desafios enfrentados na gestão do trânsito da cidade de SP é garantir tempos adequados em seus quase 4000 semáforos.

Os métodos convencionais de cálculos de tempos de semáforo exigem dados de obtenção demorada e onerosa (contagens veiculares e fluxos de saturação, entre outros).

A própria complexidade de alguns dos métodos, exigindo ábacos e fórmulas intrincadas para sua utilização, ajuda a mistificar a questão dos semáforos, dificultando assim a execução periódica e rotineira da programação.

Este trabalho apresenta um novo método para determinação dos tempos do semáforo, baseado em observações de campo e cálculos matemáticos simples, que permite a obtenção de resultados rápidos e suficientemente precisos, prescindindo das contagens e fluxos de saturação tradicionalmente necessários.

### 2. Conceituação básica do novo método de reprogramação

As aproximações (chegadas) de um semáforo que se quer reprogramar podem se apresentar de duas formas possíveis: congestionadas (sobrando fila ao final do tempo de verde), ou ociosas (sobrando tempo de verde ao final da fila).

O método de “Reprogramação de Semáforos baseado em observação de campo” pretende quantificar a ociosidade ou o congestionamento das aproximações e promover, a partir daí, o ajuste do semáforo.

Para tanto, vamos adotar os seguintes parâmetros para o fluxo de tráfego:

- Espaço ocupado por cada veículo parado em fila = 6 m/veic./faixa
- Intervalo entre veículos em situação de saturação = 2 s/veic./faixa

#### 2.1 Definições básicas

##### 2.1.1 Sinalização Semafórica

A Sinalização Semafórica de luzes acionadas alternada ou intermitentemente, através de mecanismos eletro/eletrônicos, cuja função é controlar os deslocamentos de pedestres ou veículos.

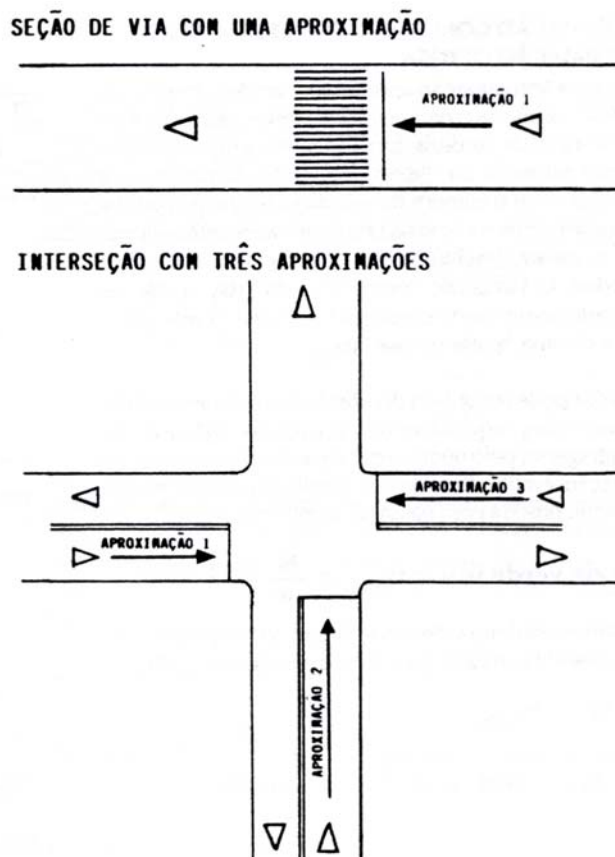
Existem dois tipos de sinalização semafórica: a de regulamentação, que ordena o modo cíclico e sequencial o direito de passagem de pedestres e/ou veículos em interseções de nível ou seções de via; e a de advertência, que como o próprio nome diz adverte o condutor de alguma condição de perigo na via.

### 2.1.2 Semáforo

Semáforo é o conjunto de Grupos Focais e respectivos suportes responsável por executar a Sinalização Semafórica numa interseção ou seção da via.

### 2.1.3 Aproximação

Aproximação é o trecho da via pelo qual os veículos se aproximam de uma interseção em nível ou seção da via. São ilustrados a seguir dois exemplos: um, em uma seção da via em sentido único com travessia de pedestres, configurando apenas uma aproximação; e outro, de uma interseção em nível entre duas vias, configurando três aproximações.



### 2.1.4 Transição de estágios (Entreverdes)

Entre dois estágios sucessivos de uma interseção é necessário um intervalo de tempo denominado Entreverdes, para que os condutores que estão em movimento possam perceber e reagir à nova ordem de parar e os veículos que já se encontram na área de conflito da interseção completem sua travessia. Este intervalo corresponde ao tempo de amarelo para os Grupos Focais veiculares, ou vermelho intermitente para os Grupos Focais de pedestres.

Em algumas situações, este intervalo não é suficiente para garantir a segurança da interseção, sendo necessário acrescê-lo com um Tempo de Vermelho de Segurança. Este período corresponde ao tempo que decorre entre o final do amarelo do estágio vigente e o início do verde do próximo estágio.

Neste período, os movimentos que perdem o direito de passagem já estão recebendo a indicação vermelha e os que irão receber a indicação verde permanecem ainda em vermelho. Desta forma, o entreverdes passa a ser o tempo de amarelo mais o tempo de vermelho de segurança.

### 2.1.5 Ciclo

Ciclo é o tempo necessário para a completa seqüência de todos os estágios de uma interseção.

### 3. Aproximação com tempo de verde ocioso – aproximação ociosa

Quando uma aproximação apresentar “verde sobrando ao final da fila”, devemos cronometrar em campo, durante cinco ou mais tempos de verde, a duração desse tempo de verde (verde não saturado ou “verde folgado”), tomando-se o cuidado de contar o número de veículos (**N**) que passam na aproximação desde o início da cronometragem até o último veículo a passar (incluindo os que passam no tempo de entreverdes). O tempo de verde folgado (**tv<sub>f</sub>**) pode ser considerado como sendo constituído de uma “parte útil” (**tv<sub>útil</sub>**) e de uma parte ociosa (**tv<sub>oc</sub>**).

O verde útil pode ser obtido dividindo-se o número médio **N** de veículos equivalentes (contado durante as cronometragens) pelo número de faixas de rolamento (**n**) da aproximação, e multiplicando-se o resultado pelo tempo que cada veículo precisa para passar (2 s/veic. Por faixa)

$$\text{Tempo verde útil} = tv_{\text{útil}} = \frac{N}{n} \times 2 \text{ s/veic.}$$

Se subtrairmos do tempo de verde folgado o tempo de verde útil, teremos então o valor do tempo de verde ocioso (**tv<sub>oc</sub>**).

$$tv_{oc} = tv_f - tv_{\text{útil}}$$

$$tv_{oc} = tv_f - \frac{N}{n} \times 2$$

onde

**tv<sub>oc</sub>** = tempo de verde ocioso da aproximação

**tv<sub>f</sub>** = tempo de verde folgado médio (cronometrado na aproximação)

**N** = Número médio de veículos equivalentes contado durante as cronometragens

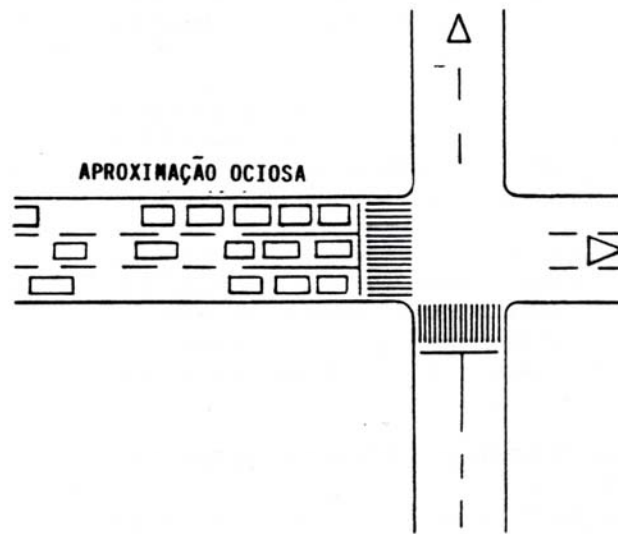
**n** = Número de faixas de rolamento da aproximação

Tendo-se **tv<sub>oc</sub>**, basta subtraí-lo de **TV** para assim obter o tempo de verde mínimo de aproximação.

$$tv_{\text{min}} = tv - tv_{oc}$$

Por último, devemos lembrar que, conceitualmente, **tv<sub>oc</sub>** é tempo perdido no semáforo, pois equivale a um intervalo de tempo sem movimentação veicular.

### 3.1 Exemplo de cálculo: aproximação ociosa



MEDIÇÃO	tv(s) folgado	N (veíc./equivalentes)
1	6	2
2	9	4
3	5	2
4	4	1
5	6	3
6	2	2
7	8	2
<b>Média</b>	<b>5,7 s</b>	<b>2,3 veíc.</b>

Determinar o tempo de verde ocioso ( $tv_{oc}$ ) e o tempo de verde mínimo de uma aproximação com 3 faixas de rolamento ( $n = 3$ ), onde foram obtidas as sete medidas apresentadas acima, e que está operando com  $tv = 45s$

### 3.2 Resolução

$$tv_{\text{útil}} = \frac{N}{n} \times 2 \text{ s/veic.} = \frac{2,3}{3} \times 2 = 1,5s$$

$$tv_{oc} = tv_{\text{folgado}} - tv_{\text{útil}} = 5,7 - 1,5 = 4,2s$$

$$tv_{\text{min}} = tv - tv_{oc} = 45 - 4,2 = 40,8s$$

$$tv_{oc} = 4,2s \quad tv_{\text{min}} = 40,8s$$

#### 4. Aproximação congestionada

Quando constatarmos que numa aproximação está “sobrando fila ao sinal do tempo verde”, esta aproximação estará congestionada.

Neste caso, deveremos transformar a fila em seu equivalente de tempo de verde adicional necessário para não haver congestionamento.

Assim, deveremos medir o comprimento da fila máxima descontando a fila gerada pela espera normal do semáforo.

A fila máxima é obtida em campo medindo-se seu comprimento por qualquer um dos vários meios possíveis (trena, passo duplo aferido, diferença de altura numérica na via ou contagens de guias).

A fila normal de espera, que deve ser descontada, pode ser determinada observando-se os veículos que passam em média durante o tempo de verde do semáforo, ou então pela seguinte fórmula aproximada:

$$\text{fila normal} = \frac{\text{tv}}{2 \text{ s/veic}} \times 6 \text{ m/veic.}$$

onde

**tv = tempo da aproximação considerada**

Considerando-se que os picos de tráfego têm aproximadamente duas horas de duração, podemos supor que as filas demoram uma hora para se formar e uma hora para serem desmanchadas. Assim, para evitarmos a formação da fila, deveremos proporcionar ao longo de uma hora o seguinte tempo de verde adicional:

$$\text{tempo verde adicional na hora} = \frac{\text{Fila máxima} - \text{Fila normal}}{6 \text{ m/veic}} \times 2 \text{ s/veic}$$

Para obtermos o tempo de verde adicional por ciclo, basta dividirmos o tempo de verde adicional na hora pelo número de ciclos na hora (3600/tc) ou seja:

$$\text{tv}_{\text{adic}} = \text{tempo verde adicional por ciclo} = \frac{\text{tempo verde adicional na hora}}{3600 / \text{tc}}$$

onde

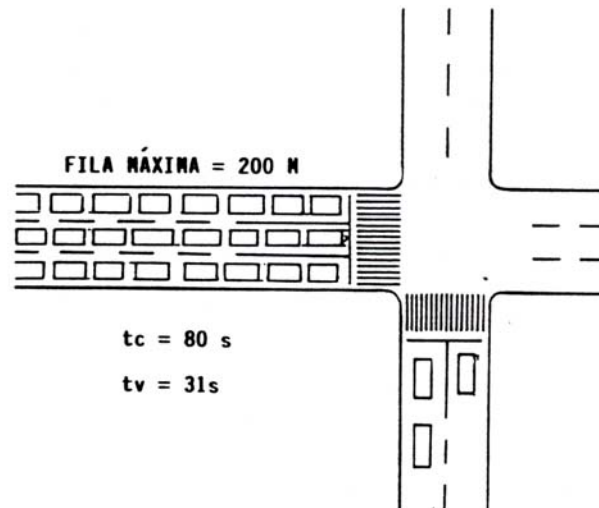
**tc = tempo de ciclo (existente)**

Obtém-se o tempo de verde mínimo da aproximação, somando-se o tempo de verde adicional por ciclo ao tempo de verde existente:

$\text{tv}_{\text{min}} = \text{tv} + \text{tv}_{\text{adic}}$
--

Deve-se lembrar que, se a causa do congestionamento for bloqueio à frente, não adianta aumentar o tempo de verde, pois isto só vai servir para travar o cruzamento. Deve-se neste caso resolver o problema à frente, e só então retornar ao local inicial.

## 4.1 Exemplo: Aproximação congestionada



Pede-se: Calcular o tempo mínimo de verde da aproximação, necessário para não haver congestionamento, dados os tempo de ciclo (80 s), o tempo de verde (31 s) e o comprimento máximo verificado da fila – Fila máxima (200 m).

## 4.2 Resolução

$$\text{fila normal} = \frac{t_v}{2 \text{ s/veic.}} \times 6 \text{ m/veic.} = \frac{31}{2} \times 6 = 93 \text{ m}$$

Fila máxima = 200 m

Fila congestionada =  $200 - 93 = 107 \text{ m}$

$$\text{Tempo de verde adicional na hora} = \frac{107 \text{ m}}{6 \text{ m/veic.}} \times 2 \text{ s/veic.} = 35,7$$

$$\text{Número de ciclos na hora} = \frac{3600 \text{ s}}{t_c} = \frac{3600 \text{ s}}{80 \text{ s}} = 45 \text{ ciclos/h}$$

Tempo verde

$$\text{adicional por ciclo} = \frac{t_{v\_adic. \text{ na hora}}}{n^\circ \text{ de ciclos na hora}} = \frac{35,7 \text{ s/h}}{45 \text{ ciclos/h}} = 0,8 \text{ s/ciclo}$$

logo:

$$t_v = 31 + 0,8 = 31,8 \text{ s (tempo mínimo de verde)}$$

5. Cálculo dos novos tempos de ciclo de verde

A metodologia até aqui proposta permite determinar o tempo de verde exato de cada aproximação, retirando-se excessos ( $tv_{oc}$ ) ou adicionando-se o que faltava ( $tv_{adic}$ ). Os tempos de verde assim obtidos são os tempos mínimos ( $tv_{min}$ ) de verde das respectivas aproximações.

O tempo de verde mínimo necessário para uma aproximação durante uma hora é obtido multiplicando-se  $tv_{min}$  (no ciclo) pelo número de ciclos existente na hora.

$$\text{Nº de ciclos na hora} = \frac{3600 \text{ s}}{tc}$$

$$\text{tempo de verde mínimo na hora} = tv_{min} \times \frac{3600 \text{ s}}{tc}$$

onde:

$tc$  = Tempo de ciclo existente

$tv_{min}$  = Tempo de verde mínimo (no ciclo) da aproximação

$tv_{min/h}$  = Tempo de verde mínimo da aproximação, na hora

$$\begin{aligned} \text{Perda horária máxima} &= 3600 \text{ (soma dos verdes mínimos na hora)} \\ &= 3600 - \sum tv_{min/h} \end{aligned}$$

Quanto maior for a somatória dos tempos de verde mínimos mais saturado estará o cruzamento.

Se a somatória dos verdes mínimos for igual ou superior a 3600s, o cruzamento estará congestionado, qualquer que seja a programação.

Sabendo-se que o tempo perdido em cada ciclo do semáforo ( $tp$ ) é obtido somando-se os tempos de amarelo e os eventuais tempos de pedestres e de limpeza/segurança, pode-se então obter o “Número máximo sw Ciclos na Hora”, dividindo-se a perda horária máxima por  $tp$ :

$$\text{Nº Máximo de Ciclos na Hora} = \frac{\text{perda horária máxima}}{tp}$$

onde

$tp$  = Tempo perdido no Ciclo (tempo sem movimento veicular)

Tendo-se o número máximo de ciclos na hora, basta dividir os 3600s da hora por este número, para obtermos o tempo de ciclo mínimo ( $tv_{min}$ ) do semáforo.

$$tc_{min} = \frac{3600}{\text{número máximo de ciclos na hora}}$$

Deve-se trabalhar sempre com tempos de ciclo maiores que os mínimos, aplicando o coeficiente de 1,5 de WEBSTER para se obter o **ciclo ótimo**

$$(tc_{oc}) = 1,5 tc_{min}$$

Ciclo ótimo é aquele que garante a operação do semáforo com folgas que impedem a formação de filas decorrentes da aleatoriedade dos fluxos de tráfego.

Para se evitar ciclos excessivamente longos, bem como para facilitar a coordenação de semáforos, pode-se operar com tempos de ciclos variando, ainda de acordo com WEBSTER, de 0,75 até 1,5 do tempo de ciclo ótimo.

$$0,75 tc_{oc} < tc < 1,5 tc_{oc}$$

onde

$tc$  = tempo de ciclo a escolher

$tc_{oc}$  = tempo de ciclo ótimo

Obtido o tempo de ciclo, os tempos de verde são calculados proporcionalmente aos tempos mínimos de verde necessários, por meio da seguinte fórmula:

$$tv_i = \frac{tv_{min\ i/h}}{\sum tv_{min/h}} \times (tc - tp)$$

Onde

$tv_i$  = tempo de verde de aproximação “i”

$tv_{min\ i/h}$  = tempo de verde mínimo de aproximação “i” na hora

$\sum tv_{min\ i/h}$  = somatória dos tempos de verde mínimos na hora de todas as aproximações

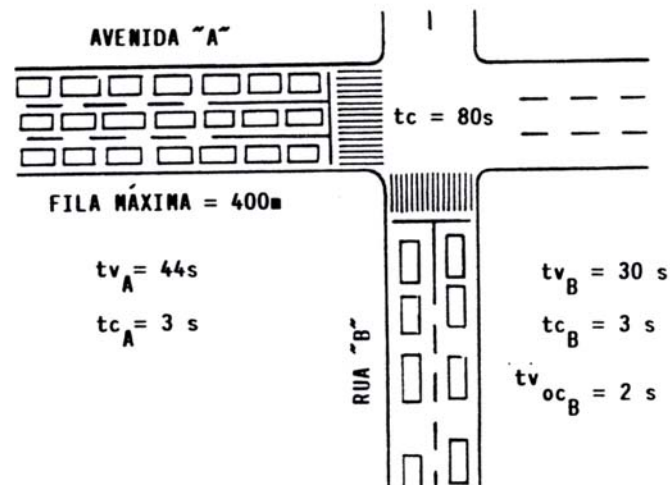
$tc$  = tempo de ciclo

$tp$  = tempo perdido no ciclo (tempo sem movimento veicular)

## 6. Exemplo de aplicação

Aproximação ociosa x aproximação congestionada





Pede-se: Acabar com o congestionamento da Avenida A, sem congestionar a Rua B.  
Resolução:

### 1) Avenida A

Fila máxima = 400m

Fila normal =  $\frac{tv_A}{2s/veic.} \times 6m/veic. = \frac{44}{2} \times 6 = 132m$

Fila congestionada = Fila máxima - Fila normal =  $400 - 132 = 268m$

Tempo de verde adicional na hora =  $\frac{268m}{6m/veic.} \times 2s/veic. = 89s/h$

Nº de ciclos por hora:  $\frac{3600s/h}{80s/ciclo} = 45$  ciclos/h

Tempo de verde existente por hora =  $44s/ciclos \times 45$  coclos/h = 1980 s/h

Tempo de verde mínimo por hora =  $1980 + 89 = 2069$  s/h

$tv_{min}^{A/h} = 2.069$  s/h

### 2) Rua B

$tv_{min} = 30s - 2s = 28s$

$$\text{Tempo de verde mínimo na hora} = \frac{tv_{\min}}{B/h}$$

$$28 \text{ s/ciclos} \times 45 \text{ ciclos/h} = 1260 \text{ s/h}$$

$$\frac{tv_{\min}}{B/h} = 1260 \text{ s/h}$$

3) Determinação dos novos tempos ( $t_c$ ,  $tv_i$ )

Somando-se os verdes mínimos horários exigidos por A e B, e subtraindo-se de 3600 s, teremos a “perda horária máxima” tolerada para a situação proposta.

$$\text{Perda horária máxima} = 3600 - (2069 + 1269) = 271 \text{ s/h}$$

Como a perda em cada ciclo é igual a  $3s + 3s = 6s$ , o número máximo de ciclos na hora pode ser obtido dividindo-se a “perda horária máxima” pela perda de cada ciclo:

$$\text{Nº máximo de ciclos} = \frac{\text{Perda horária máxima}}{\text{Perda por ciclo}}$$

Portanto:

$$\text{Nº máximo de ciclos/h} = \frac{271 \text{ s/h}}{6 \text{ s/ciclo}} = 45,17 \text{ ciclos/h}$$

Como no máximo podemos ter 45,17 ciclos/hora, então

$$\text{o ciclo mínimo é } \frac{3600 \text{ s/h}}{45,17 \text{ ciclos/h}} = 79,7 \text{ s}$$

$$\text{o ciclo ótimo será } = tc_{ot} = 79,7 \times 1,5 = 119,5 \text{ s}$$

A faixa aceitável para  $t_c$  será:  $0,75 tc_{ot} < t_c < 1,5 tc_{ot}$

$$0,75 \times 119,5 < t_c < 1,5 \times 119,5$$

$$90 \text{ s} < t_c < 180 \text{ s}$$

Adotando  $t_c = 90 \text{ s}$ , teremos

$$tv_i = \frac{tv_{\min}}{\sum \frac{i}{h}} \times (t_c - t_p)$$

$$tv_A = \frac{2.069}{(2.069 + 1260)} \times (90 - 6) = 52,2 = 52 \text{ s}$$

$$t_{vB} = \frac{1.260}{(2.069 + 1260)} \times (90 - 6) = 31,8 = 32 \text{ s}$$

Quadro comparativo

	<b>Situação existente</b>	<b>Cálculo</b>
<b>tc</b>	<b>80 s</b>	<b>90 s</b>
<b>Av. “A”</b>	<b>t<sub>vA</sub> = 44 s congestinado (400m)</b>	<b>t<sub>vA</sub> = 52 s tempo certo</b>
<b>R. “B”</b>	<b>t<sub>vB</sub> = 30 s ociosidade (2s)</b>	<b>t<sub>vB</sub> = 32 s tempo certo</b>

Notar que, com o aumento do tempo de ciclo, de 80 s para 90 s. a **R. “B”**, que estava com “**verde sobrando**”, também teve aumentado seu tempo de verde, porém em menor proporção que a Av. “A”.

Engº Sergio Ejzenberg

Superintendência de Engenharia de Tráfego – Diretoria de Operações