

Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação

Luis Vilanova *

Introdução

O cálculo do tempo de ciclo e dos tempos de verde através do método do grau de saturação constitui excelente ferramenta para efetuar a programação dos semáforos. Sua concepção básica consiste em escolher, inicialmente, qual é o grau de saturação desejado para cada um dos links que são controlados pelo semáforo. Em seguida calculam-se quais são os tempos de ciclo e de verde que acarretarão tais graus de saturação.

Vamos considerar neste artigo somente os semáforos que podem operar independentemente de outros semáforos vizinhos, ou seja, que não necessitam estar com eles coordenados. A programação de semáforos coordenados também se fundamenta nos conceitos aqui abordados, mas demanda, além disso, a análise de alguns aspectos adicionais.

A grande vantagem deste método é que consegue estabelecer uma vinculação simples e clara entre a teoria e os conhecimentos práticos dos técnicos que trabalham na área.

Princípios utilizados

O grau de saturação de um link, representado normalmente pelo símbolo x , reflete, em termos práticos, seu nível de carregamento. Dizer que o grau de saturação de um link é de 100% ($x = 1$) é o mesmo que dizer que seu tempo de verde é exatamente suficiente para escoar todos os veículos que chegam desde que atravessem a retenção no patamar do fluxo de saturação; nenhum veículo a mais poderia ter sido atendido (se não x teria sido menor do que 1) e nenhum veículo chegou a ficar retido no instante que o verde terminou (se não x teria sido maior do que 1). Vamos dar outro exemplo. Se o grau de saturação de um link é igual a 50% ($x = 0,5$), isto significa que poderia ter passado o dobro de veículos que efetivamente passaram naquele período de verde. Mais um exemplo: se o grau de saturação de um link é igual a 150% ($x = 1,5$), conclui-se que dois terços dos veículos conseguiram passar enquanto que um terço ficou retido para o próximo ciclo.

Evidentemente, pode-se medir o grau de saturação em qualquer período de tempo que se queira. Normalmente, a exemplo de outros parâmetros de trânsito, utiliza-se o período de uma hora nas aplicações práticas.

Pode-se definir o grau de saturação de um link como a relação entre o número de veículos que desejam passar e o número de veículos que pode conseguir passar durante certo período de tempo.

Em termos matemáticos, o grau de saturação é definido por:

$$x = \frac{F * T_{ciclo}}{FS * T_{verde}} \quad (1)$$

que também pode ser escrito como

$$x = y * \frac{1}{p} \quad (2)$$

onde,

x - grau de saturação do link
 F - fluxo do link
 FS – fluxo de saturação do link
 T_{ciclo} – tempo de ciclo correspondente
 T_{verde} – tempo de verde correspondente
 y – taxa de ocupação
 p – porcentagem de verde correspondente

Escolha do grau de saturação

A escolha do grau de saturação é a parte fundamental do modelo. A teoria indica que se opere numa faixa que vai de 80% a 90% ($0,80 \leq x \leq 0,90$). Nesta faixa obtêm-se os menores valores para o atraso total do semáforo. Se não houver fatores especiais que justifiquem outros valores, recomenda-se a adoção de $x = 0,88$ para todos os links críticos. Aplicações práticas mostraram que este patamar conduz a tempos de ciclo adequados e que conseguem, inclusive, absorver bem as flutuações de demanda e as restrições provocadas por incidentes que reduzem momentaneamente o fluxo de saturação.

Nos casos de saturação muito elevada pode ocorrer que não seja possível adotar o valor resultante, pois levaria a tempos de ciclo impraticavelmente altos. Neste caso, o técnico deve impor o tempo de ciclo máximo como sendo o valor de tempo de ciclo adotado e os graus de saturação dos links críticos serão consequência de tal imposição; o segundo exemplo de aplicação, ao fim deste artigo, mostra o procedimento a ser adotado neste caso.

Outro caso particular ocorre em situações onde a taxa de ocupação de um movimento crítico é muito inferior às dos outros movimentos críticos. Pode decorrer daí que o tempo de verde do movimento mais fraco resulte num valor menor do que o correspondente verde de segurança; o terceiro exemplo de aplicação, ao fim deste artigo, mostra o procedimento a ser adotado neste caso.

No processo de escolha do grau de saturação, o técnico deve considerar os fatores locais que podem vir a influenciar na sua decisão de trabalhar com uma via de uma forma mais ou menos saturada. Os fatores típicos a considerar são:

- a) importância relativa daquela rua no sistema viário;
- b) volume de ônibus;

- c) necessidade de deixar uma folga maior para vias onde incidentes são mais frequentes ou onde causam graves implicações;
- d) risco que a fila formada pelo semáforo venha a bloquear uma via importante a montante;
- e) outras considerações específicas apontadas pelo setor de operação de trânsito.

Deve ficar claro que a escolha de valores baixos para todos os links críticos implica em tempos de ciclo mais elevados e, vice-versa, adotar valores altos vai redundar em tempos de ciclo menores.

Em relação à distribuição dos tempos de verde entre os links críticos, deve se observar que estipular um valor de x menor para um link do que para outro, fará com que o primeiro opere num patamar mais folgado do que o segundo. Normalmente adota-se o mesmo valor para todos os links críticos do semáforo para que todo o cruzamento opere no mesmo nível de saturação.

A título de orientação prática, sugerimos que não se adotem valores de x menores do que 0,75, pois conduzem a situações de excessivo tempo de verde ocioso; na verdade, é bom evitar mesmo valores inferiores a 0,80. Por outro lado, valores maiores do que 0,93 são bastante perigosos, pois a capacidade de reserva do cruzamento é insuficiente para absorver tanto as flutuações sazonais do trânsito como a ocorrência de incidentes que venham a restringir o fluxo de saturação de algum link.

Demonstração do cálculo do tempo de ciclo e dos tempos de verde

Uma vez escolhidos os graus de saturação dos links críticos (x_{lc}), parte-se para o cálculo do tempo de ciclo.

Calcula-se a taxa de ocupação de cada link crítico, através de:

$$y_{lc} = \frac{F_{lc}}{FS_{lc}} \quad (3)$$

A seguir, calcula-se a porcentagem de verde necessária para cada link crítico:

$$p_{lc} = \frac{y_{lc}}{x_{lc}} \quad (4)$$

A equação (4) assegura que, se for garantida ao link crítico lc uma porcentagem igual a p_{lc} , o mesmo operará com um grau de saturação igual a x_{lc} .

Se houver n links críticos, teremos, então, a série $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{(n-1)}, p_n$.

Consideremos um período de tempo T qualquer. Durante este período, um link crítico qualquer vai precisar um tempo de verde igual a $p_{lc} * T$. Note-se que este tempo de verde não precisa ser dado de uma vez só para que o link fique atendido; o que importa é que, ao fim do período T , o link tenha recebido $p_{lc} * T$, somando todas as vezes em que

obteve verde. Para que todos os links críticos possam ser atendidos, o somatório dos termos $p_{lc} * T$ deve ser menor do que T .

Porém existe ainda outra necessidade que precisa ser atendida. Toda vez que um período de verde se encerra para dar vez a outro, ocorre um lapso de tempo perdido para efeito de escoamento de veículos, que corresponde, aproximadamente, ao tempo de entreverdes (amarelo + vermelho de limpeza). Chama-se de tempo morto (T_{morto}) à soma de todos estes lapsos de tempo perdido que ocorrem dentro do ciclo. Pode-se dizer que o tempo morto corresponde à parte do ciclo em que os fluxos de todos os links críticos foram iguais a zero e que, portanto, não é aproveitado para efeito de escoamento de veículos. Portanto o período T deve ser capaz de atender não só ao escoamento dos links críticos como também ao tempo morto.

Durante o período T ocorre um número de ciclo igual a T / T_{ciclo} . De onde se conclui que durante o período T se perde um tempo igual a $(T / T_{ciclo}) * T_{morto}$.

Podemos agora escrever a seguinte expressão:

$$\sum_{lc=1}^n p_{lc} * T + (T / T_{ciclo}) * T_{morto} = T \quad (5)$$

sendo n o número de links críticos existente

A expressão (5) conduz a:

$$T_{ciclo} = \frac{T_{morto}}{1 - \sum_{lc=1}^n p_{lc}} \quad (6)$$

Em termos conceituais, a expressão (6) aponta qual deve ser o tempo de ciclo de um semáforo para que cada um de seus n links críticos opere com o correspondente grau de saturação x_{lc} desejado e para que, simultaneamente, possam acontecer todos os tempos perdidos durante as transições entre verdes.

Em situações muito saturadas, não é viável aplicar a expressão (6), pois se pode chegar a tempos de ciclo maiores do que o tempo de ciclo máximo estipulado, ou até a valores negativos quando o somatório das frações de verde for superior a 1. Nestes casos, adota-se o tempo de ciclo igual ao tempo de ciclo máximo. Os graus de saturação desejados não poderão ser cumpridos. O segundo exemplo apresentado neste trabalho detalha o processo a ser seguido nestas situações.

O tempo de verde de um link lc qualquer, é dado por:

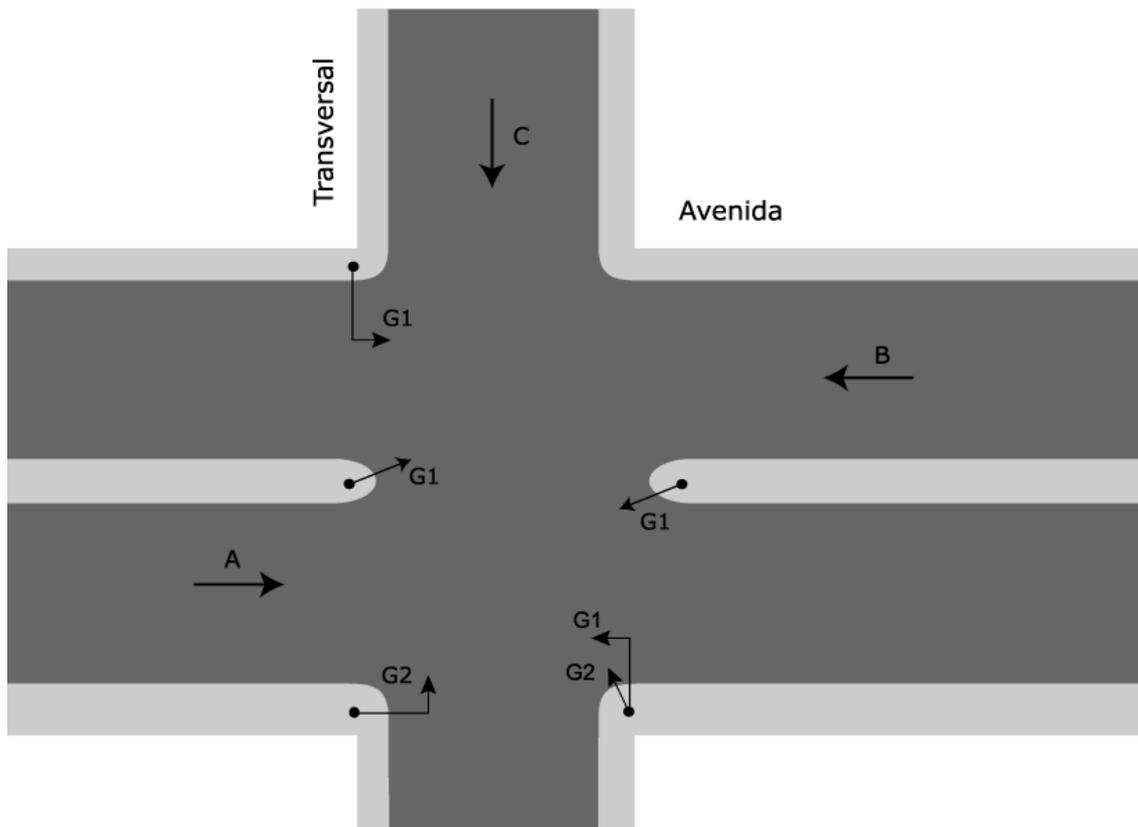
$$T_{verde,lc} = p_{lc} * T_{ciclo} \quad (7)$$

A equação (7) pode conduzir, eventualmente, a que um determinado link tenha seu tempo de verde inferior ao respectivo verde de segurança. Vamos deixar os procedimentos a serem adotados neste caso para um futuro artigo que trate especificamente do tema.

Exemplos de aplicação

Primeiro exemplo

Calcular a programação do semáforo da figura de forma que o link crítico da avenida opere com grau de saturação igual a 0,85 e o da transversal com 0,90.



Dados dos fluxos:

$$F_A = 2500 \text{ veíc-eq/h}$$

$$F_B = 2000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$F_C = 1050 \text{ veíc-eq/h}$$

Dados dos fluxos de saturação:

$$FS_A = 5000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_B = 5000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_C = 3500 \text{ veíc-eq/h}$$

Dados dos entreverdes:

Tempo de amarelo ao fim do verde da avenida: 4 s

Tempo de vermelho de limpeza ao fim do amarelo da avenida: zero

Tempo de amarelo ao fim do verde da transversal: 3 s

Tempo de vermelho de limpeza ao fim do amarelo da avenida: 2 s

Solução

Cálculo das taxas de ocupação

$$y_A = 2500 / 5000 = 0,5$$

$$y_B = 2000 / 5000 = 0,4$$

$$y_C = 1050 / 3500 = 0,3$$

Pode-se afirmar que o link crítico da avenida é o link A, pois $y_A > y_B$. Pode-se, então, desconsiderar o link B para os cálculos seguintes, pois o tempo que for atribuído ao link A será, com certeza, suficiente para atender também ao link B.

Cálculo das frações de verde

$$p_A = 0,5 / 0,85 = 0,588$$

$$p_C = 0,3 / 0,90 = 0,33$$

$$\sum p = 0,588 + 0,33 = 0,918$$

Cálculo do tempo morto

$$T_{morto} = 4 + 0 + 3 + 2 = 9 \text{ s}$$

Cálculo do tempo de ciclo

Aplicando a expressão (6), vem:

$$T_{ciclo} = \frac{9}{1 - 0,918} = 110 \text{ s}$$

Cálculo dos tempos de verde

Aplicando a expressão (7), vem:

$$T_{verde,A} = 0,588 * 110 = 65 \text{ s} \quad (7)$$

$$T_{verde,C} = 0,33 * 110 = 36 \text{ s}$$

Verificação

Composição do tempo de ciclo: $65 + 36 + 4 + 0 + 3 + 2 = 110$

Grau de saturação do link A, que é o crítico da avenida: $x_A = 0,5 / 0,588 = 0,85$

Grau de saturação do link C: $x_C = 0,3 / 0,33 \approx 0,90$

Programação

O tempo de ciclo do semáforo deve ser igual a 110 s. O tempo de verde da avenida será de 65 s e o da transversal de 36 s. Dessa forma o grau de saturação da avenida será igual a 0,85 e o da transversal será igual a 0,90.

Segundo exemplo (tempo de ciclo maior do que o máximo)

Vamos aproveitar a figura do primeiro exemplo, mas mudando os dados para configurar uma situação de congestionamento e, conseqüentemente, chegar a um tempo de ciclo maior do que o tempo de ciclo máximo estipulado.

Continuemos com grau de saturação igual a 0,85 para a avenida e 0,90 para a transversal. Adotemos o tempo de ciclo máximo de 120 segundos.

Dados dos fluxos:

$$F_A = 4000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$F_B = 2000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$F_C = 1400 \text{ veíc-eq/h}$$

Dados dos fluxos de saturação:

$$FS_A = 5000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_B = 5000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_C = 3500 \text{ veíc-eq/h}$$

Dados dos entreverdes:

Tempo de amarelo ao fim do verde da avenida: 4 s

Tempo de vermelho de limpeza ao fim do amarelo da avenida: zero

Tempo de amarelo ao fim do verde da transversal: 3 s

Tempo de vermelho de limpeza ao fim do amarelo da avenida: 2 s

Solução

Cálculo das taxas de ocupação

$$y_A = 3000 / 5000 = 0,6$$

$$y_B = 2000 / 5000 = 0,4$$

$$y_C = 800 / 3500 = 0,229$$

Pode-se afirmar que o link crítico da avenida é o link A, pois $y_A > y_B$. Pode-se, então, desconsiderar o link B para os cálculos seguintes, pois o tempo que for atribuído ao link A será, com certeza, suficiente para atender também ao link B.

Cálculo das frações de verde

$$p_A = 0,6 / 0,85 = 0,706$$

$$p_C = 0,229 / 0,90 = 0,254$$

$$\sum p = 0,706 + 0,254 = 0,960$$

Cálculo do tempo morto

$$T_{morte} = 4 + 0 + 3 + 2 = 9 \text{ s}$$

Cálculo do tempo de ciclo

Aplicando a expressão (6), vem:

$$T_{ciclo} = \frac{9}{1-0,96} = 225 \text{ s}$$

Como o tempo de ciclo encontrado é superior ao tempo de ciclo máximo adotado, deve-se atribuir 120 s para o tempo de ciclo.

Cálculo dos tempos de verde

Neste caso, não se pode cumprir os graus de saturação desejados e, conseqüentemente, as frações de verde calculadas anteriormente. Devemos calcular outras frações de verde através de um sistema de duas equações a duas incógnitas. A equação (8) cuida da viabilidade de que os tempos de verde caibam dentro do ciclo. A equação (9) visa garantir que seja preservada a proporcionalidade entre os graus de saturação iniciais desejados.

$$p_A + p_C = 1 - T_{morte} / T_{ciclo} \quad (8)$$

$$\frac{\frac{y_A}{p_A}}{\frac{y_C}{p_C}} = \frac{x_{A,desejado}}{x_{C,desejado}} \quad (9)$$

Aplicando as equações ao nosso exemplo:

$$p_A + p_C = 1 - 9/120 \quad (8)$$

$$\frac{\frac{0,6}{p_A}}{p_C} = \frac{0,85}{0,90} \quad (9)$$

A solução do sistema nos conduz a:

$$p_A = 0,68$$

$$p_C = 0,2451$$

A partir das frações de verde, calculamos os tempos de verde:

$$T_{verde,A} = 0,68 * 120 = 82 \text{ s}$$

$$T_{verde,C} = 0,2451 * 120 = 29 \text{ s}$$

Verificação

Composição do tempo de ciclo: $82 + 29 + 4 + 0 + 3 + 2 = 120$

Grau de saturação do link A, que é o crítico da avenida: $x_A = 0,60 / 0,68 = 0,88$

Grau de saturação do link C: $x_C = 0,229 / 0,2451 = 0,93$

Observe-se que foi necessário adotar graus de saturação superiores aos desejados inicialmente.

Relatividade entre os graus de saturação encontrados e os graus de saturação desejados inicialmente:

Razão entre os graus de saturação encontrados: $0,88/0,93 = 0,94$

Razão entre os graus de saturação desejados inicialmente: $0,85/0,90 = 0,94$

Ficou, portanto, preservada a relatividade entre os graus de saturação.

Programação

O tempo de ciclo do semáforo é igual a 120 s. O tempo de verde da avenida será de 82 s e o da transversal de 29 s. Dessa forma o grau de saturação da avenida será igual a 0,88 e o da transversal será igual a 0,93.

Terceiro exemplo (tempo de verde de um movimento menor do que o verde de segurança)

Consideremos os seguintes dados para a situação representada na figura a fim de analisar a situação em que um dos tempos de verde calculados resulte inferior ao respectivo tempo de verde de segurança.

Via Principal:

$$F_A = 1440 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_A = 2000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$\text{Verde de segurança da Via Principal} = 15 \text{ s}$$

Via Secundária:

$$F_B = 180 \text{ veíc-eq/h}$$

$$FS_B = 2000 \text{ veíc-eq/h}$$

$$\text{Verde de segurança da Via Secundária} = 12 \text{ s}$$

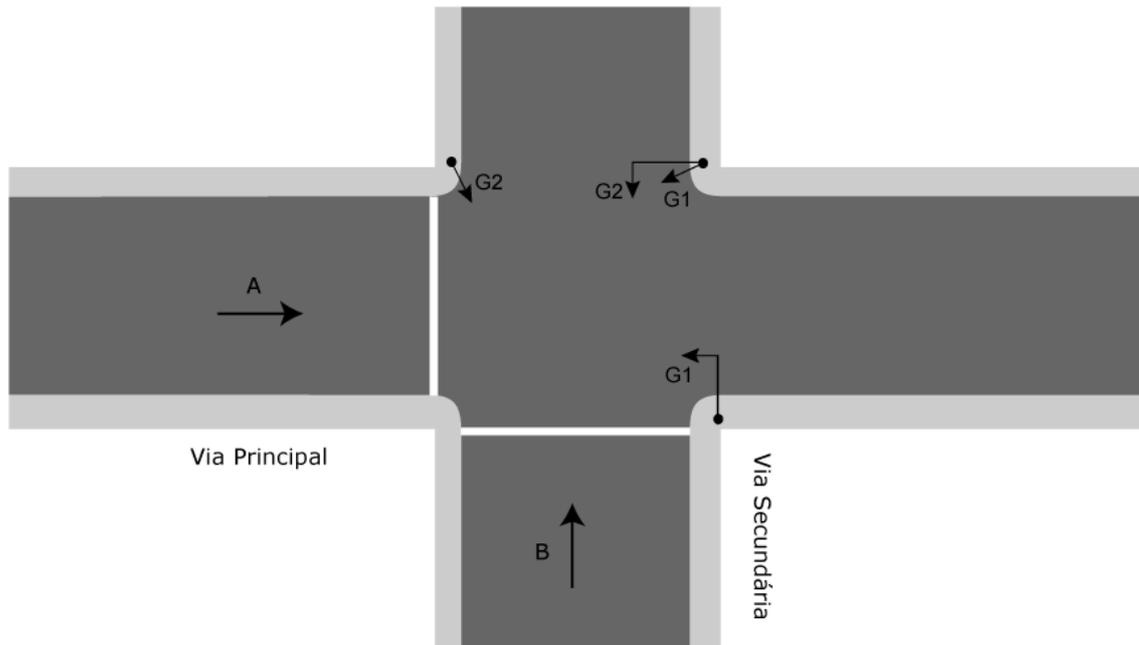
Dados dos entreverdes:

Tempo de amarelo após o verde da Via Principal: 4 s

Tempo de amarelo após o verde da Via Secundária: 4 s

Grau de saturação meta:

Deseja-se que os graus de saturação das duas vias seja iguais a 0,9



Cálculo da programação semafórica:

$$y_A = 1440 / 2000 = 0,72$$

$$y_B = 180 / 2000 = 0,09$$

$$p_A = 0,72 / 0,9 = 0,80$$

$$p_B = 0,09 / 0,9 = 0,10$$

$$T_{morto} = 4 + 4 \rightarrow 8 \text{ s}$$

$$T_{ciclo} = \frac{8}{1 - (0,8 + 0,1)} = 80 \text{ s}$$

$$T_{verde,A} = 80 * 0,80 = 64 \text{ s}$$

$$T_{verde,B} = 80 * 0,10 = 8 \text{ s}$$

Chegou-se ao tempo de verde de 8 segundos para a Via Secundária, que é menor do que o verde de segurança especificado para ela.

É necessário recalcular a programação semafórica para que o verde de segurança da Via Secundária não seja transgredido. Para isso, o primeiro passo é fixar o seu tempo de verde como sendo o próprio verde de segurança. A partir daí serão recalculados o tempo de ciclo e o tempo de verde da Via Principal. A premissa adotada aqui é que os graus de

saturação das duas vias serão idênticos. O projetista pode adotar outras relações entre estes graus de saturação. Para recalcular o tempo de ciclo, será considerado que o semáforo possui apenas um movimento crítico (o da Via Principal) e que o tempo de verde da Via Secundária faz parte do tempo morto do ciclo. Tendo o novo tempo de ciclo, calcula-se o novo tempo de verde da Via Principal.

Vamos passar a aplicar tal metodologia ao nosso exemplo.

O tempo de verde da Via Secundária é fixado como sendo o próprio verde de segurança.

$$T_{verde,B} = 12 s$$

O grau de saturação da Via Secundária será dado por:

$$x_B = \frac{y_B}{p_B}$$

Como,

$$p_B = \frac{12}{T_{ciclo}}$$

tem-se,

$$x_B = \frac{0,09 * T_{ciclo}}{12}$$

O grau de saturação da Via Principal será dado por:

$$x_A = \frac{y_A}{p_A}$$

Como,

$$p_A = \frac{T_{ciclo} - (12 + 8)}{T_{ciclo}}$$

tem-se,

$$x_A = \frac{0,72 * T_{ciclo}}{T_{ciclo} - 20}$$

Mas, pela premissa adotada, $x_A = x_B$ pois os graus de saturação devem ser iguais entre si.

Então,

$$\frac{0,72 * T_{ciclo}}{T_{ciclo} - 20} = \frac{0,09 * T_{ciclo}}{12}$$

o que conduz a $T_{ciclo} = 116$ s

com,

$$T_{verde,B} = 12 \text{ s}$$

e

$$T_{verde,A} = 116 - (12 + 8) = 96 \text{ s}$$

Recálculo dos graus de saturação

$$p_A = \frac{96}{116} = 0,828$$

$$x_A = \frac{0,72}{0,828} = 0,87$$

$$p_B = \frac{12}{116} = 0,103$$

$$x_B = \frac{0,09}{0,103} = 0,87$$

Foi, portanto, satisfeita a condição de que os graus de saturação fossem iguais. Como o tempo de ciclo a que se chegou (116 s) foi maior do que o tempo de ciclo calculado originalmente (80 s), é natural que o novo grau de saturação (0,87) seja menor do que o grau de saturação adotado no início (0,90).

Situações que envolvem três ou mais movimentos críticos podem ser resolvidas através de procedimento análogo ao apresentado. Basta fixar o tempo de verde do movimento mais fraco como sendo seu próprio verde de segurança, considerá-lo como sendo parte do tempo morto, e recalculer a programação para os outros links críticos restantes.

Resumo final

O método do grau de saturação traz a vantagem de estabelecer uma relação palpável entre a teoria e os resultados práticos de sua aplicação. Após a implantação, o técnico consegue visualizar na prática o que significou aquele grau de saturação que ele escolheu inicialmente e, dessa forma, pode aprimorar o processo de escolha para outra aplicação no futuro.

O método depende da escolha do grau de saturação e tal escolha pode ser criticada devido à sua aparente subjetividade, mas como vimos no desenvolvimento da teoria,

existe uma faixa relativamente estreita em que sabemos, a priori, que o melhor grau de saturação deve se situar. Além disso, métodos que tomam por base a otimização de algum indicador, e que por isso podem dar a aparência de uma solução mais objetiva, apresentam o grave defeito de pressupor que o perfil do trânsito apresenta uma distribuição aleatória, premissa esta que só se verifica em raríssimos casos quando estamos lidando com uma malha viária de características urbanas.

Outro ponto que deve ser ressaltado é que o programa SCOOT, que é o programa de controle de semáforos em tempo real mais utilizado e reconhecido em todo o mundo, utiliza este método para o cálculo do tempo de ciclo e dos tempos de verde.

Outro ponto interessante, sob o ponto de vista operacional, é que se pode estabelecer maior coeficiente de segurança para uma via, diminuindo seu grau de saturação, quando se sabe que tal via é muito sensível à ocorrência de incidentes que restrinjam sua capacidade ou quando se tratar de uma via que sofre oscilações imprevisíveis em termos de demanda.

Glossário

atraso – atraso de um link é o tempo perdido devido ao semáforo de todos os veículos que utilizam este link, durante um certo período de tempo. É representado por A . Unidade: [veículo]*[T] / [T], normalmente veículo-equivalente * h/h ou veíc-eq * h/h

atraso total do semáforo – atraso total de um semáforo é o somatório do atraso de todos os links por ele controlados. É representado por A_{total} . Unidade: [veículo]*[T] / [T], normalmente veículo-equivalente * h/h ou veíc-eq * h/h

estágio – configuração das indicações luminosas de um semáforo que dá direito de passagem a determinados movimentos compatíveis entre si; durante o período em que um estágio vigora, as indicações luminosas permanecem inalteradas e, portanto, não se alteram os movimentos autorizados

fluxo – fluxo de um link é a quantidade de veículos que atravessam a seção onde o link termina, junto ao semáforo, num certo período de tempo. É representado por F . Unidade: [veículo] / [T], normalmente veículo-equivalente/h ou veíc-eq/h

fluxo de saturação – fluxo de saturação de um link é o máximo fluxo que ele pode comportar; é medido na faixa de retenção, nas condições usuais da via e de tráfego. É representado por FS . Unidade: [veículo] / [T], normalmente veículo-equivalente/h ou veíc-eq/h

fração de verde – fração de verde de um link é a razão entre o tempo de verde deste link durante um ciclo e o tempo deste ciclo. É representado por p e é calculado através da expressão T_{verde} / T_{ciclo} . Unidade: adimensional

grau de saturação - grau de saturação de um link é o índice que representa o nível de saturação que aquele link opera, sob certas condições de fluxo, fluxo de saturação, tempo de verde e tempo de ciclo. É representado por x e é calculado através da expressão $(F * T_{ciclo}) / (FS * T_{verde})$. Unidade: adimensional

link – representação gráfica, em forma de seta, que mostra a direção e sentido do movimento de veículos que chegam num semáforo; costuma-se utilizar este termo em substituição ao movimento de veículos que representa; assim, quando se diz que o fluxo de um link é igual a 500 veíc-eq/h, isto significa que o fluxo do movimento que este link representa é igual a 500 veíc-eq/h

links críticos – links que representam os movimentos mais saturados que chegam ao semáforo, que são liberados em estágios distintos e para os quais é necessário calcular a programação semaforica

taxa de ocupação – taxa de ocupação de um link é o quociente entre seu fluxo e seu fluxo de saturação. É representado por y e é calculado através da expressão F / FS .
Unidade: adimensional

tempo de ciclo máximo – tempo de ciclo máximo de um semáforo é o maior tempo de ciclo que se admite para ele; é determinado a partir de considerações de conforto dos veículos e dos pedestres que o utilizam. É representado por $T_{ciclo,máx}$. Unidade: [T]

** Luis Vilanova é especialista em controle e monitoração de trânsito e trabalha atualmente na Gerência de Desenvolvimento Tecnológico da CET / SP.*