FUNDAMENTOS DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA

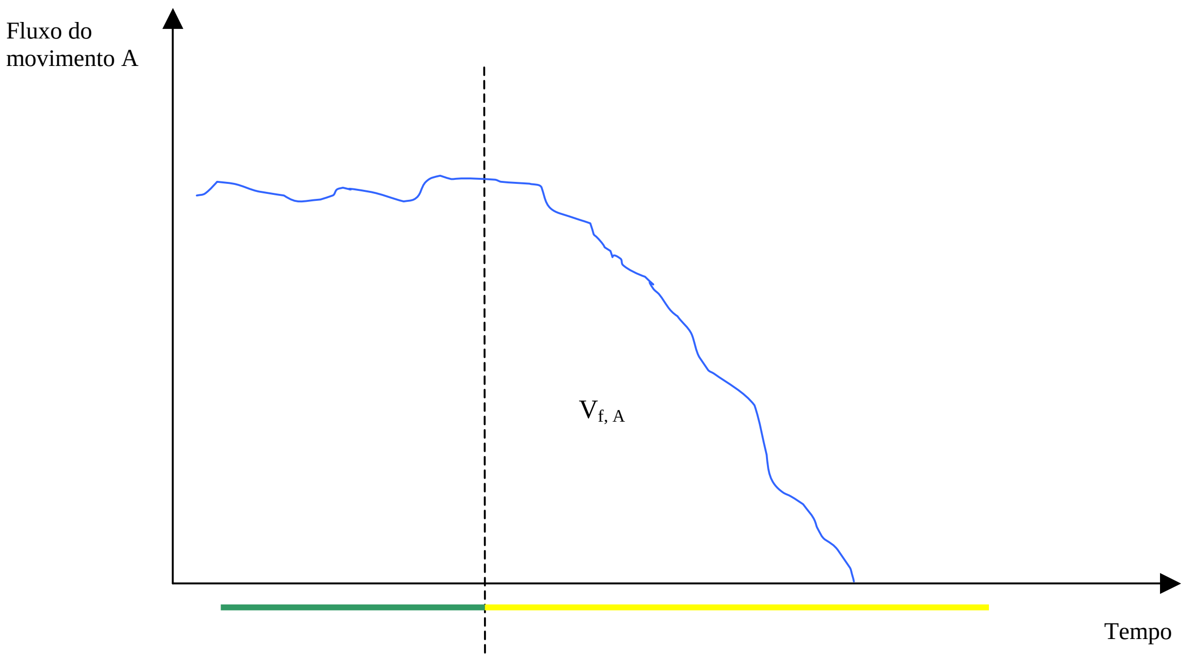
Luis Vilanova *

Apresentação

Este artigo detalha os primeiros passos da teoria de cálculo da programação semafórica de um semáforo isolado, deduzindo as equações básicas do tempo de ciclo e dos tempos de verde. O terceiro elemento que compõe a programação – a defasagem – fará parte de outro trabalho, onde será abordada a metodologia para redes de semáforos.

Tempo morto

Toda vez que, num semáforo, um movimento perde o direito de passagem, para dar vez a um movimento conflitante, ocorre uma situação transitória, onde alguns veículos do movimento que se encerra chegam a passar mesmo após findo seu verde enquanto que os veículos do movimento seguinte ainda demoram alguns segundos para se colocar em marcha.



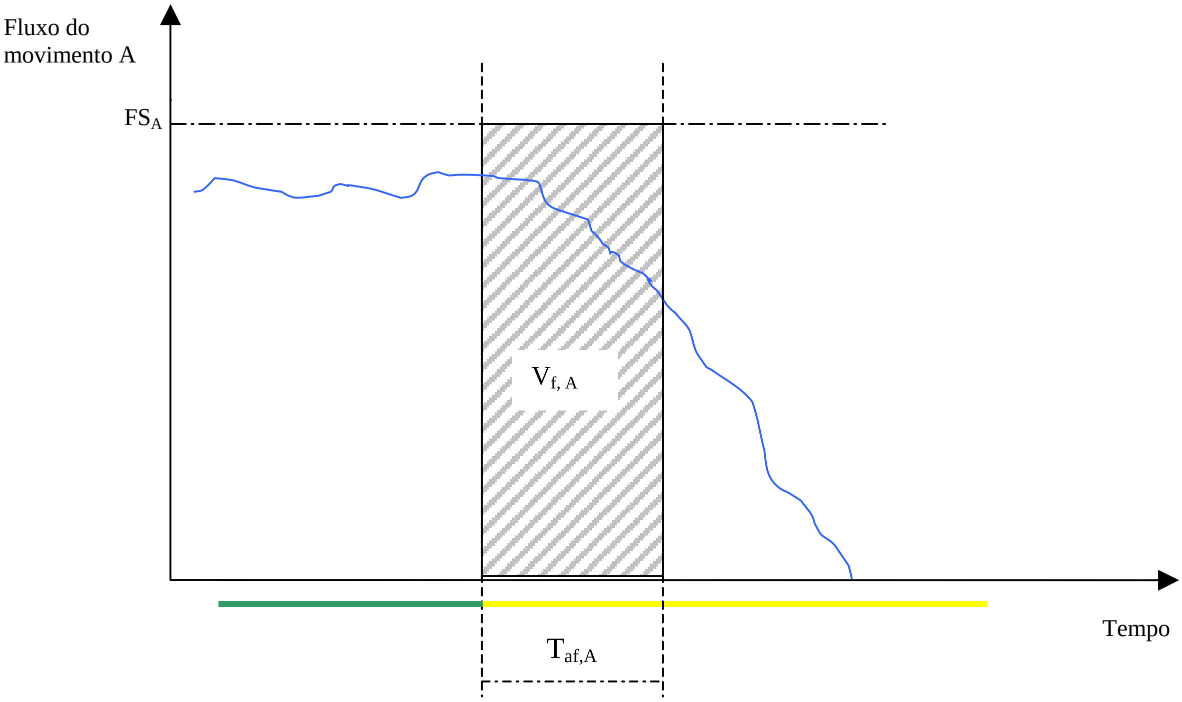


Figura 1b

A Figura 1a apresenta o comportamento do fluxo que está terminando. Mesmo após o instante em que termina o verde do movimento A, alguns veículos ainda continuam a passar. A quantidade destes veículos $V_{f,A}$ é dada pela área compreendida entre a linha azul que representa o fluxo de veículos, a ordenada no fim do verde e o eixo das abcissas.

A Figura 1b nos ajuda a entender a grandeza $T_{af,A}$ que representa o tempo que demoraria para esgotar $V_{f,A}$ (volume que corresponde à área hachurada) caso o fluxo passasse a uma taxa igual ao fluxo de saturação FS_A.

$$T_{af,A} = \frac{V_{f,A}}{FS_A}$$

onde,

$T_{af,A}$ – tempo aproveitado no final do movimento A;
$V_{f,A}$ - quantidade de veículos do movimento A que consegue passar após o término do seu verde;
FS_A - fluxo de saturação do movimento A.

Podemos entender a grandeza $T_{af,A}$ como um período de prolongamento do tempo de verde, após seu final.

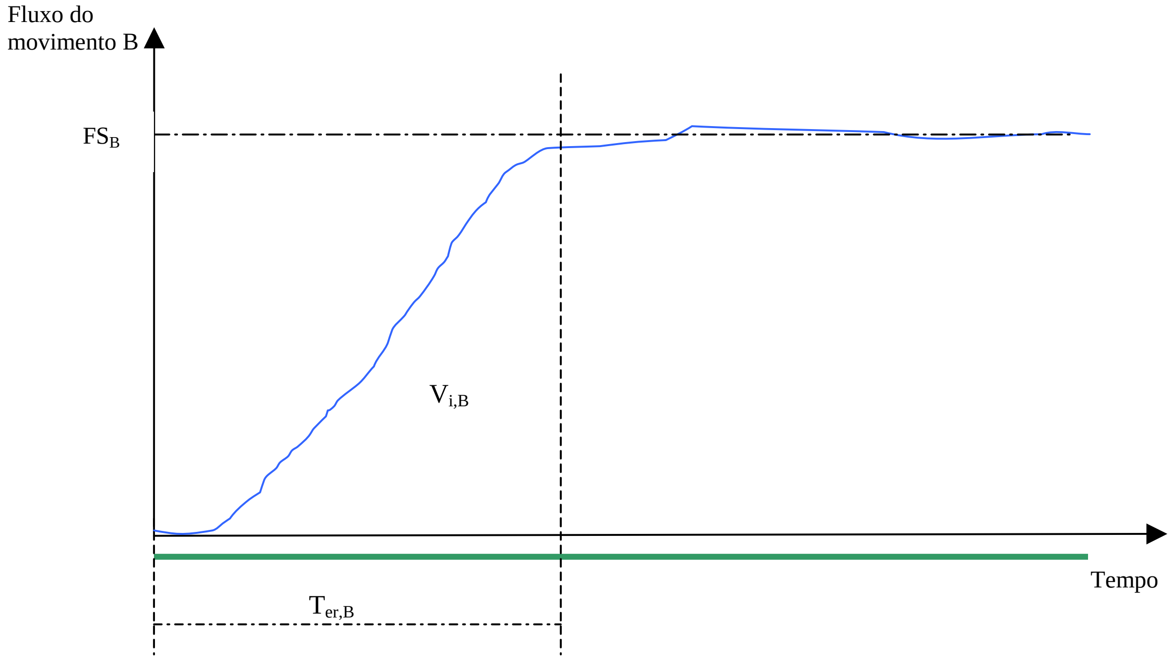


Figura 2a

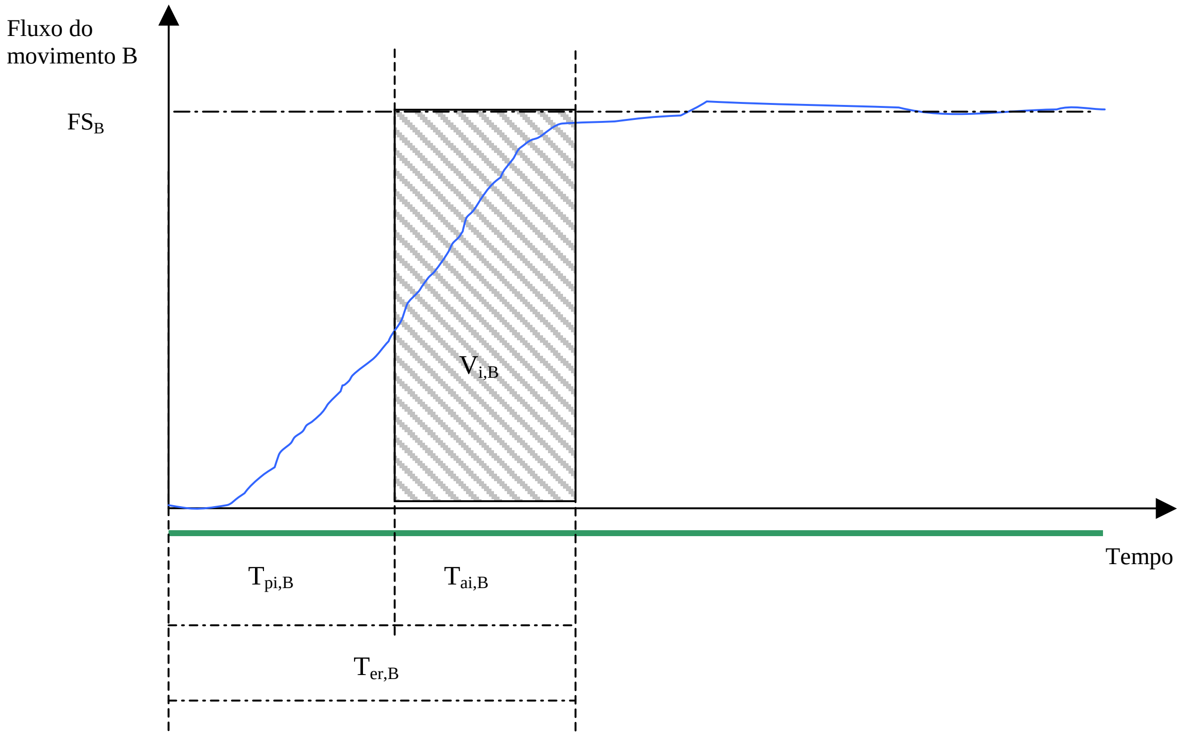


Figura 2b

A figura 2a mostra o outro lado da moeda. Uma vez aberto o semáforo para o movimento B, decorre ainda algum tempo até que o fluxo consiga atingir o valor do fluxo de saturação FS_B .Na figura, a entrada em regime só ocorre após um intervalo que identificamos por $T_{er,B}$. Só a partir deste ponto é que o verde do movimento B é aproveitado na sua plena capacidade de FS_B. Existe, portanto, um período desperdiçado no início do tempo de verde. Durante o intervalo $T_{er,B}$, consegue passar uma quantidade de veículos $V_{i,B}$ que corresponde à área compreendida entre a linha azul, a ordenada ao fim de $T_{er,B}$ e o eixo das abcissas.

Analogamente ao que fizemos para o fim do verde, podemos calcular o intervalo $T_{ai,B}$ (tempo aproveitado no início), que representa o tempo que demoraria para esgotar $V_{i,B}$ (volume que corresponde à área hachurada) caso o fluxo passasse a uma taxa igual ao fluxo de saturação FS_B .

$$T_{ai,B} = \frac{V_{i,B}}{FS_B}$$

em que,
$T_{ai,B}$ - tempo aproveitado no início do movimento B;
$V_{i,B}$ - quantidade de veículos do movimento B que consegue passar até a entrada em regime, ou seja, até que o fluxo atinja o valor máximo FS_B;
FS_B - fluxo de saturação do movimento B.

Podemos identificar, na figura 2b, um intervalo inicial, que denominamos $T_{pi,B}$,onde o fluxo é nulo, dentro do nosso enfoque de substituir a curva real do fluxo por um retângulo equivalente de altura FS . Conforme mostra a figura, o valor de $T_{pi,B}$ é simplesmente a diferença entre o tempo que leva para entrar em regime e o tempo aproveitado no início:

$$T_{pi,2} = T_{er,2} - T_{ai,2}$$

em que,
$T_{pi,B}$ - tempo perdido no início do movimento B;
$T_{er,B}$ - tempo que decorre entre o início do verde e o início do escoamento do fluxo no patamar de saturação FS_B;
$T_{ai,B}$ - tempo aproveitado no início do movimento B;

Podemos entender a grandeza $T_{pi,B}$ como um período de desperdício do tempo de verde no seu início.

Percebemos, então, que, por um lado, existe um intervalo de tempo aproveitado pelos veículos que “encomprida” o tempo de verde; por outro lado existe um intervalo de tempo perdido que o “encurta”. Podemos, então, definir a grandeza $T_{verde\ efetivo,B}$ que representa o tempo de verde efetivamente disponível para o movimento B e que pode ser calculado por:

$$T_{verde\,efetivo,B} = T_{verde,B} + T_{af,B} - T_{pi,B}$$

onde,
$T_{verde\ efetivo,B}$ – tempo de verde efetivo do movimento B em um ciclo;
$T_{verde,B}$ – tempo em que o foco verde do movimento B fica aceso durante o ciclo;
$T_{af,B}$ – tempo aproveitado no final do movimento B;
$T_{pi,B}$ - tempo perdido no início do movimento B;

É conveniente esclarecer a utilização do fluxo de saturação nas expressões até aqui desenvolvidas. A rigor, o semáforo pode estar operando com um fluxo que não alcança o fluxo de saturação, principalmente no fim do verde. Recomenda-se adotar o fluxo de saturação nos cálculos a fim de garantir que a programação esteja preparada para enfrentar situações saturadas.

Uma vez apresentada a teoria sobre o ganho e perda do verde nas transições, podemos partir para discorrer sobre o tempo morto no ciclo.

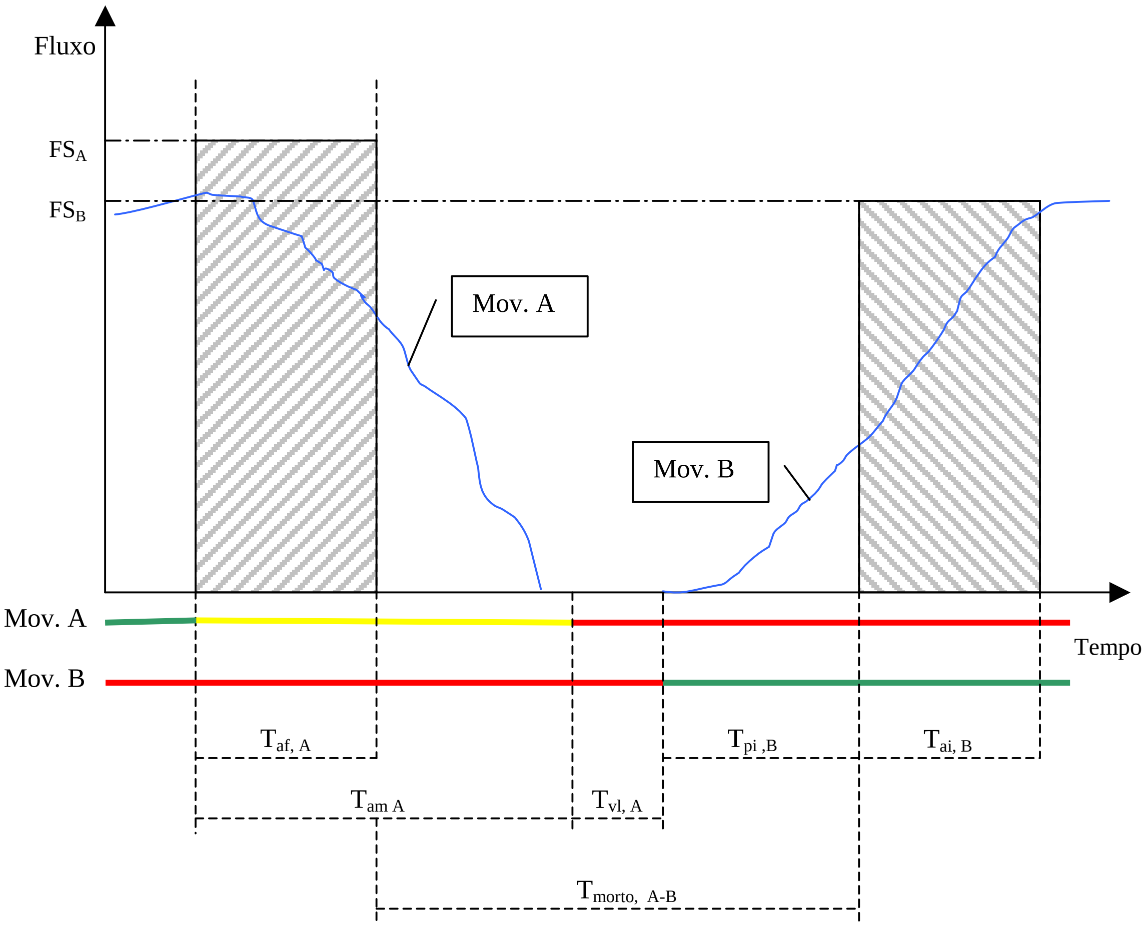


Figura 3

A fim de determinar o tempo morto, os fluxos reais dos movimentos A e B foram substituídos, na figura 3, pelos retângulos equivalentes de alturas, respectivamente, FS_A e FS_B.

Os veículos do movimento A podem conseguir fluir à taxa igual ao fluxo de saturação FS_A até o final de $T_{af,A}$. Os veículos do movimento B só podem alcançar o pleno aproveitamento FS_B a partir do início de $T_{ai,B}$, ou seja, a partir do final de $T_{pi,B}$. Entre estes dois pontos, o fluxo equivalente de veículos dos dois movimentos é igual a zero. Existe, portanto, na transição dos estágios um período totalmente perdido para efeito de rendimento da fluidez, que denominamos Tempo Morto. No nosso exemplo, chamamos este intervalo perdido de $T_{morto,\,A\text{-}B}$.

Da Figura 3, este valor é determinado por:

$$T_{morto,\,A-B} = T_{am,\,A} + T_{vl,\,A} + T_{pi,\,B} - T_{af,\,A}$$

onde,

$T_{morto,A\text{-}B}$ – período que ocorre na transição do verde do movimento A para o verde do movimento B e em que o fluxo de veículos é considerado igual a zero para ambos movimentos;

$T_{am,A}$ - tempo de amarelo do movimento A;

$T_{vl,A}$ - tempo de vermelho de limpeza do movimento A;

$T_{pi,B}$ - tempo perdido no início do movimento B;

$T_{af,A}$ – tempo aproveitado no final do movimento A.

Pode-se dizer que o tempo morto que ocorre na transição entre estágios é igual ao tempo de entreverdes (amarelo mais vermelho de limpeza) devidamente corrigido por parâmetros que levam em consideração a inércia dos veículos.

Existe, entretanto, outro fator responsável pelo aparecimento do tempo morto. Trata-se do estágio exclusivo para pedestres. Às vezes, entre dois estágios veiculares insere-se um estágio onde só os pedestres têm direito de passagem. Este período deve ser tratado, portanto, como um período de tempo morto adicional.

Dessa forma, pode-se dizer que o tempo morto total que ocorre durante um ciclo é o somatório dos tempos mortos que ocorrem durante os intervalos de entreverdes das transições entre estágios veiculares e dos eventuais estágios específicos de pedestres existentes. A expressão a seguir fornece o cálculo do tempo morto do ciclo para qualquer situação:

$$T_{morto} = \sum_{i=1}^{n} T_{morto,\; i\,-\;i+1} + T_{estágio\ de\ pedestres}$$

onde,

T_{morto} - tempo morto durante o ciclo, que é a parcela do ciclo que não se pode aproveitar para o escoamento dos veículos;

$\sum_{i=1}^{n} T_{morto,\; i\,-\,i+1}$ – *tempo morto na transição entre o estágio que atende ao movimento i e o estágio que atende ao movimento* $i+1$, *para os n movimentos críti*cos *do semáforo*;

$T_{estágio\ de\ pedestres}$ - tempo total de duração do estágio de pedestres (verde mais vermelho intermitente), quando existir.

Tempo de ciclo

Uma vez inserido o conceito do tempo morto, podemos passar a apresentar o raciocínio que fundamenta o cálculo do tempo de ciclo. Vamos utilizar um exemplo bem simples para explicá-lo. A Figura 4 mostra o caso de um semáforo com apenas dois movimentos críticos. Em seguida, encontramos os correspondentes dados.

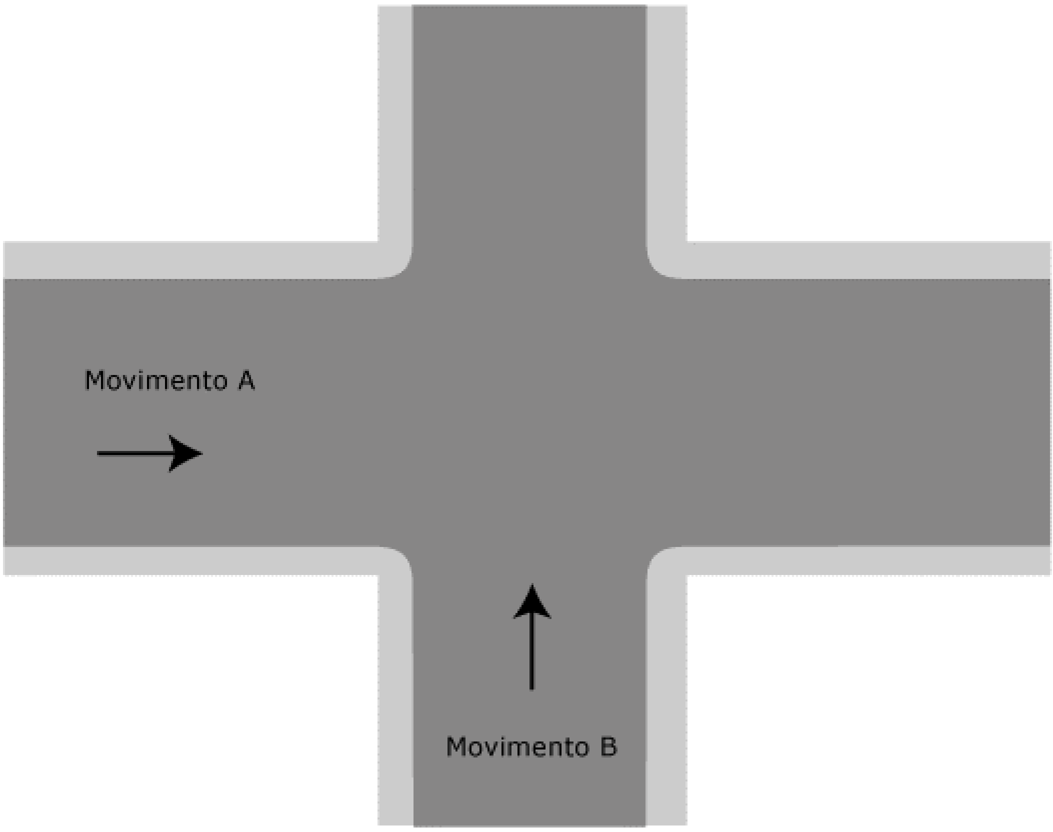


Figura 4

Dados dos fluxos:

F_A = 2500 veíc-eq/h
F_B = 1050 veíc-eq/h

Dados dos fluxos de saturação:

FS_A = 5000 veíc-eq/h
FS_B = 3500 veíc-eq/h

Dados dos entreverdes:

Tempo de amarelo ao fim do verde do movimento A - $T_{am,A}$ = 4 s
Tempo de vermelho de limpeza ao fim do movimento A – $T_{vl,A}$ = zero
Tempo de amarelo ao fim do verde do movimento B - $T_{am,A}$ = 3 s
Tempo de vermelho de limpeza ao fim do movimento B – $T_{vl,B}$ = zero

Dados dos tempos perdidos no início e aproveitados no final:

Tempo perdido no início do movimento A - $T_{pi,A}$ = 1 s
Tempo aproveitado no final do movimento A - $T_{af,A}$ = 2 s
Tempo perdido no início do movimento B - $T_{pi,B}$ = 3 s
Tempo aproveitado no final do movimento B - $T_{af,B}$ = 1 s

Demonstração do cálculo do tempo de ciclo mínimo

Vamos raciocinar tomando por base o intervalo de uma hora. Neste tempo, existem 2500 veículos do movimento A que querem passar pelo semáforo. Como este movimento tem fluxo de saturação de 5000 veículos, basta que seu verde fique aceso durante 50% do tempo de uma hora, ou seja 1800 segundos, para que todos os veículos possam ser atendidos. Percebemos então que o tempo de verde de A não pode ser menor do que (F_A/FS_A) * 1 hora o que também pode ser escrito como y_A * 1 hora.

Analogamente, podemos dizer que ao movimento B precisa ser reservado um pedaço da hora igual a y_B * 1 hora, que corresponde a 1050/3500, ou seja, 30% da hora considerada, ou 1080 segundos..

Precisamos, então, dentro do intervalo de uma hora que tomamos por base, reservar uma parte para o movimento A (pelo menos y_A * 1 hora) e outra para o movimento B (pelo menos y_B * 1 hora).

Existe, entretanto, outra parcela que precisa ser atendida. Como já vimos anteriormente, em cada ciclo existe um período, denominado tempo morto (T_{morto}), onde o aproveitamento, para efeito de escoamento de veículos, é nulo. É como se, a cada ciclo, tivéssemos de pagar um tributo de valor fixo. Quanto menor for o tempo de ciclo, mais vezes ele ocorrerá durante o intervalo base da hora considerada, e mais vezes teremos de pagar este tributo. Podemos calcular o tempo que não é aproveitado durante a hora-referência através da expressão (1 hora/T_{ciclo}) * T_{morto}, ou seja, o produto do número de ciclos que existe na hora pelo tempo morto despendido a cada ciclo.

Na Figura 5 está representado o intervalo de uma hora que estamos tomando como base, bem como as parcelas que temos de reservar para atender ao movimento A, ao movimento B e ao tempo morto. Caso a soma destas parcelas seja menor do que a hora inteira ainda teremos uma quarta parcela que configura a sobra existente.

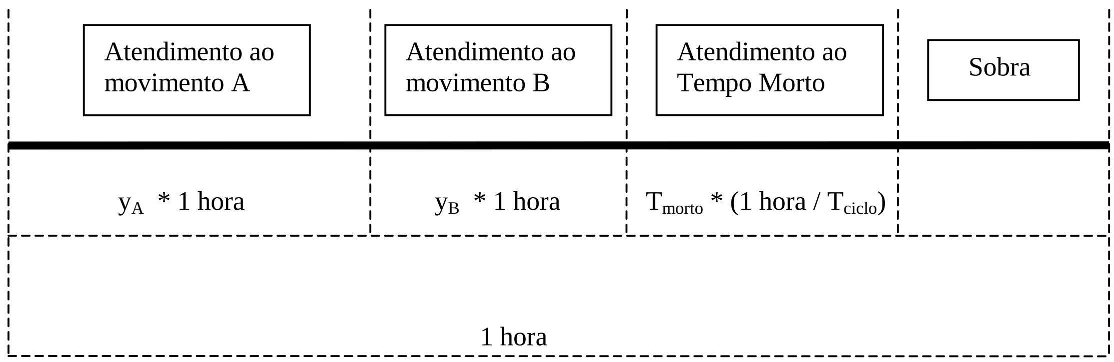


Figura 5

Fica patente, portanto, que a soma das três primeiras parcelas deve caber dentro do período de uma hora; caso contrário, ou o movimento A, ou o movimento B ou o tempo morto não poderão ser atendidos.

A situação limite ocorre quando a soma das três parcelas é exatamente igual à hora inteira. Notamos que a parcela reservada para o escoamento dos veículos é fixa e depende apenas das características do local (fluxo e fluxo de saturação); independe, portanto, da programação. Entretanto, a parcela dedicada ao tempo morto varia em função do tempo de ciclo adotado. Quanto menor o tempo de ciclo, mais vezes ele ocorrerá ao longo da hora considerada e, conseqüentemente, maior será a parcela que temos de destinar à perda de tempo nas transições entre movimentos. O menor tempo de ciclo (denominado $T_{ciclo\ mín}$) será aquele que provocar que a parcela relativa à sobra seja igual a zero. Nesta situação, podemos escrever:

$$y_A * 1\ hora + y_B * 1 hora + \frac{1\ hora}{T_{ciclo\,mín}} * T_{morto} = 1\ hora$$

ou,

$$y_A + y_B + \frac{1}{T_{ciclo\,mín}} * T_{morto} = 1$$

que pode ser escrito como:

$$T_{ciclo\,mín} = \frac{T_{morto}}{1-\left(y_A + y_B\right)}$$

Aplicando a expressão acima ao nosso exemplo, teremos:

y_A = 2500 / 5000 = 0,5
y_B = 1050 / 3500 = 0,3
T_{morto} = (4+0+3-2) + (3+0+1-1) = 8 s

$$T_{ciclo\,mín} = \frac{8}{1-\left(0{,}5+0{,}3\right)} = 40\ s$$

O menor tempo de ciclo que poderá ser aplicado a este semáforo mede, portanto, 40 segundos.

A expressão do tempo de ciclo foi deduzida para o exemplo em que existem apenas dois movimentos críticos. Podemos estender o raciocínio para um caso genérico em que existam *n* movimentos críticos. Neste caso, a expressão generalizada será:

$$T_{ciclo\,mín} = \frac{T_{morto}}{1-\sum_{i=1}^{n} y_i}$$

em que,

$T_{ciclo\ mín}$ – tempo de ciclo mínimo;

T_{morto} - tempo morto durante o ciclo, que é a parcela do ciclo que não se pode aproveitar para o escoamento dos veículos;

$\sum_{i=1}^{n} y_i$ – *somatório das taxas de ocupação de todos os movimentos críti*cos;

n – número de movimentos críticos.

Tempo de ciclo ótimo

Se o fluxo de veículos fosse perfeitamente uniforme e chegasse numa taxa constante, o melhor seria escolher o tempo de ciclo mínimo, pois quanto menor o tempo de ciclo, menor será a espera dos veículos no semáforo.

Entretanto, dimensionar um movimento para 3600 veículos/h não significa assumir que teremos 1 veículo a cada segundo. Num intervalo de 1 segundo, por exemplo, pode não vir ninguém e, no segundo seguinte para compensar, podem vir dois veículos. A conseqüência de tal aleatoriedade de chegada é que no primeiro segundo o verde ficará ocioso enquanto que no segundo seguinte pode acontecer de que o verde não seja suficiente para atender ambos os veículos. Temos, ainda, outra fonte de irregularidade: o volume de trânsito depende de uma série de fatores cujo efeito é praticamente impossível de predizer tais como condições climáticas, eventos, incidentes no sistema viário, etc.

A conseqüência imediata da flutuação do trânsito é que devemos reservar uma parte do ciclo para absorver seus efeitos negativos. Nos reportando à figura 3, a quarta parcela que chamamos de "sobra" ganha, portanto, uma função: a de atender ao fenômeno da aleatoriedade. Quanto maior for a irregularidade da demanda, maior terá de ser a parcela "sobra" que devemos reservar para atendê-la. Um semáforo situado numa área comercial, por exemplo, necessitará de uma parcela de "sobra" maior do que outro numa área residencial, onde o comportamento do trânsito é muito mais previsível.

Concluímos, então, que o ciclo mínimo, sem "sobra", e, portanto, sem nenhuma margem de segurança, é incapaz de enfrentar qualquer desuniformidade do fluxo, por pequena que seja. Mesmo à custa de aumentar o tempo de espera dos veículos no semáforo, somos obrigados a trabalhar com tempos de ciclo bem superiores ao mínimo.

Surge, então, a pergunta básica da programação semafórica: qual é o tempo de ciclo que devemos adotar?

Não é difícil obter a concordância da maioria dos técnicos quando respondemos que o melhor tempo de ciclo será aquele que gerar os menores tempos de espera, considerando não apenas o fluxo médio, mas também a aleatoriedade presente. Mas aí é que vem o xis da questão: como modelar um comportamento tão imprevisível quanto o do trânsito? E sublinhemos que não se trata apenas da irregularidade da demanda, o que já seria por demais complexo. A capacidade de oferta também sofre as conseqüências do caos urbano; obras de emergência, acidentes, veículos quebrados, etc. reduzem drástica e inesperadamente o fluxo de saturação das vias.

O método clássico para enfrentar este problema foi desenvolvido, em 1958, pelo engenheiro de trânsito inglês F. V. Webster e conduz à equação mais conhecida no Brasil para o cálculo do tempo de ciclo:

$$T_{ciclo\,ótimo} = \frac{1{,}5 * T_{morto} + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i}$$

em que,

$T_{ciclo\ ótimo}$ – tempo de ciclo ótimo, ou seja, tempo de ciclo que causa a menor espera no semáforo;

T_{morto} - tempo morto durante o ciclo, que é a parcela do ciclo que não se pode aproveitar para o escoamento dos veículos;

$\sum_{i=1}^{n} y_i$ – *somatório das taxas de ocupação de todos os movimentos críti* cos;

n – número de movimentos críticos.

A equação de Webster, apesar de todo seu classicismo, apresenta uma forte restrição: pressupõe que a chegada dos veículos obedece a uma distribuição randômica ou aleatória. No meio urbano, é muito difícil encontrar um local que tenha tal característica. Estudos feitos em São Paulo mostraram perfis bastante irregulares que atestam a impossibilidade de assumir previamente qualquer distribuição teórica. Tais estudos podem ser lidos no trabalho "Distribuições estatísticas aplicadas ao tráfego" – Ming, Sun Hsien (2001), que pode ser encontrado em www.cetsp.com.br, na seção Notas Técnicas.

O próprio Webster avisa em seu trabalho original: "Pode ser considerado que o trânsito chega randomicamente **desde que** (*grifo nosso*) o ponto de observação esteja a alguma distância de um fator de perturbação como, por exemplo, um semáforo a montante". Podemos ainda apontar outra causa para a não-aleatoriedade. Só poderíamos adotar o modelo randômico, ou aleatório, se os eventos fossem independentes entre si. Isso só é verdade se a quantidade de faixas de tráfego for tão numerosa que os veículos não sofram influência mútua. Sempre que um veículo tiver sua velocidade influenciada por outro veículo, não se pode mais falar em processo randômico.

Parece que voltamos ao ponto inicial. E agora? Uma vez demonstrado que a equação de Webster contém sérias restrições, o que podemos colocar no lugar?

Na verdade não existe resposta corretamente teórica para tal questão simplesmente porque é impossível modelar e predizer o comportamento do trânsito mesmo na sua acepção mais simples de perfil de demanda.

A nossa proposta é que reconheçamos intrepidamente a impossibilidade teórica e passemos a adotar um enfoque que contemple tanto o aspecto conceitual do fenômeno como a nossa vivência prática. Isto pode ser feito se fixarmos, com base na nossa experiência, o grau de saturação com que desejamos trabalhar e, a partir daí, calcularmos o correspondente tempo de ciclo. Este método pode ser consultado com detalhes no artigo “Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação” encontrado neste mesmo site. Em São Paulo, tem-se conseguido bons resultados estabelecendo o valor 0,88 para o grau de saturação. Em todas as redes onde o método foi adotado obteve-se redução significativa no tempo de ciclo.

Como toda a formulação do método pode ser encontrada no artigo citado, vamos apenas apresentar aqui a expressão final que calcula o tempo de ciclo a partir de um valor escolhido para o grau de saturação.

$$T_{ciclo} = \frac{T_{morto}}{1 - \sum_{i=1}^{n} p_i}$$

em que,

T_{ciclo} – tempo de ciclo;

T_{morto} - tempo morto durante o ciclo, que é a parcela do ciclo que não se pode aproveitar para o escoamento dos veículos;

$\sum_{i=1}^{n} p_i$ – *somatório das taxas de ocupação de todos os movimentos críti*cos;

n – número de movimentos críticos.

A fração de verde p_i é calculada através da expressão:

$$p_i = \frac{y_i}{x_i}$$

em que,

y_i – taxa de ocupação do movimento crítico *i*;

x_i – grau de saturação imposto para o movimento crítico *i*.

Vale ressaltar que tanto a expressão de Webster como a do grau de saturação apresentam a mesma estrutura matemática que a equação para cálculo do tempo de ciclo mínimo, pois obedecem à forma geral:

$$T_{ciclo} = \frac{k_1 * T_{morto} + k_2}{1 - \sum_{i=1}^{n} k_{3,i} * y_i}$$

Pelas considerações feitas no item “**Demonstração do cálculo do tempo de ciclo mínimo”**, percebemos que a estrutura matemática de qualquer expressão utilizada deve considerar que o tempo de ciclo é diretamente proporcional ao tempo morto e inversamente proporcional à parcela *(1-y_i)*. O que pode variar entre os diferentes métodos é o valor de k_1, k_2 e $k_{3,i}$.

O rendimento do semáforo em função de seu tempo de ciclo

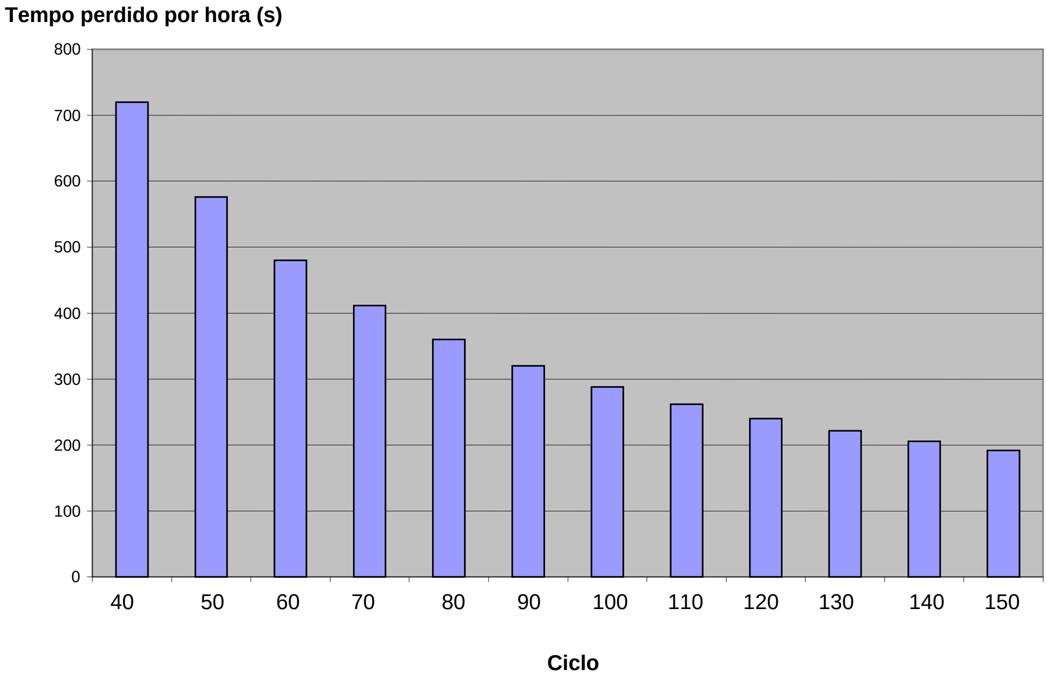
Uma dedução interessante da teoria que vimos até aqui é que tempos de ciclo maiores conseguem fazer passar mais veículos. A explicação é simples. Vamos tomar o período de uma hora como base de raciocínio e comparar o que ocorre, num semáforo, quando se programa um ciclo de 80s ou um de 120s. Digamos que o tempo morto para ambos é igual a 6s. O ciclo de 80 vai ocorrer 45 vezes durante a hora, implicando numa perda de 270 segundos por causa do tempo morto. Já o ciclo de 120 vai acontecer apenas 30 vezes durante a hora, redundando numa perda de 180 segundos. Portanto, se aumentarmos nesse semáforo o tempo de ciclo de 80 para 120 segundos, ganharemos 90 segundos (270 – 180). Os 90 segundos de amarelo foram transformados em verde, permitindo o escoamento de mais veículos! Esta é a razão pela qual locais mais carregados precisam ter ciclos mais altos.

Entretanto, é necessário ir devagar com o andor que o santo é de barro. À medida que vamos entrando na região dos ciclos mais altos, o ganho devido à economia do tempo morto vai se reduzindo cada vez mais. A tabela 1 apresenta o tempo perdido durante a hora para 12 casos de diferentes tempos de ciclos, adotando-se para todos eles o valor de 8 segundos para o tempo morto por ciclo.

Tempo de ciclo (s)	Tempo perdido durante a hora (s)	Ganho em relação ao ciclo anterior (s)
40	720	-
50	576	144
60	480	96
70	411	69
80	360	51
90	320	40
100	288	32
110	262	26
120	240	22
130	222	18
140	206	16
150	192	14

Tabela 1

O comportamento das variáveis da tabela podem ser vistas no Gráfico 1.



O gráfico deixa claro que ganhamos muito em aumentar o tempo de ciclo quando estamos operando com ciclos pequenos, mas que o ganho passa a ser insignificante quando já estamos trabalhando na região de ciclos grandes. Na Tabela 1 constatamos que aumentar o tempo de ciclo de 50 para 60 ocasiona uma economia de 96 segundos de tempo perdido na hora. Entretanto, o mesmo acréscimo de 10 segundos, quando aplicado ao ciclo de 120, somente acarreta o ganho de 18 segundos. Evidentemente, a região onde se tira maior proveito varia em função do tamanho do tempo morto; quanto maior for o tempo morto, mais para a direita se deslocará a região do gráfico onde ainda se obtém ganhos consideráveis. Esta é a razão que explica porque programamos tempos de ciclo mais altos em locais onde transitam muitos caminhões.

É importante ressaltar a tendência da diminuição do ganho para poder combater um costume extremamente daninho. Todo técnico que trabalha com operação semafórica teve, um dia, a satisfação de dissipar um congestionamento simplesmente aumentando o tempo de ciclo. Fez isso sem precisar proibir estacionamento, nem alargar a via, nem promover nenhuma outra intervenção mais drástica! É compreensível que passe a ver o aumento do tempo de ciclo como a panacéia dos congestionamentos e que, quanto pior o congestionamento que encontrar, maior o tempo de ciclo que queira adotar. Entretanto, como acabamos de ver, é um remédio muito pouco eficaz quando já encontramos um tempo de ciclo elevado operando no local.

Elevar o ciclo a níveis extremados só vai servir para aumentar o tempo de espera dos veículos e pedestres, sem trazer nenhuma compensação. Acarreta, ainda, maior chance de ocorrer bloqueios de cruzamentos e de se perder totalmente o controle da situação.

Para coibir este tipo de abuso, define-se um elemento limitador denominado “tempo de ciclo máximo”. É um parâmetro programado nos controladores ou computadores que operam o semáforo e impede que se adotem tempos de ciclo que lhe sejam superiores.

A determinação do tempo de ciclo máximo deve levar em consideração não só o declínio progressivo dos benefícios, mas também fatores comportamentais. As pessoas têm uma expectativa do máximo tempo que vão ter de esperar num sinal vermelho. Se esta fronteira for ultrapassada, a espera levará à irritação e, às vezes, até à conclusão de que o semáforo está quebrado. A fronteira da expectativa varia, é claro, de uma cidade para outra. Em cidades saturadas, a população acaba se resignando a intermináveis esperas e aceita valores que seriam impensáveis em outras.

Propomos que o valor adotado do tempo de ciclo máximo seja de 120 segundos, via de regra. Sugerimos, também, que não se ultrapasse o valor de 180 segundos, mesmo nas situações mais carregadas. Estes valores provêm tão somente da nossa experiência e da observação do trabalho de outros técnicos.

Tempos de verde

Uma vez escolhido o tempo de ciclo, o próximo passo é o de determinar os tempos de verde. Se o tempo de ciclo foi calculado pelo método do grau de saturação, a determinação dos tempos de verde é feita com a utilização direta das equações utilizadas anteriormente.

Relembrando: a fração de verde p_i do movimento crítico *i* foi calculada através da expressão:

$$p_i = \frac{y_i}{x_i}$$

em que,

y_i – taxa de ocupação do movimento crítico *i*;

x_i – grau de saturação fixado para o movimento crítico *i*.

Entretanto, pela sua própria definição, a fração de verde é a razão entre o tempo de verde e o tempo de ciclo. Dessa forma podemos dizer que

$$T_{verde,\,i} = p_i * T_{ciclo}$$

ou seja,

$$T_{verde,\,i} = \frac{y_i}{x_i} * T_{ciclo}$$

O desenvolvimento da sistemática para calcular os tempos de verde e exemplos elucidativos podem ser encontrados no artigo “Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação”, já citado anteriormente.

Quando o tempo de ciclo foi escolhido por qualquer outro método, que não o do grau de saturação, o cálculo dos tempos de verde é realizado através de outro caminho. Vamos a ele.

Adotamos, de início, que o grau de saturação é o mesmo para todos os movimentos críticos. Normalmente impõe-se esta condição porque parece bastante justo que todos os movimentos críticos que chegam num semáforo sejam sujeitos ao mesmo grau de "aperto", mas nada impede que se force uma certa proporcionalidade relativa entre os graus de saturação dos movimentos críticos. A única diferença será que teremos um sistema de equações com mais incógnitas.

Vamos deduzir a expressão dos tempos de verde para um exemplo com apenas dois movimentos críticos (considerando a imposição de idênticos graus de saturação). A inclusão de outros movimentos não afetará conceitualmente a expressão final.

Denominemos os movimentos de A e B. Podemos então escrever:

$x_B = x_A$ ou,

$$\frac{y_B}{p_B} = \frac{y_A}{p_A} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_B}{y_A} = \frac{p_B}{p_A} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A + y_B}{y_A} = \frac{p_A + p_B}{p_A} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A}{y_A + y_B} = \frac{p_A}{p_A + p_B} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A}{y_A + y_B} = \frac{p_A}{\frac{T_{ciclo} - T_{morto}}{T_{ciclo}}} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A}{y_A + y_B} = \frac{p_A * T_{ciclo}}{T_{ciclo} - T_{morto}} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A}{y_A + y_B} = \frac{\frac{T_{verde,A}}{T_{ciclo}} * T_{ciclo}}{T_{ciclo} - T_{morto}} \text{ ou,}$$

$$\frac{y_A}{y_A + y_B} = \frac{T_{verde,A}}{T_{ciclo} - T_{morto}} \text{ ou,}$$

$$T_{verde,A} = \frac{y_A}{y_A + y_B} * (T_{ciclo} - T_{morto})$$

Analogamente, podemos chegar a:

$$T_{verde,B} = \frac{y_B}{y_A + y_B} * (T_{ciclo} - T_{morto})$$

E podemos generalizar o cálculo do tempo de verde para uma situação com qualquer número de movimentos críticos:

$$T_{verde,k} = \frac{y_k}{\sum_{i=1}^{n} y_i} * (T_{ciclo} - T_{morto})$$

em que,

$T_{verde,k}$ - tempo de verde do movimento *k*;

y_k - taxa de ocupação do movimento *k*;

$\sum_{i=1}^{n} y_i$ - somatório das taxas de ocupação de todos os movimentos críticos;

n – número de movimentos críticos;

T_{ciclo} - tempo de ciclo;

T_{morto} - tempo morto.

Para melhor fixação, vamos inserir um exemplo aplicativo, considerando um semáforo que comporta três movimentos críticos: A, B e C, que apresentam as seguintes características:

Dados dos fluxos:

F_A = 2000 veíc-eq/h
F_B = 870 veíc-eq/h
F_C = 330 veíc-eq/h

Dados dos fluxos de saturação:

FS_A = 5000 veíc-eq/h
FS_B = 3000 veíc-eq/h
FS_C = 3000 veíc-eq/h

Dados dos entreverdes:

Tempo de amarelo ao fim do verde do movimento A - $T_{am,A}$ = 4 s
Tempo de vermelho de limpeza ao fim do movimento A – $T_{vl,A}$ = zero
Tempo de amarelo ao fim do verde do movimento B - $T_{am,A}$ = 3 s
Tempo de vermelho de limpeza ao fim do movimento B – $T_{vl,B}$ = zero
Tempo de amarelo ao fim do verde do movimento C - $T_{am,A}$ = 4 s
Tempo de vermelho de limpeza ao fim do movimento C – $T_{vl,A}$ = 1 s

Dados dos tempos perdidos no início e aproveitados no final:

Vamos supor que, para cada movimento crítico, os tempos perdidos no início e aproveitados no final são iguais e, portanto, se anulam reciprocamente.

Tempo de ciclo:

Vamos supor que o semáforo em questão tem de ser programado com ciclo de 120 segundos, pois faz parte de uma rede coordenada de semáforos que opera com este tempo.

Solução:

Cálculo do Tempo Morto:

T_{morto} = (4 + 3 + 4 + 1) = 12 s

Cálculo das Taxas de Ocupação:

$$y_A = \frac{2000}{5000} = 0{,}40$$

$$y_B = \frac{870}{3000} = 0{,}29$$

$$y_C = \frac{330}{3000} = 0{,}11$$

$$\sum_{i=1}^{3} y_i = (0{,}40 + 0{,}29 + 0{,}11) = 0{,}80$$

$$T_{verde,1} = \frac{0{,}40}{0{,}80} * (120 - 12) = 54\ s$$

$$T_{verde,2} = \frac{0{,}29}{0{,}80} * (120 - 12) = 39\ s$$

$$T_{verde,3} = \frac{0{,}11}{0{,}80} * (120 - 12) = 15\ s$$

Comprovação da soma dos tempos:

54 + 39 + 15 + 12 = 120 s

Comprovação de que os três movimentos trabalham com o mesmo grau de saturação:

Lembrando que:

$$x_i = \frac{y_i}{p_i}$$

e que:

$$p_i = \frac{T_{verde,\ i}}{T_{ciclo}}$$

temos que:

$$x_A = \frac{0{,}40}{\frac{54}{120}} = \frac{0{,}40}{0{,}45} = 0{,}89$$

$$x_B = \frac{0{,}29}{\frac{39}{120}} = \frac{0{,}29}{0{,}325} = 0{,}89$$

$$x_C = \frac{0{,}11}{\frac{15}{120}} = \frac{0{,}11}{0{,}125} = 0{,}88$$

Chegamos, pois, ao mesmo grau de saturação para os três movimentos. A pequena diferença encontrada para o movimento C deve-se ao arredondamento no cálculo dos tempos de verde.

Verde de segurança

Ocorre um caso especial quando o método conduz a um tempo de verde muito pequeno para um dos movimentos. Neste caso, deve-se adotar um valor denominado "tempo de verde de segurança" que representa o menor valor de verde aceitável para um determinado movimento e que é dimensionado em função de aspectos de segurança.

No nosso último exemplo chegamos ao valor de 15 segundos para o movimento C. Se o seu verde de segurança fosse 20 segundos, este valor teria de ser imposto e o verde de A e de B deveriam ser recalculados.

O artigo "Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação", já citado acima, explicita a forma de tratar esta questão.

Glossário

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 movimento é a quantidade de veículos que atravessam a faixa de retenção, 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 movimento 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 movimento é a razão entre o tempo de verde deste movimento 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 movimento é o índice que representa o nível de saturação em que ele 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

taxa de ocupação – taxa de ocupação de um movimento 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

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