

NT 204/98

Realimentação

Engº Sun Hsien Ming

1. Introdução

Dando continuidade à divulgação dos conceitos e recursos do sistema SCOOT, o presente trabalho pretende abordar o processo de realimentação.

A realimentação está vinculada à existência de estágios dependentes da demanda como, por exemplo, os estágios de pedestres acionados por botoeiras. Um estágio dependente de demanda pode ocorrer ou não dentro do ciclo, dependendo se houver ou não a demanda por ele. Em princípio, se o estágio não ocorrer dentro do ciclo, o tempo destinado a esse estágio poderá ser redistribuído para os demais estágios ou então o próprio ciclo poderá ser encurtado deste tempo.

Ou, ainda, poderá haver uma solução intermediária em que uma parte desse tempo é utilizada para encurtar o ciclo e o restante é redistribuído entre os demais estágios.

A realimentação no sistema SCOOT consiste no processo de como o sistema trata o tempo de ciclo e as durações de verde dos estágios se o estágio dependente de demanda não ocorrer. Chama-se realimentação porque o sistema é realimentado com a informação, enviada pelo controlador, da ocorrência ou não do estágio dependente da demanda.

Como nos trabalhos apresentados nas NTs 201 e 203, essa descrição é baseada no SCOOT do sistema TMS fornecido pela *Peek Traffic Ltd.*, implantado nas CTA's 2 e 5.

O assunto é de relevante importância, pois é muito frequente a utilização de estágios de pedestres demandados por botoeiras. Neste trabalho, restringir-se-á a discussão aos estágios de pedestres demandados por botoeiras, uma vez que a maioria absoluta dos estágios dependentes de demanda configurado nos cruzamentos semaforizados são estágios de pedestres demandados por botoeiras.

2. Estágio de pedestres e o tempo de ciclo

O tempo de ciclo de um cruzamento semaforizado deve ser aumentado quando é configurado um estágio de pedestres. Entretanto, é errôneo o raciocínio simplista de que o ciclo só aumenta na exata medida da duração do estágio de pedestres, isto é, se o ciclo sem o estágio de pedestres for de 70 segundos e o estágio de pedestres for de 12 segundos (incluindo o entreverdes de pedestres), então o novo ciclo (com o estágio de pedestres) seria de 82 segundos. Na verdade, o ciclo com o estágio de pedestres deve ser muito maior que 82, como se verá logo adiante.

Para se obter o novo ciclo (com o estágio de pedestres), não se pode simplesmente somar o tempo do estágio de pedestres ao tempo de ciclo sem o estágio de pedestres, pois isso mudaria a proporção de verde dos estágios veiculares.

De fato, supondo 2 estágios veiculares com 32 segundos de verde e ciclo de 70 segundos, as proporções de verde dos dois estágios, sem o estágio de pedestres, são:

$$p_1 = p_2 = \frac{32}{70} = 0,457$$

Se simplesmente somarmos a duração do estágio de pedestres de 12 segundos ao ciclo, obter-se-ia um ciclo de 82 segundos e as novas proporções de verde seriam:

$$p_1' = p_2' = \frac{32}{82} = 0,390$$

Isso causará sobressaturações, pois os tempos de verde serão insuficientes. Assim, deve-se aumentar também os tempos de verde dos estágios veiculares quando se introduz um estágio de pedestres.

Se as proporções de verde forem mantidas com o estágio de pedestres e supondo um total de entreverdes dos estágios veiculares de 6 segundos, tem-se:

$$0,457 + 0,457 + \frac{6 + 12}{C} = 1$$

onde C é o novo ciclo com o estágio de pedestres.

Logo:

$$C = \frac{6 + 12}{1 - 0,457 - 0,457} = 209$$

Portanto, para manter as mesmas proporções de verde, por causa de um estágio de pedestres de 12 segundos, o ciclo teria que passar para 209, um aumento de 199% em relação ao ciclo anterior de 70 segundos.

Na realidade, o tempo do estágio de pedestres entra no cálculo do ciclo como tempo morto (pois é um tempo em que não anda nenhum veículo). O tempo de ciclo é função do tempo morto. Quanto maior o tempo morto, maior deverá ser o ciclo. Como o tempo de estágio de pedestres faz parte do tempo morto, o ciclo será maior quando houver estágio de pedestres.

Segundo Webster, o ciclo ótimo (ciclo em que ocorre o menor atraso) é calculado pela expressão:

$$C_{ot} = \frac{1,5T_m + 5}{1 - y}$$

onde

T_m = tempo morto

y = soma das taxas de ocupação de cada estágio

Supondo que, no nosso exemplo, o ciclo (sem o estágio de pedestres) de 70 segundos seja o ciclo ótimo, então a taxa de ocupação y é:

$$y = \frac{70 - 1,5 \times 6 - 5}{70} = 0,80$$

O ciclo ótimo para o mesmo cruzamento, com o estágio de pedestres de 12 segundos de duração (incluindo o seu entreverdes), passa a ser:

$$C_{ot} = \frac{1,5 \times 18 + 5}{1 - 0,8} = 160$$

Verifica-se que o ciclo ótimo, com o estágio de pedestres, sofreu um aumento de 129%.

Deve-se atentar para o fato de o ciclo de uma rede semaforica ser aumentado significativamente devido a um estágio de pedestres configurado num cruzamento crítico da rede.

Nesse novo ciclo de 160 segundos, as proporções de verde seriam:

$$p_1 = p_2 = \frac{160 - 18}{2 \times 160} = 0,444$$

3. Estágios dependentes de demanda em programações de tempos fixos

Numa programação de tempos fixos, o tempo de ciclo é invariável durante todo o período de vigência do plano semaforico. Portanto, não importa se o estágio dependente da demanda tenha ocorrido ou não, o tempo de ciclo será sempre o mesmo. No caso de não ocorrer o estágio dependente da demanda, o tempo desse estágio será redistribuído entre os demais estágios.

Conforme já dito anteriormente, a discussão será restrita a estágios de pedestres acionados por botoeiras.

Em princípio, pode haver três alternativas para o cálculo do tempo de ciclo num cruzamento onde esteja configurado um estágio de pedestres demandado por botoeira.

- a) Adotar o tempo de ciclo considerando-se que o estágio de pedestres nunca ocorre.
- b) Adotar o tempo de ciclo considerando-se que o estágio de pedestres ocorre em todos os ciclos.
- c) Adotar um tempo de ciclo intermediário entre os tempos de ciclo das alternativas “a” e “b” acima.

Para uma programação de tempos fixos, a alternativa mais recomendada é a “b”, pois, assumindo que o estágio de pedestres ocorre em todos os ciclos, estarão garantidos os tempos necessários para todos os movimentos, evitando assim situações de sobressaturações.

Em sistemas de tempo fixo, quando for adotada a Alternativa “b”, existe o problema de como redistribuir o tempo do estágio de pedestres no caso de o mesmo não ocorrer. É possível projetar o controlador para uma das seguintes situações:

- O tempo do estágio de pedestres que não ocorreu é incorporado ao estágio seguinte.
- Configurar no controlador para qual estágio irá o tempo do estágio de pedestres que não tiver ocorrido.
- Configurar no controlador uma proporção do tempo do estágio de pedestres que não tiver ocorrido para cada estágio veicular (por exemplo, se houver dois estágios veiculares, 50% para o estágio 1 e 50% para o estágio 2).

Um possível método para a determinação de um ciclo intermediário (Alternativa “c”) (para planos de tempo fixo) é a pesquisa em campo da frequência de ocorrência do estágio de pedestres no período de vigência do plano.

Assim, se o estágio de pedestres não ocorrer em nenhum ciclo durante o período (0%), o tempo do ciclo deverá ser aquele dado pela alternativa “a”; se ocorrer em 100% dos ciclos, deverá ser aquele dado pela alternativa “b”.

Designando-se por:

C_a = tempo de ciclo dado pela alternativa “a” (o estágio de pedestres não ocorre em nenhum ciclo)

C_b = o tempo de ciclo dado pela alternativa “b” (o estágio de pedestres ocorre em todos os ciclos)

C = o tempo de ciclo intermediário a ser determinado

f = a frequência de ocorrência do estágio de pedestres no período considerado (pesquisado em campo no período de vigência do plano)

O tempo de ciclo intermediário pode ser determinado pela proporção:

$$\frac{C_b - C}{C_b - C_a} = \frac{100 - f}{100}$$

No exemplo dado no item 2 acima, supondo uma frequência de ocorrência do estágio de pedestres de $f = 60\%$, tem-se que o ciclo intermediário seria:

$$\frac{160 - C}{160 - 70} = \frac{100 - 60}{100}$$

resultando que $C = 124$.

As vantagens e desvantagens de cada alternativa estão enumeradas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1

ALTERNATIVA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alternativa “a”	Menor ciclo	Sobressaturação toda vez que ocorrer o estágio de pedestres.
Alternativa “b”	Não há sobressaturação	Ciclo maior do que o necessário para situações de baixa frequência de ocorrência do estágio de pedestres.
Alternativa “c”	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo menor que o da Alternativa “b” • Sobressaturação menor que a da Alternativa “a” 	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo maior que o da Alternativa “a”. • Sujeito a sobressaturações.

4. Estágios dependentes de demanda em sistemas de controle em tempo real

Num sistema de controle em tempo real, a alternativa ideal deve ser a “c”, pois o sistema deve ter condições de saber se o estágio dependente de demanda ocorreu ou não, e a partir daí, ir corrigindo o ciclo em função da maior ou menor frequência de ocorrência do estágio dependente de demanda, evitando assim riscos de sobressaturação bem como a ocorrência de ciclos desnecessariamente altos.

Quando o estágio não ocorre em nenhum ciclo, o sistema deverá implementar um tempo de ciclo igual ao da Alternativa “a”.

Quando o estágio dependente de demanda ocorrer em todos os ciclos, o tempo de ciclo implementado pelo sistema deverá ser igual ao da Alternativa “b”.

5. Estágio de pedestres demandado por botoeira no sistema SCOOT

A descrição feita a seguir é baseada no documento CTAB-CC/MN003-B-SCOOT 3.1 – Guia Operacional, elaborado por Carlos A. Roque e entregue pelo consórcio MASP como parte da documentação técnica do sistema.

Até a versão 2.3 do SCOOT, o sistema não possuía o recurso da realimentação, isto é, não havia como o sistema saber se o estágio dependente da demanda ocorreu ou não. Para evitar sobressaturações, o tempo de ciclo era calculado considerando que o estágio ocorresse em todos os ciclos. Com isso, nos cruzamentos e/ou nos períodos em que houvesse uma baixa frequência de ocorrência de estágio dependente de demanda, o ciclo era mantido desnecessariamente alto, prejudicando eventualmente também todos os semáforos da rede. A partir da versão 2.4, o SCOOT ganhou um importante aperfeiçoamento: o recurso de realimentação.

A realimentação tem o objetivo de informar o sistema se o estágio dependente de demanda ocorreu ou não, de forma a permitir que o sistema corrija o ciclo, redistribua o tempo do estágio não ocorrido e ajuste o modelo de tráfego (sobre o modelo de tráfego SCOOT, ver os itens 5 e 7 da NT 201).

6. Correção do ciclo

Existem no sistema três parâmetros que permitem configurar a realimentação com relação à correção do ciclo.

- **GSMO** – Fator de Suavização do Tempo de Verde Extra (*Extra Green Time Smoothing Factor*) – 1% a 100% em passos de 1% (valor *default* = 90%).
- **CLAM** – Valor "*Lambda*" para Otimizador de Ciclo (*Cycle Optimizer Lambda Value*) – 0% a 100% em passos de 1% (valor *default* = 100%).
- **CYIF** – Inibidor da Realimentação para o Otimizador do Ciclo (*Cycle Time Optimizer Feedback Inhibit Status*) – ON (inibe a realimentação) / OFF (utiliza a realimentação) – (valor *default* = OFF).

Chama-se "tempo de verde extra" o tempo disponível do ciclo devido à não ocorrência do estágio dependente de demanda. Se o estágio dependente de demanda tiver ocorrido no ciclo, o tempo de verde extra nesse ciclo será 0 (zero). O tempo de verde extra é calculado pelo sistema no final de cada ciclo.

O tempo de verde extra é suavizado pelo parâmetro GSMO. Dessa forma, o sistema trabalha com dois parâmetros:

- Tempo de verde extra
- Tempo de verde extra suavizado

O tempo de verde extra é suavizado pelo GSMO da seguinte forma:

Seja Tv_a o tempo de verde extra do ciclo anterior e Tv_c o tempo de verde extra do ciclo corrente. Então, o tempo de verde extra suavizado, Tv_s , do ciclo corrente é calculado pela expressão:

$$Tv_s = GSMO \times Tv_c + (1 - GSMO) \times Tv_a$$

Por exemplo, seja $GSMO = 0,9$ e um estágio dependente de demanda de 10 segundos.

A Tabela 2 mostra os valores de tempo de verde extra e o tempo de verde extra suavizado:

Tabela 2

Ciclo	Ocorreu estágio dependente de demanda?	Tempo verde extra	Tempo verde extra suavizado
1	Não	10	9
2	Não	10	10
3	Não	10	10
4	Não	10	10
5	Sim	0	1
6	Sim	0	0
7	Sim	0	0
8	Sim	0	0
9	Não	10	9
10	Sim	0	1
11	Não	10	9
12	Sim	0	1

O parâmetro **CLAM** é um valor percentual que determina a proporção da realimentação a ser utilizada pelo sistema.

Se **CLAM = 0%**, o sistema não utilizará a realimentação para efeito de correção do ciclo. Isto significa que, no cálculo do ciclo, o valor do tempo de verde extra suavizado não será considerado. O ciclo será tal como se o estágio dependente de demanda tivesse ocorrido em todos os ciclos.

Se **CLAM = 100%**, o sistema utilizará 100% da realimentação. Isto significa que no cálculo do ciclo o tempo morto será diminuído de 100% do valor do tempo de verde extra suavizado. Isto quer dizer que na expressão do Ciclo Ideal do Nó – INCT (ver item 8.3 da NT 201), o valor do tempo morto, LT, será diminuído de 100% do tempo de verde extra suavizado¹.

Valores intermediários de **CLAM** significarão que apenas parte do tempo de verde extra suavizado será descontado do tempo morto. Por exemplo, se **CLAM = 50%**, então será descontado do tempo morto um valor equivalente a 50% do valor do tempo de verde extra suavizado.

¹ No SCOOT, o tempo morto é designado por "Tempo Fixo Cíclico" (*Cycle Fixed Time*) e engloba, além de entreverdes, a duração dos estágios dependentes de demanda bem como a dos estágios de tempo fixo.

O parâmetro **CYIF** permite inibir o uso da realimentação pelo otimizador de ciclo.

CYIF = OFF significa que o sistema utilizará a realimentação na otimização do ciclo.

O valor **ON** significa que a realimentação será inibida e o sistema não a utilizará na otimização do ciclo. Neste caso, será assumido que o estágio dependente de demanda ocorre em todos os ciclos.

Os valores dos três parâmetros: **GSMO**, **CLAM** e **CYIF**, são definidos para todo sistema.

7. Redistribuição do verde e ajuste do modelo de tráfego

Existem no sistema dois parâmetros que permitem configurar a realimentação no tocante à redistribuição do tempo de verde para os demais estágios. São eles:

- **SFIN** – inibidor da realimentação para o *Split* (*Split Feedback Inhibit Status*) – ON (inibe a realimentação) / OFF (utiliza a realimentação) – (valor *default* = OFF).
- **SLAM** – valor “lambda” para o otimizador de *Split* (*Split Optimiser Lambda Value*) – 0% a 100% em passos de 1% (valor *default* = 100%).

O parâmetro **SFIN** permite inibir o uso da realimentação para efeitos de otimização do *Split*. O valor **OFF** fará com que o sistema utilize a realimentação, enquanto que **ON** significará que o sistema não levará em conta a realimentação. Esse parâmetro é definido para cada nó.

O parâmetro **SLAM** determina a porcentagem da realimentação que o sistema utilizará para o cálculo do *Split*.

Um valor de 0% para SLAM significará que o sistema utilizará 0% da realimentação, isto é, a realimentação não será levada em conta na determinação do *Split*. O *Split* de cada estágio é calculado como se o estágio dependente de demanda ocorresse em todos os ciclos. O efeito prático disto é que o tempo de verde do estágio dependente de demanda, se o mesmo não ocorrer, fica apenas para o estágio seguinte (definido na sequência de estágios do plano vigente), não sendo redistribuído entre os demais estágios.

Um valor de 100% para SLAM significará que o sistema utilizará 100% da realimentação. Vale dizer que o otimizador de *Split* utilizará 100% do tempo de verde suavizado para redistribuir entre os estágios. É claro que se o tempo de verde extra suavizado for 0, não haverá nada para redistribuir.

A redistribuição desse tempo é feita através das sucessivas decisões de avanço e retardo do otimizador de *Split* (ver item 8.1 da NT 201).

Valores intermediários de SLAM significará que o sistema utilizará apenas parte do tempo de verde extra suavizado para redistribuir entre os demais estágios. A quantidade do tempo de verde extra suavizado a ser distribuído entre os demais estágios é determinada pelo valor de SLAM. Se SLAM = 50%, será redistribuído 50% do tempo de verde extra suavizado.

O valor de SLAM é definido para todo o sistema.

No tocante ao ajuste do modelo de tráfego do SCOOT devido à realimentação, o sistema dispõe do seguinte parâmetro:

- **MFIN** – inibidor da realimentação para o Modelo de tráfego (*Model Feedback Inhibit Status*) – ON (inibe a realimentação) / OFF (utiliza a realimentação) – (valor *default* = OFF).

Se MFIN = OFF, o modelo de tráfego SCOOT utilizará a realimentação. Isso quer dizer que o modelo irá descarregar a fila ou não, conforme o estágio dependente de demanda ocorra ou não. Assim, se o estágio de pedestres não ocorrer, o modelo descarregará fila do estágio que estiver com o direito de passagem. Se o estágio de pedestres ocorrer, o modelo não descarregará fila.

Se MFIN = ON, o modelo não levará em conta a realimentação. O modelo assumirá que o estágio dependente de demanda ocorrerá em todos os ciclos. Isto quer dizer que, mesmo que o estágio de pedestres não ocorra, o modelo não descarregará fila enquanto perdurar o tempo que seria destinado ao estágio de pedestres. Dessa forma, as filas modeladas tenderão a ser maiores do que as filas reais. Quanto menor é a frequência da ocorrência do estágio de pedestres, maior será a discrepância entre a fila modelada e a fila real.

Se por algum motivo, for imperioso inibir a realimentação para o modelo (MFIN = ON), então seria recomendável ajustar o modelo de forma a compensar a fila a mais que o modelo deixou de descarregar durante um ciclo em que não tenha ocorrido estágio de pedestres.

O melhor meio de se fazer este ajuste é por meio do parâmetro **End Lag**, que é o que mede a diferença entre o verde efetivo (tempo em que há escoamento de veículos) e o tempo de verde de foco².

Normalmente, o verde efetivo é um pouco maior que o verde de foco, pois, mesmo após o final do verde de foco, podem passar, ainda, alguns veículos. Assim, a fila é descarregada durante o verde efetivo e não durante o verde de foco. Dessa forma, é possível aumentar o valor do *End Lag* para compensar o aumento extra da fila modelada.

Para tanto, é necessário conhecer a média de ocorrência do estágio dependente de demanda. Por exemplo, seja 50% a média de ocorrência do estágio dependente de demanda no período considerado, cuja duração é de 12 segundos. Então, seria acrescentado 6 segundos ao valor normal do *End Lag* do link.

Dessa forma, o modelo descarregaria a fila por mais 6 segundos para compensar as filas que deixou de descarregar em todos os ciclos em que o estágio dependente de demanda não ocorreu.

Como se trata de um ajuste por média histórica (mesmo porque essa média pode variar de um dia para outro e de um horário para outro) o resultado não é tão preciso como quando se usa a realimentação.

O parâmetro MFIN é definido por nó:

8. Conclusão

Nas CTA's 2 e 5, os valores adotados para os 6 parâmetros de realimentação existentes no sistema são os valores *default*, não tendo sido observado nenhum problema na utilização desses valores. Entretanto, para uma melhor avaliação da eficiência do sistema, mister se faz a realização de pesquisas específicas com essa finalidade. Pode-se também desenvolver trabalhos com o intuito de verificar se outras combinações de valores dos parâmetros de realimentação dariam melhores resultados para situações ou locais específicos.

Autoria: Eng^{os}: Sun Hsien Ming
Sistemas de Controle de Tráfego – GSC

² Verde efetivo = verde de foco + *End Lag* – *Start Lag*

O *Start Lag* é o período do tempo em que, após o início do verde de foco, ainda não existe escoamento de veículos.