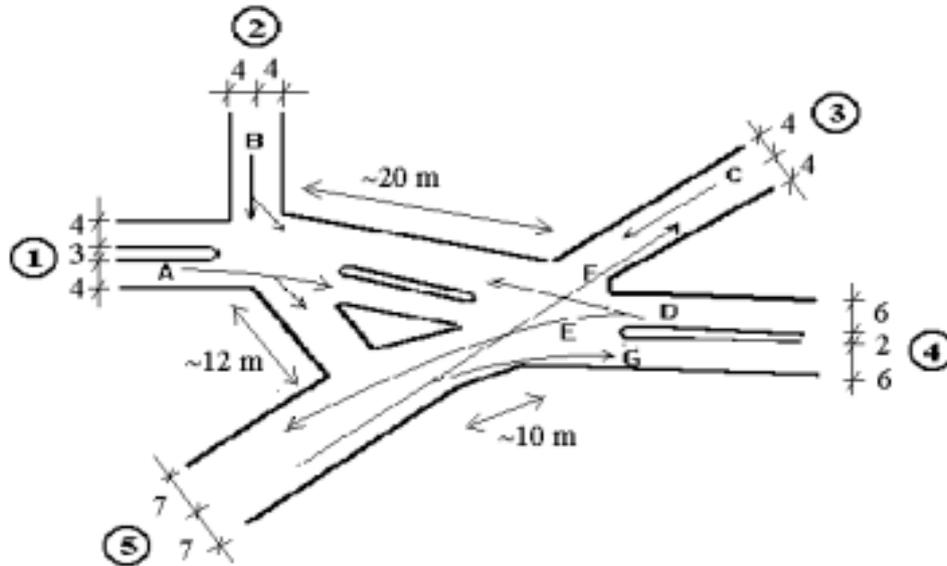


## EXERCÍCIO: INTERSEÇÃO DECOMPOSTA



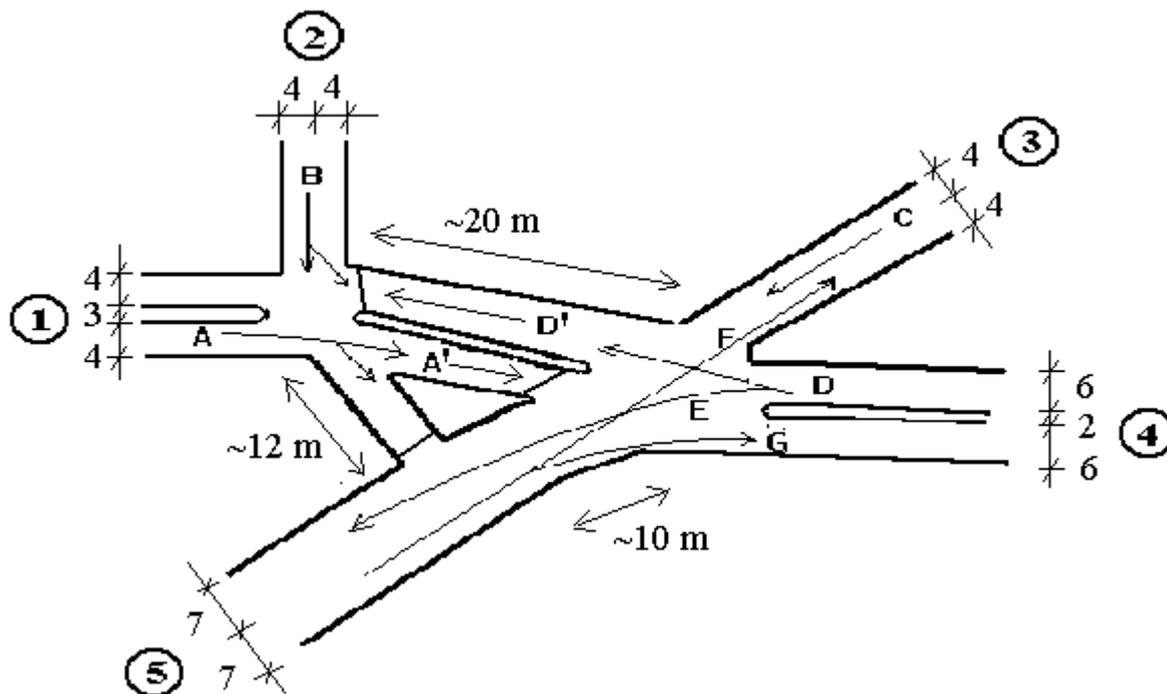
Dada a interseção acima, onde foram realizadas as seguintes medidas:

movimentos principais	volume observado	fluxo de saturação
A	640	3200
B	160	1600
C	300	3000
D	900	3000
E	150	1500
F	225	1500
G	640	1600

- (a) propor um plano de operação decomposição da interseção;
- (b) dimensionar o semáforo com o plano de operação (admitir  $I_a=4$  seg e  $I_v=2$ seg);
- (c) analisar o impacto da decomposição (capacidade e atraso).

## SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO:

(a) a opção natural de decomposição da interseção considerada é a criação de linha de retenção intermediárias junto ao canteiro da via AD, conforme o esquema seguinte:

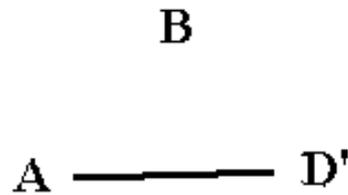


Note que a conversão à direita para via CF ao lado da ilha triangular também tem uma linha de retenção específica. Entretanto, esta interseção secundária poderá normalmente operar sem semáforos.

Na via AD, a semaforização pode ter de ser mantida em ambos os casos. Esta será a situação admitida na análise a seguir. A entrada vinda de B tem um movimento de conversão à esquerda importante e o cruzamento de A'D com CF tem fluxos altos. A semaforização seria provável especialmente se o canteiro central for estreito ou existirem problemas específicos de segurança (como visibilidade restrita).

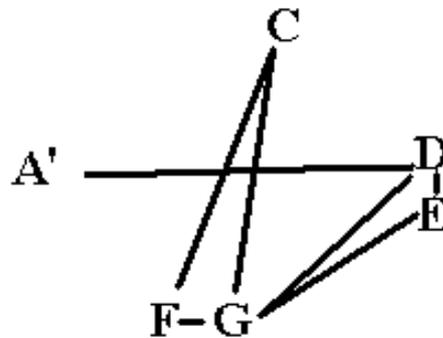
Note que a decomposição também permite reduzir os tempos utilizados nos entreverdes, dado que a passagem dos movimentos mais extensos (A, B e D) agora pode ser feita em etapas (atravessando as duas linhas de retenção sem parada apenas se a indicação luminosa for verde nos cruzamentos adjacentes).

Analisando os movimentos principais na entrada de B, tem-se:



que justifica um plano tradicional de 2 estágios.

Analisando os movimentos principais no cruzamento de A'D e CF tem-se:



Pode-se verificar que as combinações possíveis de movimentos simultâneos são:

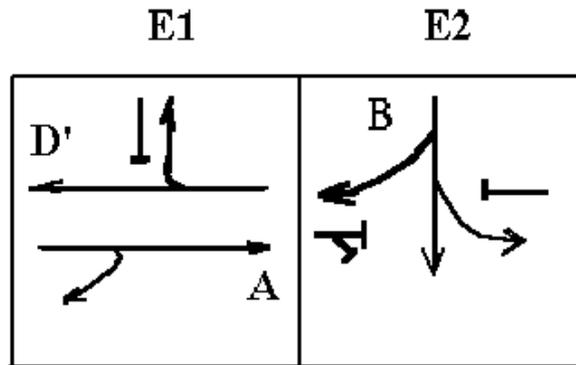
- A' - D
- C - F - G
- D - E - G

onde D e G podem operar em 2 estágios. Um plano semaforico usual com estágio específico para conversão à esquerda na via AD é, portanto, necessário.

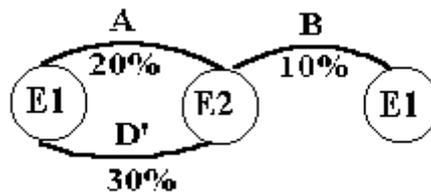
Em função da proximidade das linhas de retenção, a necessidade de coordenação semaforica é importante e torna conveniente sincronizar A-D' no cruzamento com B com A'-D no cruzamento com CF. Isto impõe a necessidade de um mesmo ciclo semaforico e de defasagens e tempos de verde adequados e a priorização de um dos sentidos de tráfego na via A-D (sem ignorar os demais fluxos).

Será admitido que as demandas e os fluxos de saturação são os mesmos em A e A' ou D e D' (o que equivale a admitir que as conversões à direita são desprezíveis ou compensam-se entre si e que as conversões à esquerda de E e à direita de G tem faixas exclusivas de conversão que não se prolongam adiante). Com os tempos de entreverdes fornecidos (adotados para todas as mudanças de estágio), os tempos perdidos serão estimados em 5 segundos por mudança de estágio. Estas suposições permitem dimensionar cada semáforo em separado e em conjunto.

O plano semafórico adotado para operar a entrada de B é



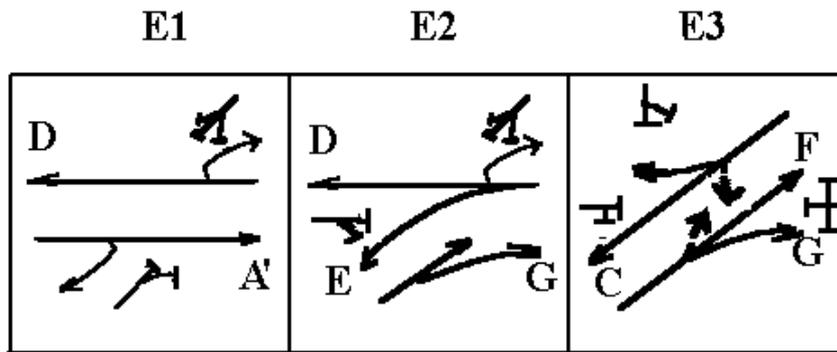
e o diagrama de movimento correspondente é



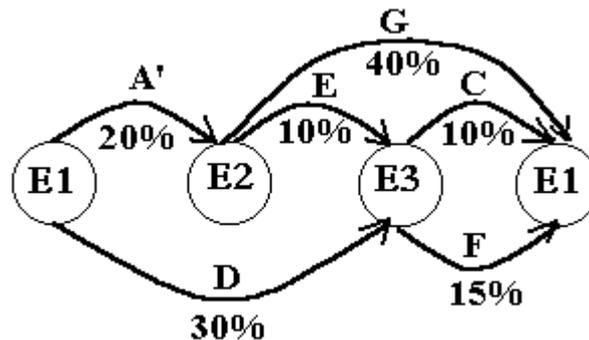
sendo, portanto, o tempo de ciclo recomendado de  $t_c = \frac{1,5 \cdot 10 + 5}{1 - 0,40} = 33\text{seg}$  para operação independente da entrada de B.

Entretanto, este provavelmente não é o cruzamento crítico da interseção complexa e terá de operar no tempo de ciclo determinado pelo outro cruzamento. Por este motivo, o dimensionamento dos tempos de verde será feito adiante.

O plano semafórico adotado para operar o cruzamento com CF é



e o diagrama de movimento correspondente é



sendo, portanto, o tempo de ciclo recomendado definido pelo maior entre o determinado pela seqüência A'G, que seria  $t_c = \frac{1,5 \cdot 10 + 5}{1 - 0,60} = 50 \text{seg}$ , ou pela seqüência

A'EF, que seria  $t_c = \frac{1,5 \cdot 15 + 5}{1 - 0,45} = 50 \text{seg}$ .

Portanto, ambos os semáforos devem operar com o tempo de ciclo de 50 segundos determinado pelo segundo cruzamento (que é mais crítico). Embora este tempo de ciclo aumente o atraso para o primeiro cruzamento, em relação ao funcionamento independente isolado, o valor corresponde a metade do tempo de ciclo ótimo requerido pela interseção complexa sem decomposição.

A repartição proporcional de verde levaria aos tempos seguintes:

- no primeiro cruzamento:

$$E1: g_{ef1} = \frac{0,30}{0,40} \cdot (50 - 10) = 30 \text{seg} \text{ e } g_1 = 29 \text{seg} \text{ para A e D'}$$

$$E2: g_{ef2} = \frac{0,10}{0,40} \cdot (50 - 10) = 10 \text{seg} \text{ e } g_2 = 9 \text{seg} \text{ para B}$$

- no segundo cruzamento:

$$E1: g_{ef1} = \frac{0,20}{0,60} \cdot (50 - 10) = 13 \text{seg} \text{ e } g_1 = 12 \text{seg} \text{ para A'}$$

$$E2/E3: g_{ef23} = \frac{0,40}{0,60} \cdot (50 - 10) = 27 \text{seg} \text{ e } g_{23} = 26 \text{seg} \text{ para G}$$

$$E2: g_{ef2} = \frac{0,10}{0,25} \cdot (27 - 5) = 9\text{seg} \text{ e } g_2 = 8\text{seg} \text{ para E};$$

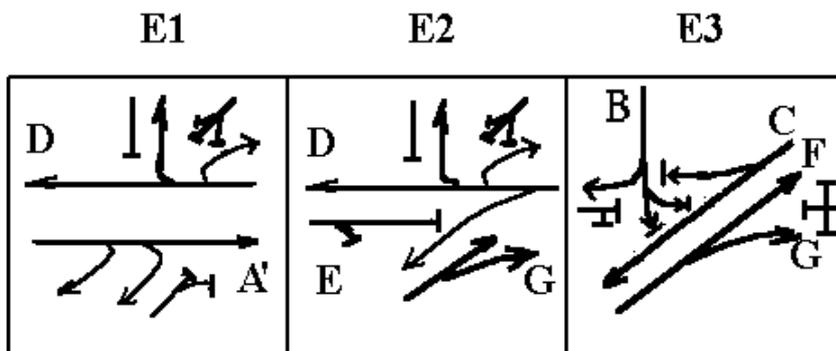
$$E3: g_{ef3} = \frac{0,15}{0,25} \cdot (27 - 5) = 13\text{seg} \text{ e } g_3 = 12\text{seg} \text{ para C e F};$$

$$E1/E2: g_{ef12} = 14 + 5 + 9 = 28\text{seg} \text{ e } g_{12} = 27\text{seg} \text{ para D.}$$

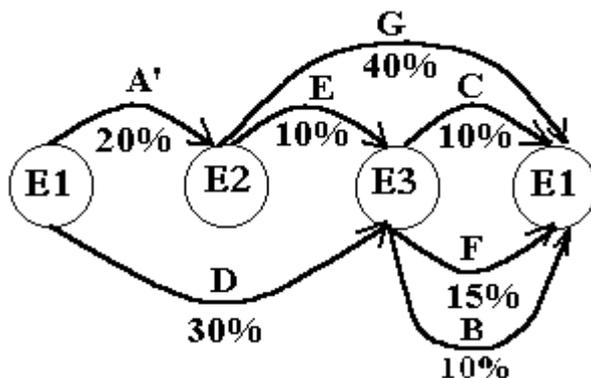
Como no plano original para a interseção não decomposta, a maior parte do tempo é alocada para a operação de D e G. A redução dos tempos de ciclo e de verde decorre basicamente da eliminação do conflito entre B e C/F, dados que as linhas de retenção intermediárias permitem acomodar as conversões à esquerda de B e as conversões à direita de C (eventualmente também conversões à esquerda permitidas em F) durante o movimento da outra corrente de tráfego.

Essa visão simplificada pode ser facilmente incorporada no dimensionamento original, revisando o diagrama de movimentos concordantes de forma consistente.

Os diagramas de estágio e de movimento correspondentes seriam os seguintes:



e o diagrama de movimento correspondente é



(B seria simultâneo a C e G, tendo-se  $g_1 = 12\text{seg}$ ,  $g_2 = 8\text{seg}$  e  $g_3 = 12\text{seg}$  como no novo dimensionamento, dado que F ainda seria crítico no estágio 3 e a A-G no ciclo).

Planos deste tipo, com início e término simultâneo dos estágios nas linhas de retenção adjacentes são práticos e podem ser usados em muitos casos. A sua programação nos controladores também é mais simples (dado que resultam 3 estágios convencionais).

A discussão feita a seguir supõe a conveniência de introduzir defasagens para melhorar a eficiência (o que não seria o caso, dado que não há grande solicitação da demanda) ou a segurança (como será discutido adiante).

A sincronização deve estabelecer defasagens entre o início do verde nos cruzamentos adjacentes para impedir que os movimentos principais sejam retidos nas linhas de retenção intermediárias nas mudanças de estágio e pode levar a pequenos ajustes nos tempos de verde (e no plano semaforico composto). Por isso, é útil calcular os tempos de verde limites com alguma condição mínima de operação.

Admitindo grau de uso da capacidade de até 95% e verde mínimo de 8seg tem-se:

- no primeiro cruzamento:

$$\text{para E1: } g_{ef1} = \frac{0,30}{0,95} \cdot 50 = 16\text{seg e } g_{1,\text{mín}} = 15\text{seg para D'};$$

$$\text{para E2: } g_{ef2} = \frac{0,10}{0,95} \cdot 50 = 5\text{seg e } g_{2,\text{mín}} = 8\text{seg para B};$$

- no segundo cruzamento:

$$\text{para E1: } g_{ef1} = \frac{0,20}{0,95} \cdot 50 = 11\text{seg e } g_{1,\text{mín}} = 10\text{seg para A'};$$

$$\text{para E2: } g_{ef2} = \frac{0,10}{0,95} \cdot 50 = 5\text{seg e } g_{2,\text{mín}} = 8\text{seg para E};$$

$$\text{para E3: } g_{ef3} = \frac{0,15}{0,95} \cdot 50 = 8\text{seg e } g_{3,\text{mín}} = 8\text{seg para C e F};$$

$$\text{para E1/E2: } g_{ef12} = \frac{0,30}{0,95} \cdot 50 = 16\text{seg e } g_{12,\text{mín}} = 15\text{seg para D};$$

$$\text{para E2/E3: } g_{ef23} = \frac{0,40}{0,95} \cdot 50 = 21\text{seg e } g_{23,\text{mín}} = 20\text{seg para G}.$$

Admitindo que a distância é de cerca de 28 metros de A a A' ou de D a D' e de cerca de 30 metros de B a A' ou de C a D', as condições de defasagem para A seriam:

- sem filas, A' deveria abrir após A; considerando a velocidade de 50 km/h (13,89m/s), isso deveria ocorrer com defasagem  $\theta_{AA'} = +L/V = +2\text{seg}$ ;

- com filas, A' deveria abrir antes de A, considerando um máximo de 8 veículos (4 por faixa) e o fluxo de saturação de 3200v/h (1600v/h ou 0,44v/s por faixa) no trecho intermediário, isso deveria ocorrer com  $\theta_{AA'} = -nL/S = -9\text{seg}$  no máximo; se A é a principal alimentação de fluxo em A', uma antecipação maior que a necessária para escoar a fila acumulada traria desperdício de verde em A' (até chegar o pelotão de A);

- com uma fila intermediária parcial (por exemplo, metade da máxima), a defasagem seria também um valor intermediário ( $\theta_{AA'} = (L-z)/V - n_z/S = -3,5\text{seg}$ , no exemplo), de forma a escoar uma fila menor e permitir a chegada do pelotão.

É fácil ver que as mesmas condições aplicam-se a D: sem filas, D' deveria abrir após D com defasagem  $\theta_{DD'} = +2\text{seg}$ , e com filas, D' deveria abrir antes de D com  $\theta_{DD'} = -9\text{seg}$  no máximo; se D é a principal alimentação de fluxo em D', uma antecipação maior que a necessária para escoar a fila acumulada traria desperdício de verde em D'. As duas condições de cada caso ilustram os princípios de sincronização progressiva e regressiva, selecionada em função da extensão das filas intermediárias.

Em geral, e neste caso particular, é impossível satisfazer todas as restrições de sincronização ao mesmo tempo (por exemplo, com o plano semaforico selecionado, A/D' e A'/D iniciam simultaneamente e uma defasagem  $\theta_{AA'} = +\delta$  é equivalente a uma defasagem  $\theta_{DD'} = -\delta$ ). Note que existiriam condições semelhantes para a sincronização de B a A' e de C a D' que também teriam de ser consideradas.

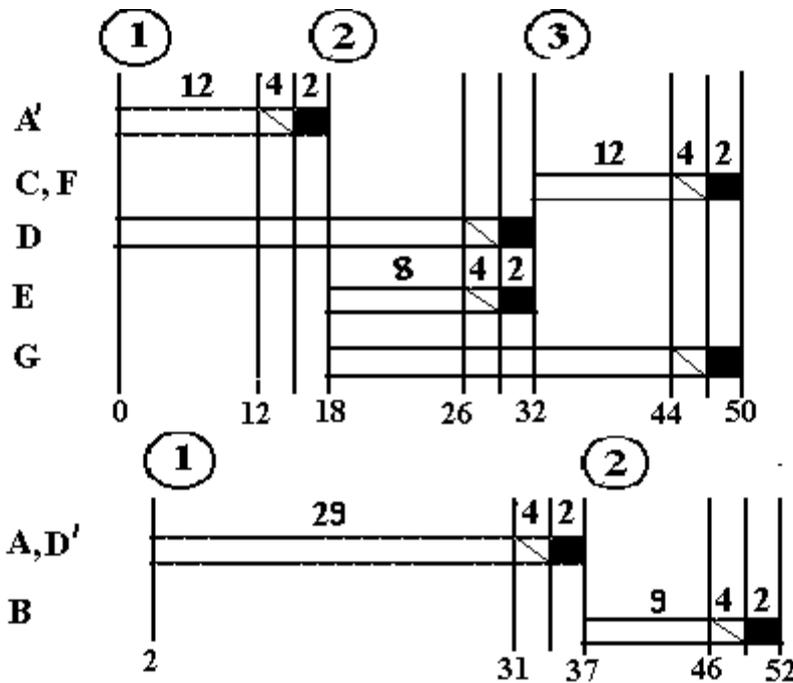
Por este motivo, é preciso obter uma solução intermediária que pondera o impacto nos diferentes fluxos (o que exige programas computacionais de determinação de planos semaforicos coordenados, como o TRANSYT) ou priorizar algum fluxo.

A segurança dos planos de defasagem em linhas de retenção próximas é difícil de obter e avaliar. Existem situações dúbias e todo arranjo traz riscos em vista do eventual confundimento de focos adjacentes com indicações luminosas conflitantes (função das defasagens não nulas) ou da expectativa frustrada de continuidade do movimento (especialmente para movimentos diretos como A e A' ou D e D').

A melhor estratégia é normalmente a sincronização para os fluxos diretos (para evitar frustração e transgressão) e o distanciamento máximo dos focos das retenções sucessivas (para evitar confundimento). Se isto não puder ser obtido de forma satisfatória, o início simultâneo normalmente seria mais seguro.

Neste caso, os fluxos principais são G e D. Como G não utiliza linhas de retenção adjacentes, a será obtida uma sincronização priorizando D.

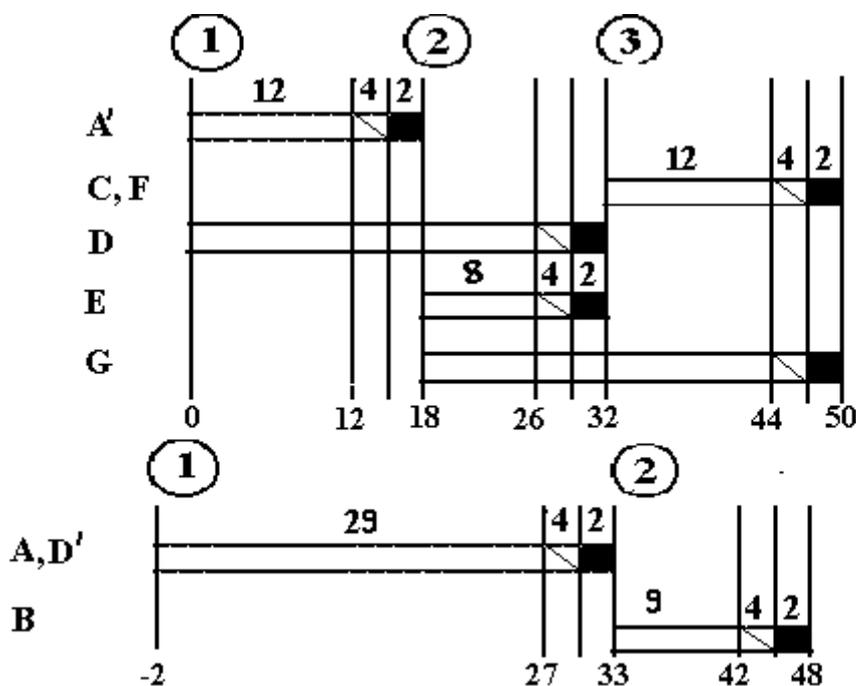
Se a demanda de conversões de C é nula, pode-se admitir inicialmente a situação em que não há fila intermediária. Neste caso, a defasagem inicialmente selecionada seria  $\theta_{DD'} = +2\text{seg}$ . Com o dimensionamento inicial, o diagrama de tempos seria:



Portanto, todo o fluxo escoado de D passaria por D' e apenas parte da fila gerada pelas conversões de C seria retida em D'. A relevância desta fila dependeria do volume de conversões e poderia interferir sobre o fluxo direto de C caso a capacidade de armazenamento no trecho intermediário fosse insuficiente.

Para o fluxo vindo de A, a priorização de D sem filas seria desfavorável. A retenção intermediária A' teria de acumular a demanda de A não escoada mais as conversões de B. A defasagem negativa seria normalmente utilizada mas (menos de 8 dos 29 segundos teriam verde em ambas as retenções). Esta consideração normalmente levaria a maximizar a duração do estágio de A' limitando ao mínimo os estágios de G (de E e mesmo CF). Como o estágio de A' seria mais curto, o início do estágio A' seria alimentado pela fila acumulada no final do estágio de A ou pelas conversões de B. Se a defasagem negativa fosse curta, não haveria desperdício de verde para A.

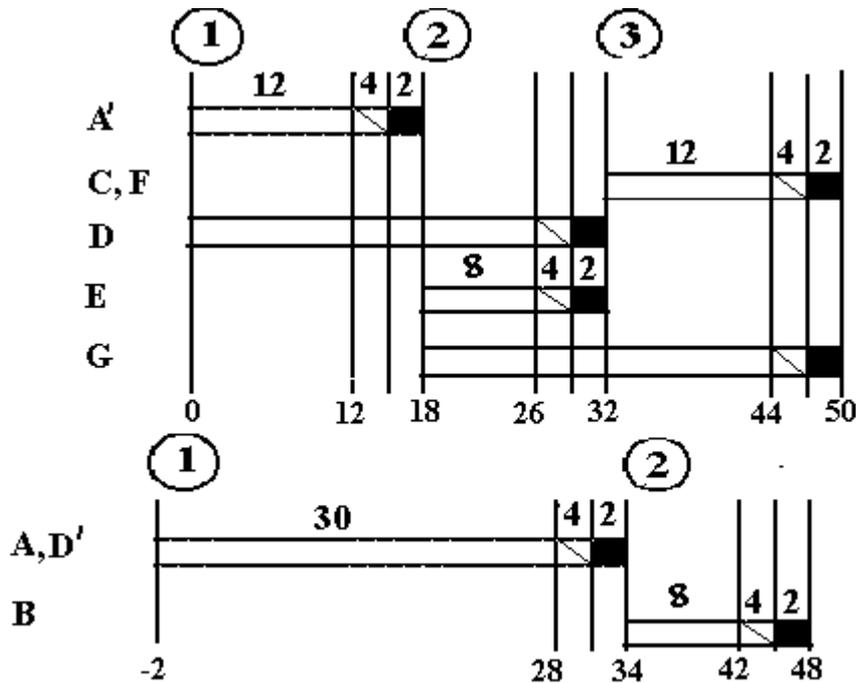
Uma fila intermediária em D' levaria a uma defasagem negativa em relação a D e a uma defasagem positiva de A a A'. Em uma situação desta natureza, o diagrama de tempos com defasagem oposta seria:



Como a retenção de A' teria, além das conversões de B, a fila intermediária gerada pelo final do estágio de A (dado que o estágio adiante, em A', é mais curto), normalmente haveria um período de bloqueio A, no início do movimento (até dissipar a fila em A') e eventualmente no final do seu movimento (após ocupar o trecho até A'). A possibilidade de desperdício de verde para A seria, entretanto, eliminada. Estas deficiências não afetariam a operação, porque A não é crítico, mas podem causar irritações nos condutores e gerar problemas de segurança menores.

Se há fila intermediária, a ausência da defasagem negativa levaria o bloqueio a afetar D, que é o movimento crítico. Esta perda de eficiência seria importante evitar. O bloqueio de A poderia ser reduzido minimizando a fila intermediária em A' (o que novamente levaria a aumentar o estágio de A' e minimizar o estágio de G e E). O ajuste da defasagem no final do estágio de D também contribuiria para minimizar a fila intermediária em D' e reduziria a defasagem negativa a ser adotada.

Considerando que os verdes mínimos de B e E, apenas o ajuste da defasagem do final dos estágios de D e D' pode ser feito. A programação adotada seria a seguinte:



Note que, com a decomposição da interseção, cada cruzamento seria operado por um controlador semafórico distinto, impondo-se o tempo de ciclo comum e a defasagem selecionada entre o início de cada ciclo (que pode ser referenciado a um movimento qualquer, no caso D, que normalmente faz parte do corredor principal).

Eventualmente, os planos podem ser combinados e programados em um único controlador (isto exigiria poder representar estruturas de entreverdes mais detalhadas, especialmente quando as defasagens são pequenas, como usual em interseções compostas) pela introdução de estágios de transição. Esta prática é aceitável quando para o controle a tempos fixos, por ser econômica.