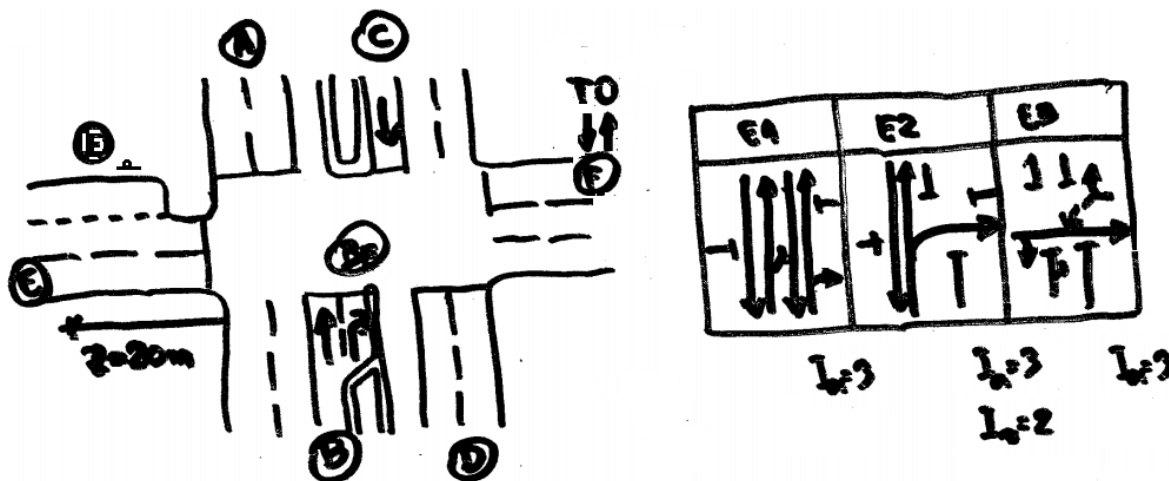


EXERCÍCIO: CORREDOR DE ÔNIBUS NO CONTRA-FLUXO

Considere o impacto na operação semafórica da introdução de um corredor de ônibus com operação no contra-fluxo (usando o atual canteiro central) e estágio de conversão (atualmente há 2 estágios com 25s para A/D e ciclo 50s), como esquematizado abaixo:



Os dados existentes ou assumidos sobre o local no pico da manhã são os seguintes:

Aproximação	Autos	Cam	Ônibus	Fluxo de Saturação
A	970	200	-	$\hat{s} = 2900v/h$
B	-	-	120	$\tilde{s} = 1800veq/h$
BF	-	-	60	$\tilde{s} = 1600veq/h$
C	-	-	120	$\tilde{s} = 1800veq/h$
D	600	100	-	$\hat{s} = 3000v/h$
E	810	100	40	$\hat{s} = 3200v/h$
F	-	-	100	$\tilde{s} = 1350veq/h$

(\hat{s} : valores atuais medidos, sem corredor; \tilde{s} : valores estimados para o local).

Dimensionar o semáforo, ajustando os valores assumidos para o fluxo de saturação e verificando o atendimento aos pedestres (admita faixas de 3,3m, menos de 5% de conversões à direita em D e E; ônibus em F: 40% à direita e 60% à esquerda).

- Discutir:
- o nível de saturação decorrente da nova operação no pico da manhã;
 - o impacto de bloqueios nas faixas de tráfego geral de A ou D;
 - a previsão qualitativa para a operação no pico da tarde;
 - a extensão recomendada para a baía de conversão de ônibus;
 - a estimativa de fluxo de saturação para a conversão permitida;
 - os entreverdes atuais para $V_L=50km/h$, exceto no corredor ($V_L=40km/h$);
 - a revisão do dimensionamento com focos e faixas de pedestres (4,0m).

SOLUÇÃO:

Os fluxos de saturação medidos não tem a faixa exclusiva no contra-fluxo e tem os fluxos de ônibus correspondentes na mesma aproximação (admite-se que F é a entrada/saída de um terminal de ônibus existente e que as faixas no contra-fluxo foram implantadas no canteiro central). Considerando os demais aspectos similares, a estimativa será corrigida pela mudança no fator de composição de tráfego:

$$A: \quad Q_{\text{antes}} = 970 + 200 + 120 = 1290 \text{ v/h}, Q_{\text{depois}} = 970 + 200 = 1170 \text{ v/h}$$

$$p_{\text{Cantes}} = \frac{200}{1290} \cong 0.1550; p_{\text{Cdepois}} = \frac{200}{1170} \cong 0.1709$$

$$p_{\text{Oantes}} = \frac{120}{1290} \cong 0.0930; p_{\text{Odepois}} = 0$$

$$f_{\text{cantes}} = \frac{100}{100 + 15,5 \cdot (1,75 - 1) + 9,3 \cdot (2,25 - 1)} = 0,8114$$

$$f_{\text{cdepois}} = \frac{100}{100 + 17,1 \cdot (1,75 - 1)} = 0,8863$$

$$\therefore S'_A = 2900 / 0,8114 \cdot 0,8863 = 3167,8 \text{ v/h}.$$

$$D: \quad Q_{\text{antes}} = 800 + 100 + 120 = 1020 \text{ v/h}, Q_{\text{depois}} = 800 + 100 = 900 \text{ v/h}$$

$$p_{\text{Cantes}} = \frac{100}{1020} \cong 0.0980; p_{\text{Cdepois}} = \frac{100}{900} \cong 0.1111$$

$$p_{\text{Oantes}} = \frac{120}{1020} \cong 0.1176; p_{\text{Odepois}} = 0$$

$$f_{\text{cantes}} = \frac{100}{100 + 9,8 \cdot (1,75 - 1) + 11,8 \cdot (2,25 - 1)} = 0,8190$$

$$f_{\text{cdepois}} = \frac{100}{100 + 11,1 \cdot (1,75 - 1)} = 0,9231$$

$$\therefore S'_D = 3000 / 0,8190 \cdot 0,9231 = 3381,5 \text{ v/h}.$$

Não há alteração em E (a menos das mudanças decorrentes da temporização). Para B, BF e C foram fornecidas estimativas em veq/h (portanto, apenas serão transformados em v/h, permitindo então manter a demanda em v/h com ônibus):

$$S'_E = 3200 \text{ v/h} \text{ (admitindo caminhões e ônibus mantidos como antes) e}$$

$$S'_B = \frac{1800}{2,25} = 800 \text{ v/h}, S'_{BE} = \frac{1600}{2,25} = 711 \text{ v/h}, S'_C = \frac{1800}{2,25} = 800 \text{ v/h}, S'_F = \frac{1350}{2,25} = 600 \text{ v/h}$$

Portanto, as taxas de solicitação de verde efetivo serão:

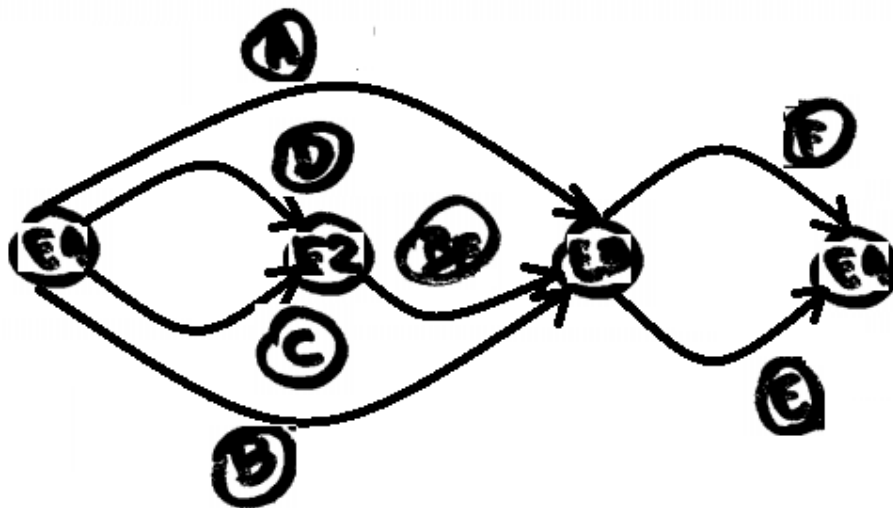
Aproximação	Q (v/h)	S(v/h)	y=Q/S
A	1170	3168	1170/3168 = 0,37
B	120	800	120/800 = 0,15
BF	60	711	60/711 = 0,085
C	120	800	120/800 = 0,15
D	900	3382	900/3382 = 0,27
E	950	3200	950/3200 = 0,30
F	100	600	100/600 = 0,17

Os tempos perdidos nas mudanças de estágio, admitindo $\ell \cong I_a - 1\text{seg}$, são:

E1/E2: $\ell \cong 3 - 1 = 2\text{seg}$ e $I_\ell \cong 2 + 0 = 2\text{seg}$

E2/E3: $\ell \cong 3 - 1 = 2\text{seg}$ e $I_\ell \cong 2 + 2 = 4\text{seg}$

E3/E1: $\ell \cong 3 - 1 = 2\text{seg}$ e $I_\ell \cong 2 + 0 = 2\text{seg}$



As sequências potencialmente críticas são:

- A-E: $Y = 0,37 + 0,30 = 0,67$ e $t_p \cong 4 + 2 = 6\text{seg}$, $\therefore t_c = \frac{1,5 \cdot 6 + 5}{1 - 0,67} = 42\text{seg}$ ou

- D-BF-E: $Y = 0,27 + 0,085 + 0,30 = 0,655$ e $t_p \cong 2 + 4 + 2 = 8\text{seg}$, $\therefore t_c = \frac{1,5 \cdot 8 + 5}{1 - 0,655} = 49\text{seg}$

Portanto, a sequência crítica é D-BF-E e será possível atendê-la com o ciclo ótimo.

Adotando $t_c = 50\text{seg}$, tem-se:

$$G_{ef} = 50 - 8 = 42\text{seg para a sequência D-BF-E}$$

$$\text{em E1: } g_{ef}^{E1} = \frac{0,27}{0,655} \cdot 42 = 17\text{seg} \Rightarrow g_{E1} = 17 + 2 - 3 = 16\text{seg}$$

$$\text{em E2: } g_{ef}^{E2} = \frac{0,085}{0,655} \cdot 42 = 6\text{seg} \Rightarrow g_{E2} = 6 + 2 - 3 = 5\text{seg}$$

$$\text{em E3: } g_{ef}^{E3} = \frac{0,30}{0,655} \cdot 42 = 19\text{seg} \Rightarrow g_{E3} = 19 + 2 - 3 = 18\text{seg}$$

A duração do estágio de conversão BF é bastante reduzida. Pode-se impor

$$g_{E2} = g_{\min} = 8\text{seg e, portanto, } t_{E2, \text{fixo}} = g_{\min} + I_a + I_v = 8 + 3 + 2 = 13\text{seg.}$$

Então tem-se:

$$\text{D-BF-E: } Y' = 0,655 - 0,085 = 0,57 \text{ e } t'_p \cong 8 - 4 = 4\text{seg, } \therefore t'_c = \frac{1,5 \cdot 4 + 13 + 5}{1 - 0,57} = 56\text{seg.}$$

Adotando $t_c = 65\text{seg}$, tem-se:

$$G'_{ef} = 65 - 13 - 4 = 48\text{seg para a sequência D-BF-E}$$

$$\text{em E1: } g_{ef}^{E1} = \frac{0,27}{0,57} \cdot 48 = 23\text{seg} \Rightarrow g_{E1} = 23 + 2 - 3 = 22\text{seg}$$

$$\text{em E2: } g_{E2} = 8\text{seg}$$

$$\text{em E3: } g_{ef}^{E3} = \frac{0,30}{0,57} \cdot 48 = 25\text{seg} \Rightarrow g_{E3} = 25 + 2 - 3 = 24\text{seg.}$$

As travessias de pedestres impõem restrições em E1 e E3.

em E1: travessia da via transversal na aproximação de EF ($L_{ped}^{E1} = 3.3,3 = 9,9m$)

$$t_{ped}^{E1} = \frac{9,9}{1,2} + 3 = 11,25seg \Rightarrow g_{E1} > 12 - 3 = 9seg(OK)$$

em E3: travessia da via principal na aproximação de A ($L_{ped}^{E1} = 7.3,3 = 23,1m$)

$$t_{ped}^{E1} = \frac{23,1}{1,2} + 3 = 22,25seg \Rightarrow g_{E3} > 22 - 3 = 19seg(OK)$$

As travessias em E2 são complementares e menos críticas. As exigências em E1 e E2 poderiam ser reduzidas se as travessias puderem ser completadas em E2.

Admitindo poucas conversões, os conflitos com as travessias foram aceitos. Os casos mais críticos seriam o conflito com as conversões de BF (situação não usual) e as conversões permitidas de F (situação complexa, também com conflitos veiculares). Se as conversões tiverem fluxos mais significativos, podem ocorrer problemas em outros casos (nas conversões à direita de D, E, F e na conversão à esquerda de F). Estas situações deveriam ser cuidadosamente observadas após a implantação porque envolvem aspectos comportamentais que podem variar entre locais.

As questões a discutir são diversas.

Os níveis de saturação não se alteraram significativamente na interseção por que houve uma ampliação física (com a utilização do espaço anteriormente utilizado para o canteiro central). Desta forma, neste caso específico, a implantação das faixas exclusivas reduziram a demanda de tráfego nas faixas de uso geral. A taxa de verde para A/D era de aproximadamente 50%, mas escoando também o fluxo de ônibus, e passa a ser 35,4%, agora sem escoar o fluxo de ônibus (no corredor B/C). A interseção continuou tendo um semáforos não saturado, com ciclo semafórico baixo.

O impacto de bloqueios introduz uma violação das hipóteses admitidas no dimensionamento (ausência de restrição ao escoamento do tráfego adiante). O tempo bloqueado pode ser considerado reduzindo o verde efetivo ou o fluxo de saturação mas sua consideração depende da interação com gargalos adiante (a insuficiência de capacidade adiante é a causa usual de bloqueio, embora possa ser causado também por redução no número de faixas ou deficiência de sincronização semafórica).

O pico da tarde pode ser analisado qualitativamente admitindo que a demanda decorre de fluxos de tráfego pendulares (que invertem o sentido no pico da tarde), pelo menos em corredores bidirecionais. Este seria o caso normal para os fluxos A e D (não seria tão usual para os fluxos de E, cuja conformação sugere a existência de uma via alternativa a E no entorno). Com relação a A e D, no pico da manhã o fluxo dominante (A) tem maior tempo de verde (opera também em E2). Portanto, deve-se esperar que o pico da tarde tenha operação pior (exija ciclos maiores) com maior demanda em D (especialmente notando que E2 deve manter a duração mínima). A expectativa pode não ocorrer se E tiver demanda reduzida no pico da tarde (pode naturalmente ocorrer o contrário, o que deve ser verificado identificando a opção pendular de E no entorno).

A extensão da baia de conversão é determinada pela necessidade de acomodar as filas de espera de BF em cada ciclo semaforico. Em geral admite-se como critério usual uma extensão suficiente para acomodar 1,5 a 2,0 vezes a fila média prevista ou a demanda média por ciclo. A demanda média por ciclo é fácil de obter. Admitindo um ciclo majorado $t_c = 80\text{seg}$ (ou mesmo $t_c = t_c^{\text{máx}} = 120\text{seg}$) tem-se

$$\text{Demanda: } Q_c = 0,04 \cdot 1500 = 60 \text{ v/h e } N_c = \frac{60}{3600} \cdot 80 = 1,33 \text{ v/ciclo}$$

$$(\text{ou demanda: } Q_c = 0,04 \cdot 1500 = 60 \text{ v/h e } N_c = \frac{60}{3600} \cdot 120 = 2 \text{ v/ciclo})$$

Extensão necessária: para 2 a 3 veículos; 30 a 45m é suficiente

O critério alternativo seria relevante principalmente se parte do período de pico opera com saturação (o que pode levar a filas bem maiores). No caso, a saturação não ocorre porque $g_{E2} = g_{\text{mín}} = 8\text{seg} \Rightarrow g_{\text{efE2}} = 8 + 3 - 2 = 9\text{seg}$ tendo-se então

$$u = \frac{9}{65} = 13,85\% \text{ e } X = \frac{Q}{C} = \frac{y}{u} = \frac{0,085}{0,1385} = 61,4\%$$

$$C_{BE} = u_{E2} \cdot S_{BE} = 0,1385 \cdot 711 = 98 \text{ v/h} > Q = 60 \text{ v/h}$$

A diferença entre os critérios será menor mas pode utilizar a extensão máxima da fila:

$$\text{Fila regular: } \bar{n}_r = \frac{60}{3600} \cdot \frac{65}{2} \cdot \frac{(1 - 0,1385)^2}{(1 - 0,085)} = 0,44 \text{v} (0,93 \text{v})$$

$$\text{Sobre-fila: } \bar{n}_s = \frac{98}{4} \cdot \frac{15}{60} \left(\sqrt{(0,614 - 1)^2 + 8 \cdot 1 \cdot 0,614} / \frac{98 \cdot 15}{60} + (0,614 - 1) \right) = 1,26 \text{v}$$

$$\text{Fila total: } \tilde{n} = 0,44 + 1,26 = 1,7 \text{v} (2,19 \text{v}) \text{ e } \tilde{n}_m = \frac{2,19}{(1 - 0,085)} = 2,36 \text{v}$$

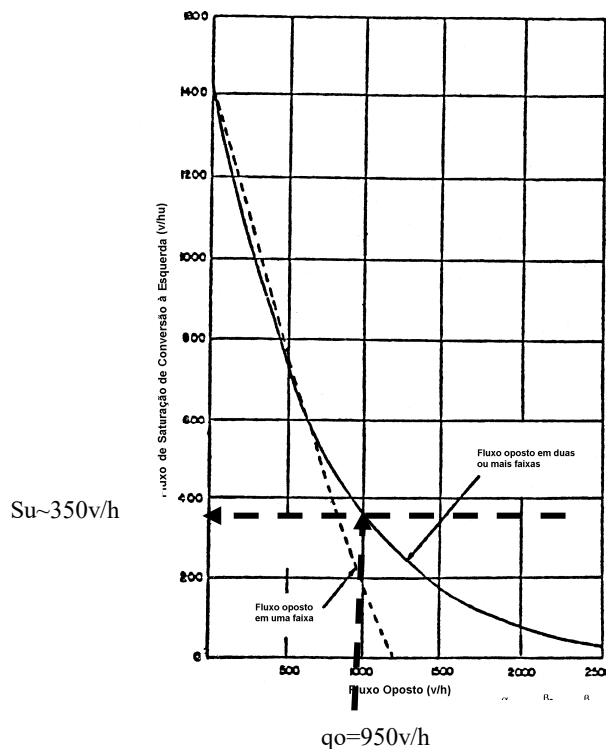
$$\text{Fila corrigida: } n_m = \frac{2,36}{\left(1 - \frac{60}{1} \cdot \frac{0,015}{30}\right)} = 2,43 \text{v}$$

Extensão necessária: para 3 a 4 veículos; 45 a 75m é recomendado.

O fluxo de saturação para a conversão permitida (F) depende do dimensionamento adotado. No dimensionamento adotado com $t_c = 65\text{seg}$ e $g_{E3} = 24\text{seg}$, admitiu-se que $g_{efE3} = 25\text{seg}$, $Q_F = 100\text{v/h}$ (60% à direita e 40% à esquerda), $S_F = 600\text{v/h}$, $Q_E = 950\text{v/h}$ e $S_E = 3200\text{v/h}$. Com estes dados, o tempo de dissipação de filas no fluxo oposto E seria estimado em $g_{s0} = \frac{950 \cdot (65 - 25)}{3200 - 950} = 17\text{seg}$ e o tempo útil para as

conversões permitidas de F seria estimado em $g_u = 25 - 17 = 8\text{seg}$. Com o fluxo oposto normal de E (950v/h) em 2 faixas, a capacidade para a manobra permitida durante o tempo útil seria estimada em cerca de 350v/h segundo Webster&Cobbe/66. Na falta de dados alternativos, um valor ajustado seria $S_{Fu} = \frac{350}{2,25} = 156\text{v/h}$ para ônibus.

Admitindo $n_f = 1$ veículo fazendo a manobra o entreverdes, a capacidade para F à esquerda seria estimada em $C_{Fesq} = 156 \cdot \frac{8}{65} + 1 \cdot \frac{3600}{65} = 75\text{v/h}$ e o fluxo de saturação à esquerda em $S_{Fesq} = 156 \cdot \frac{8}{25} + 1 \cdot \frac{3600}{25} = 194\text{v/h}$. Considerando ambas as conversões, $y_F = \frac{60}{194} + \frac{40}{600} = 0,38$ (muito alto, tornando a manobra crítica em E3).



Portanto, seria interessante garantir $n_f = 2$ veículos no entreverdes para tornar o atendimento à demanda de F razoável, o que exigiria pelo menos um vermelho de segurança excedente em E3 (de 2,5seg segundo Webster&Cobbe/66, a ser majorado

para ônibus). Opcionalmente, poderia de ser introduzido um estágio adicional para acomodar conversões à esquerda protegidas em F (uma condição mais segura, que elevaria o ciclo exigido para o semáforo) ou proibir a manobra à esquerda no local (e prover uma rota alternativa para o movimento, supondo que não possam ser feitas alterações na circulação ou utilização do terminal de ônibus em F). Se o corredor operasse no sentido normal, mesmo junto ao canteiro central, F e BF não seriam conflitantes e poderiam operar em E2 (ou BF poderia deixar o corredor antes e fazer a conversão à direita com D). A operação no contra-fluxo é, em geral, mais complexa.

Note que o fluxo de saturação de E (e, eventualmente, de B se a baía de BE causa interferência) também depende do dimensionamento admitido, em função do estacionamento permitido a 20m da linha de retenção, mas seu verde efetivo não foi alterado significativamente (próximo a 20seg na situação inicial, com ciclo de 50seg).

Sobre os entreverdes, deve-se revisar os intervalos de amarelo e de vermelho de segurança. Considerando os limites de velocidade adotados em A, D e E, os valores admitidos para o intervalo de amarelo seriam inadequados em E1 e E2 (para $V_L=50\text{km/h}$ pode-se utilizar um amarelo de 4seg). No entanto, nos períodos de pico as velocidades poderiam ser menores e o aspecto teria de ser observado em campo.

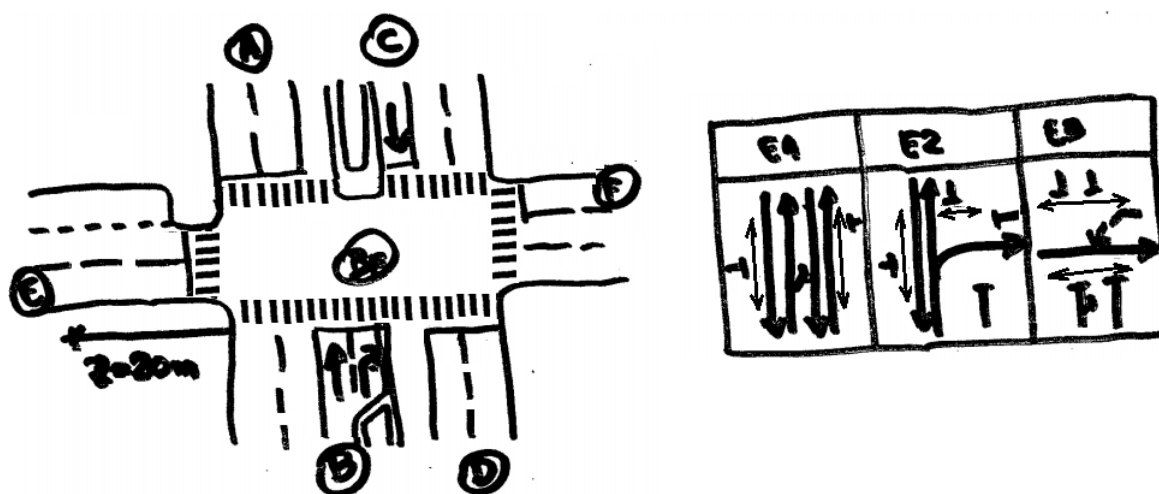
No entanto, os intervalos de vermelho de segurança são mais importantes neste caso. Na transição E1/E2, o conflito crítico seria entre C (com $z_s \cong 10\text{m}$) e BF (com $z_c \cong 0\text{m}$) tendo-se $I_v = 10 + 15 / \sqrt{30/3,6} - 0 + 0 \cong 3\text{seg}$ (adotando $V_s = 30\text{km/h}$ para ônibus). Na transição E2/E3, o conflito crítico seria entre BE (com $z_s \cong 10\text{m}$) e F (com $z_c \cong 0\text{m}$) tendo-se $I_v = 10 + 15 / \sqrt{30/3,6} - 0 + 0 \cong 3\text{seg}$ (novamente adotando $V_s = 30\text{km/h}$ para ônibus). Na transição E3/E1, o conflito crítico seria entre E (com $z_s \cong 23\text{m}$) e D (com $z_c \cong 0\text{m}$) tendo-se $I_v = 23 + 6 / \sqrt{40/3,6} - 0 + 0 \cong 2,4\text{seg}$ (adotando $V_s = 40\text{km/h}$ para autos) ou Fdireita (com $z_s \cong 10\text{m}$) e C (com $z_c \cong 0\text{m}$) tendo-se $I_v = 10 + 15 / \sqrt{30/3,6} - 0 + 0 \cong 3\text{seg}$ (adotando $V_s = 30\text{km/h}$ para ônibus). Os resultados teriam de ser verificados em campo mas provavelmente pelo menos os valores admitidos em E1 e E3 dados teriam de ser revisados (para introduzir um vermelho de segurança de 2 ou 3seg).

O impacto dos entreverdes revisados no dimensionamento seria significativo. Os tempos mortos foram estimados com a regra prática $\ell \cong I_a - 1\text{seg}$ e é difícil afirmar que o aumento do amarelo implicaria em maior tempo morto perdido. No entanto, o aumento dos vermelhos de segurança (pelo menos 2 seg em E1 e E3) certamente

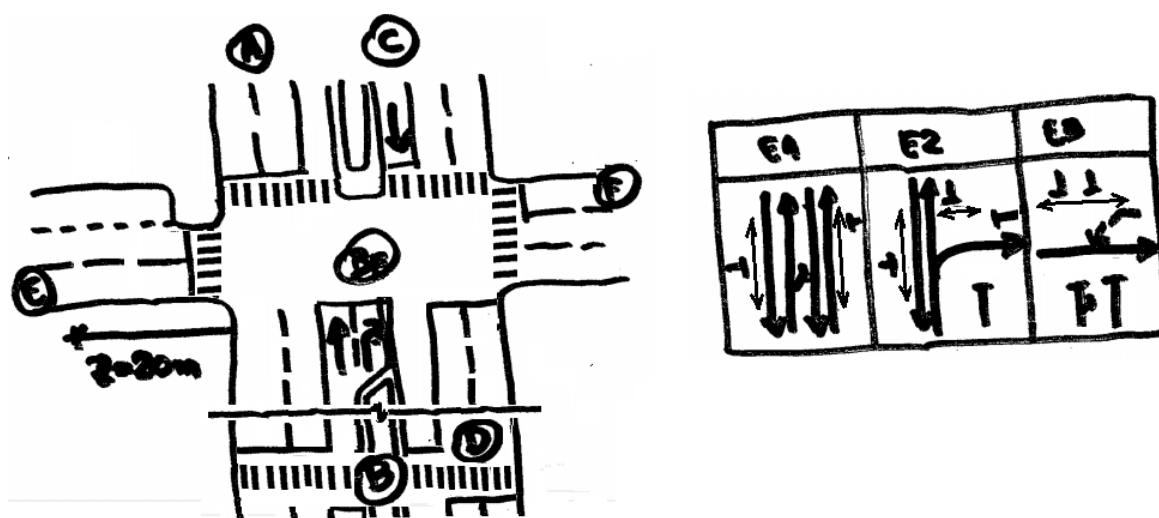
aumentaria o tempo perdido total. No caso menos exigente, o tempo de ciclo ótimo para a sequência crítica D-BF-E passaria a $t_c = \frac{1,5 \cdot 12 + 5}{1 - 0,655} = 67\text{seg}$, pelo menos.

A melhoria da segurança dos pedestres é o aspecto final (muito importante). A implantação de corredores no contra-fluxo é, em si, um aspecto crítico para a segurança de pedestres (por introduzir um contexto inusitado e complexo). No esquema proposto existe também o estágio de conversão de BF e a conversão permitida em F. É difícil prever a condição de segurança para os pedestres (as faixas de pedestres podem ser insuficientes para obter um grau de segurança adequado).

Implantando faixas de pedestres em todas as travessias possíveis tem-se:



Neste esquema, a travessia mais crítica poderia ser eliminada da seguinte forma:



(provavelmente exigindo barreiras para canalizar os pedestres às faixas de pedestres).

As condições de operação e dimensionamento não serão muito afetadas pela introdução das faixas de pedestres (exceto por um provável aumento marginal dos entreverdes) pois as condições a observar são similares às anteriormente consideradas (os verdes mínimos impostos pelas travessias de cada estágio).

A principal decisão seria, portanto, sobre eliminar a travessia crítica. Alternativamente, pode-se considerar a introdução de um estágio adicional exclusivo para pedestres.

Neste caso, a duração do estágio exclusivo de pedestres sem eliminar a travessia crítica seria provavelmente muito exigente (note a ausência de canteiros ou ilhas que permitam uma travessia parcial, exigindo um estágio de pedestres de pelo menos 22seg para uma travessia minimamente segura).

Portanto, será discutida apenas a alternativa com a travessia mais crítica eliminada. As opções naturais seriam, então, ter o estágio exclusivo de pedestres após E2 (a forma usual em cidades que posicionam os estágios de pedestres após as vias principais) ou após E3 (a forma usual em cidade que optam pela alternativa após as vias transversais). No caso específico, a segunda opção parece inicialmente mais segura e prolonga naturalmente os tempos de travessia de E2 e E3. Mas é importante avaliar aspectos comportamentais de cada local e a necessidade de manter consistência no seu tratamento em relação ao entorno (e a toda cidade).

Com as opções adotadas, a duração do estágio exclusivo de pedestres pode provavelmente limitar-se a uma das pistas (10m) e ter cerca de 12seg (mais se o fluxo de pedestres for significativo), incluindo um piscante de 8seg, e ter também um vermelho de segurança de 1seg pelo menos. O impacto deste estágio adicional com duração fixa de pelo menos 13seg seria grande: o tempo de ciclo ótimo para a sequência crítica D-BF-E passaria a $t_c = \frac{1,5 \cdot 12 + 13 + 5}{1 - 0,655} = 104\text{seg}$ (ou o ciclo máximo).

Pode-se ver, nos diversos aspectos discutidos, como as exigências de segurança afetam o dimensionamento semaforico, normalmente solicitando tempos de ciclo maiores e acarretando maiores filas e atrasos para o fluxo veicular. As decisões devem, portanto, ser feitas no limite da condição que garante a segurança necessária. É fácil ver que a operação dos ônibus no contra-fluxo traz diversos problemas de fluidez e segurança. Seu bom uso é difícil (exceto em locais específicos, extensões reduzidas ou com poucos fluxos de entrada/saída e travessia de pedestres).