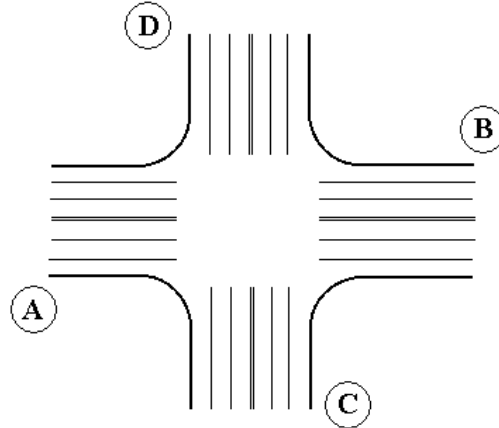


EXERCÍCIO: REPARTIÇÃO DE CAPACIDADE

Considere a interseção entre duas vias de mão dupla e duas faixas por sentido (estacionamento permitido em ambos os lados), segundo o esquema abaixo:



Os dados de demanda (Q) e os fluxos de saturação (S) são:

Períodos	A		B		C		D		P
	Q	S	Q	S	Q	S	Q	S	Q1/Q2
Manhã	1500	4000	500	4000	900	3000	400	3000	250/200
Meio-Dia	1200	3800	900	3800	1000	2500	600	2500	400/450
Tarde	800	4000	1800	4000	400	3000	900	3000	300/150
Noite	500	3500	400	3500	300	2200	200	2200	50/100

- (a)- Qual a capacidade da interseção caso fosse adotada a operação sem semáforo com prioridade para a via AB, sem canteiro central, se toda demanda busca o cruzamento da via? Como a implantação de um canteiro central (com largura suficiente para acomodar um veículo) alteraria esta avaliação? Admitir que cada etapa do cruzamento necessita de uma brecha de 6 segundos e o cruzamento total de 8 segundos.
- (b)- Na opção com canteiro central, considere que 20% do fluxo na via principal e 40% do fluxo na via secundária buscam conversões à direita e também necessitam de uma brecha de 4 segundos. Como você reavaliaria os fluxos opostos e a capacidade da via, se não há conversões à esquerda? Avalie qualitativamente a viabilidade das manobras de conversão à esquerda?
- (c)- No caso de usar semáforo com plano usual de 2 estágios (entreverdes: amarelo = 4seg, vermelho total = 2seg, em cada mudança de estágio), qual o tempo de ciclo mínimo em cada período e qual a taxa de verde efetivo total disponível com esses tempos de ciclo? Qual o tempo de ciclo mínimo se o grau de saturação ($X=Q/C$) não deve superar 90%, em nenhum caso? Qual critério você utilizaria para fixar o tempo de ciclo, se apenas um plano de operação pode ser usado ao longo de todo o dia?
- (d)- Qual a taxa de verde efetiva total disponível com tempo de 120 seg. e qual a taxa de verde mínima e máxima alocáveis para cada aproximação, sem gerar sobre-demanda? Qual a repartição de verde pelo critério de alocação proporcional? Avalie a viabilidade das manobras de conversão à esquerda com operação permitida (contra o fluxo oposto) ou protegidas?

SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO:

(a) Sem semáforos, os fluxos secundários devem ocorrer nas brechas do movimento oposto. Quando todos os fluxos cruzam as vias (isto é, não há conversões à direita ou à esquerda), os fluxos secundários são os cruzamentos da via CD apenas. Os cruzamentos de AB são os fluxos prioritários. Se não há canteiro central, toda a manobra deve ser feita em um único movimento, devendo ter brechas nos fluxos de ambos os sentidos da via AB, simultaneamente. Se há um canteiro central, com dimensões suficientes para acomodar um veículo pelo menos, o movimento pode ser feito em etapas, usando brechas nos fluxos opostos de um dos sentidos de cada vez. Naturalmente, podem haver interações entre as etapas de cruzamento (aspectos que serão discutidos adiante).

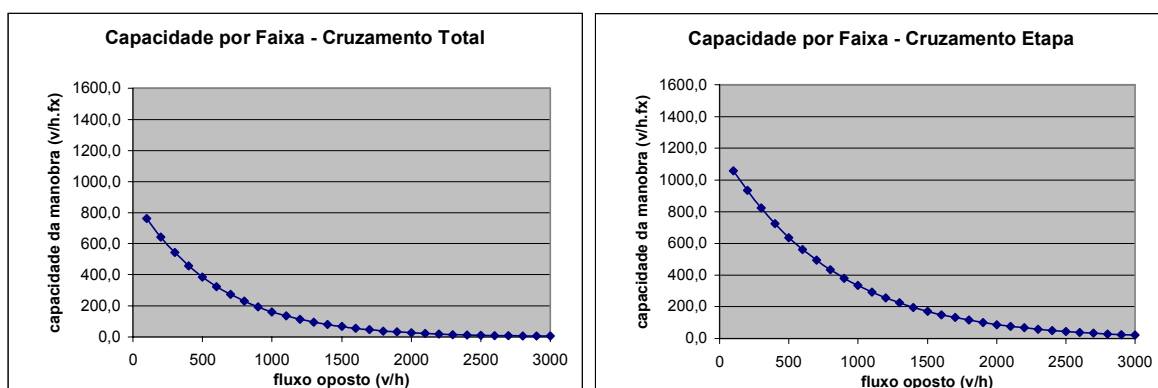
Com os dados de brecha crítica para cada manobra (8 segundos em um movimento ou 6 segundos em etapas), as capacidades podem ser obtidas de uma de duas curvas de capacidade, em função do fluxo conflitante respectivo.

Admitindo a capacidade calculada com o modelo de Poisson e adotando um intervalo de seguimento igual a 4 segundos para o cruzamento total ou de 3 segundos para cada etapa de cruzamento, as curvas de capacidade correspondem às expressões:

$$\text{cruzamento total } (\alpha = 8\text{seg e } \beta = 4\text{seg}): C_2 = \frac{e^{-q_0 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_0 \cdot \beta}} \cdot q_0 = \frac{e^{-q_0/450}}{1 - e^{-q_0/900}} \cdot q_0,$$

$$\text{cruzamento etapa } (\alpha = 6\text{seg e } \beta = 3\text{seg}): C_2 = \frac{e^{-q_0 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_0 \cdot \beta}} \cdot q_0 = \frac{e^{-q_0/600}}{1 - e^{-q_0/1200}} \cdot q_0,$$

onde os valores de brechas foram substituídos em unidades compatíveis com o fluxo conflitante expresso em veículos/hora. As curvas de capacidade resultantes, por faixa da via secundária, são dadas pelos gráficos seguintes:



Para utilizar a curva de capacidade, deve-se ter uma estimativa do fluxo conflitante de cada manobra. No caso do cruzamento total, o fluxo conflitante é a soma dos fluxos principais nos dois sentidos (igual para os fluxos vindos das duas vias secundárias) e a capacidade é obtida na curva correspondente à brecha crítica de 8 segundos. No caso do cruzamento em etapas, cada movimento tem um fluxo oposto (de um dos sentidos) e uma capacidade da etapa, obtida na curva correspondente à brecha crítica de 6 segundos.

Por exemplo, para o período noturno, a manobra de cruzamento total vindo da via C tem fluxo oposto é de 900 v/h e a capacidade (obtida na curva correspondente à brecha de 8 segundos) é de 190 v/h por faixa. Com o canteiro central, a primeira etapa teria fluxo oposto de 500 v/h e capacidade de 640 v/h por faixa e a segunda etapa teria fluxo oposto de 400 v/h e capacidade de 720 v/h por faixa (obtidas na curva correspondente à brecha de 6 segundos). A demanda vinda da via C é de 300 v/h e, portanto, a capacidade com duas faixas, sem canteiro central, seria suficiente. A manobra de cruzamento total vindo da via D, tem o mesmo fluxo oposto e a mesma capacidade de 190 v/h por faixa (dado que a brecha também é a mesma). Com canteiro, sua primeira etapa tem fluxo oposto de 400 v/h e capacidade de 720 v/h por faixa e sua segunda etapa tem fluxo oposto de 500 v/h e capacidade de 640 v/h por faixa (invertendo a capacidade das etapas, dado que as brechas também são as mesmas). A demanda vinda da via D é de 200 v/h e a situação é similar (mas melhor, pela menor demanda).

Repetindo estes cálculos para os diferentes períodos, os resultados podem ser sintetizados como feito na tabela a seguir:

Período	Demanda	Cruzamento Total		Cruzamento Etapa 1		Cruzamento Etapa 2	
		F.Oposto	Cap/faixa	F.Oposto	Cap/faixa	F.Oposto	Cap/faixa
C-Manhã	900	2000	25	1500	170	500	640
Meio-Dia	1000	2100	20	1200	260	900	380
Tarde	400	2600	10	800	430	1800	120
Noite	300	900	190	500	640	400	720
D-Manhã	400	2000	25	500	640	1500	170
Meio-Dia	600	2100	20	900	380	1200	260
Tarde	900	2600	10	1800	120	800	430
Noite	200	900	190	400	720	500	640

Pode-se notar que a demanda de cruzamento na via secundária C supera a capacidade de duas faixas nos períodos diurnos, sem ou com canteiro central (na primeira etapa da manhã e meio-dia e na segunda etapa da tarde). A demanda de cruzamento na via secundária D é menos crítica mas ainda assim supera a capacidade em todos os períodos diurnos (na primeira etapa da tarde e na segunda etapa da manhã e meio-dia). Portanto, a adequação da operação sem semáforos somente poderia ser considerada no período noturno, caso fosse possível implantar um canteiro central com dimensões suficientes para abrigar um veículo e decompor o cruzamento em duas manobras. A interação entre as etapas seria preocupante mesmo no período noturno, além dos problemas eventuais de segurança de trânsito.

Em canteiros centrais, o espaço de acomodação de filas é restrito a alguns poucos veículos. Esta situação limita o grau de utilização da capacidade possível (não há reserva de veículos em fila para garantir maior grau de uso da capacidade). Além disso, a ocupação completa das vagas para acomodação de filas disponível no canteiro central impede a primeira etapa do cruzamento, mesmo na presença de brechas suficientes para a manobra, e causa interferência na etapa anterior de cruzamento (a capacidade na primeira etapa é limitada pela possibilidade de escoar veículos na segunda etapa também, em vista da impossibilidade de acomodar filas extensas no canteiro central).

A etapa posterior do cruzamento (segunda) também pode ser afetada pela operação da outra etapa (primeira) se esta etapa anterior representar um gargalo para a manobra completa de cruzamento (a demanda na segunda etapa é limitada pela capacidade da primeira etapa, novamente em vista da impossibilidade de ter filas extensas no canteiro central).

Normalmente, as brechas críticas para cruzamento total ou em etapas poderiam ser maiores que 8 e 6 segundos, especialmente se a velocidade na via principal fosse significativa. As brechas de cada etapa de cruzamento seriam iguais apenas se a geometria também fosse similar (no caso de uma conversão à esquerda, as brechas seriam diferentes mesmo que a geometria fosse igual porque as manobras de cada etapa seriam diferentes).

(b) Sem semáforos mas com canteiro central, os fluxos secundários podem ocorrer nas brechas do movimento oposto em etapas. Se não há conversões à esquerda em AB e CD, os fluxos secundários são o cruzamento e as conversões à direita e ocorrem na via secundária CD (cruzamento, em etapas, utilizando o canteiro). Cada manobra da via secundária pode ter fluxos opostos diferentes, brechas diferentes e capacidades diferentes. Se há conversões à esquerda, estas serão normalmente fluxos secundários (tanto as conversões à esquerda da via principal quanto da via secundária). A existência de conversões à direita e à esquerda nos fluxos prioritários pode também alterar os valores dos fluxos conflitantes. Note que para as conversões à esquerda da via secundária existem fluxos prioritários conflitantes na via principal (ambos os sentidos) e no sentido oposto da via secundária (como será observado adiante).

As curvas de capacidade para a manobra de cruzamento em etapa já foram obtidas anteriormente (com brecha crítica de 6 segundos e intervalo de seguimento de 3 segundos). Com os dados de brecha crítica para as manobras de conversão à direita, a curva de capacidade correspondente pode ser obtida, em função do fluxo conflitante respectivo, admitindo a capacidade calculada com o modelo de Poisson e adotando um intervalo de seguimento igual a 2 segundos.

No caso das conversões à esquerda, deve-se avaliar qualitativamente a capacidade disponível para cada situação (sem ou com canteiro). As brechas críticas requeridas para conversão à esquerda são superiores ao cruzamento correspondente. Para avaliação qualitativa, será admitida uma brecha de 10 segundos para a conversão à esquerda sem canteiro (intervalo de seguimento de 5 segundos) e de 8 segundos para as conversões à esquerda do canteiro central (intervalo de seguimento de 4 segundos). Esta suposição significa admitir que a conversão à esquerda do canteiro central tem dificuldade similar ao cruzamento total (a menos do fluxo oposto), cuja curva de capacidade também já foi obtida anteriormente. A curva de capacidade para a conversão à esquerda direta (sem canteiro) deve ser obtida e terá maior dificuldade.

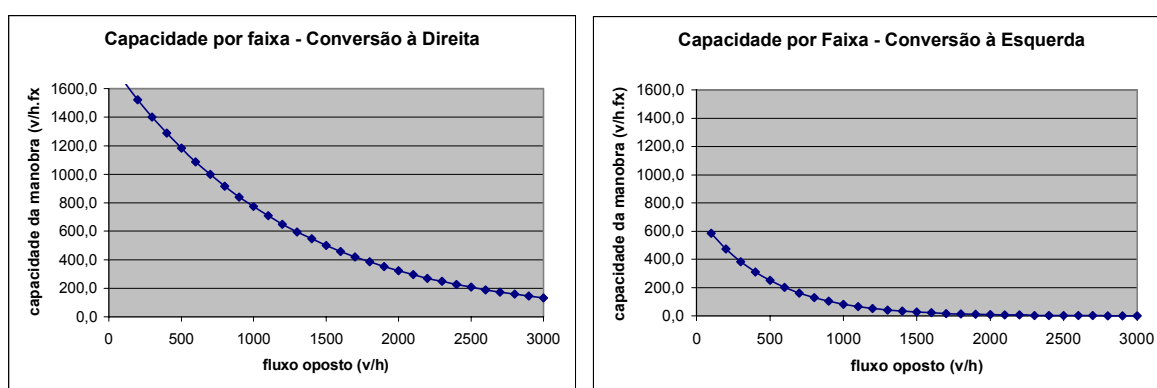
Para vias de múltiplas faixas, existe uma ponderação adicional a ser feita sobre o comportamento dos motoristas, no caso das conversões à esquerda. A manobra normal deveria ser feita para a faixa mais à direita, onde o tráfego é usualmente mais lento, mas isto implica em maior fluxo oposto e maior tempo de manobra. Por este motivo, muitas vezes são observadas manobras forçadas de conversão para a faixa adjacente (mais à esquerda) que é um movimento mais fácil. As brechas adotadas corresponderiam, em princípio, às manobras normais (as manobras forçadas teriam brechas e fluxo opostos menores, portanto capacidade maiores, mas sua ocorrência pode trazer problemas de segurança de trânsito e é tomada como uma indicação de deficiência operacional).

As curvas de capacidade para as conversões à direita (qualquer caso) e para conversões à esquerda sem canteiro correspondem às expressões:

$$\text{conversão à direita } (\alpha = 4\text{seg e } \beta = 2\text{seg}): C_2 = \frac{e^{-q_0 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_0 \cdot \beta}} \cdot q_0 = \frac{e^{-q_0/900}}{1 - e^{-q_0/1800}} \cdot q_0$$

$$\text{total à esquerda } (\alpha = 10\text{seg e } \beta = 5\text{seg}): C_2 = \frac{e^{-q_0 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_0 \cdot \beta}} \cdot q_0 = \frac{e^{-q_0/360}}{1 - e^{-q_0/720}} \cdot q_0$$

onde os valores de brechas foram substituídos em unidades compatíveis com o fluxo conflitante expresso em veículos/hora. As curvas de capacidade por faixa resultantes são dadas pelos gráficos seguintes:



Na situação inicialmente proposta, as conversões à direita são 20% do fluxo na via principal e 40% do fluxo na via secundária e não há conversões à esquerda (em nenhuma das vias). Para utilizar a curva de capacidade, deve-se ter uma estimativa do fluxo conflitante de cada manobra secundária, com o cruzamento em etapas, e existência das conversões à direita modifica esta avaliação.

A primeira consideração diz respeito à repartição do fluxo da via principal entre suas faixas. No caso das conversões à direita da via secundária, será admitido que o fluxo conflitante é metade do total nas duas faixas. No caso dos cruzamentos da via secundária, será adotado o fluxo total das faixas atravessadas em cada etapa. Portanto, está sendo admitida uma repartição igual do fluxo da via principal entre suas faixas.

A segunda consideração diz respeito ao efeito dos veículos do fluxo de conversão à direita principal que não são percebidos pelo movimento secundário (por não sinalizarem ou não iniciarem a manobra) com antecedência suficiente para permitir a manobra, mesmo não sendo conflitantes, o que torna usual discutir a inclusão ou dedução de parte do fluxo de conversão à direita do fluxo oposto (em geral 50%). Estes efeitos foram desprezados e não foram distinguidos a seguir.

Em ambos os casos, as hipóteses devem refletir comportamentos representativos do tráfego real, e que referem-se a aspectos diretamente observáveis da sua operação se o caso analisado corresponde a uma situação existente. A avaliação

de capacidade será tanto mais adequada quanto mais realista forem as hipóteses de comportamento adotadas. Pode-se, então, obter resultados melhores.

Por exemplo, analisando novamente a operação em etapas no período noturno, a manobra de cruzamento tem a mesma capacidade e seu fluxo corresponde a 60% do total, dado que os 40% restantes realizam a manobra de conversão à direita. Para o fluxo vindo de C, a primeira etapa da travessia teria fluxo oposto de 500 v/h e capacidade de 640 v/h por faixa e a segunda etapa teria fluxo oposto de 400 v/h e capacidade de 720 v/h por faixa (obtidas na curva anterior correspondente à brecha de 6 segundos), como antes, enquanto a conversão à direita tem fluxo oposto de 250 v/h e capacidade de 1450 v/h (obtida da curva correspondente à brecha de 4 segundos). Como a primeira etapa do cruzamento e a conversão à direita compartilham a mesma aproximação, a capacidade com a composição de tráfego existente (média harmônica) é de 824 v/h por faixa. A demanda vinda da via C é de 300 v/h (180 v/h de cruzamento e 120 v/h de conversão à direita) e, portanto, a capacidade com duas faixas, com canteiro central, seria suficiente. Para o fluxo vindo de D, a primeira etapa tem fluxo oposto de 400 v/h e capacidade de 720 v/h por faixa e a segunda etapa tem fluxo oposto de 500 v/h e capacidade de 640 v/h por faixa (invertendo a capacidade das etapas, dado que as brechas também são as mesmas), enquanto a conversão à direita tem fluxo oposto de 200 v/h e capacidade correspondente de 1520 v/h. A capacidade compartilhada, por faixa, na aproximação da via D é de 917 v/h. A demanda vinda da via D é de 200 v/h (120 v/h de cruzamento e 80 v/h de conversão à direita) e a situação é similar (mas melhor, pela menor demanda).

Repetindo estes cálculos para os diferentes períodos, os resultados podem ser sintetizados como feito na tabela a seguir:

Período	Demanda	Cruz. 1a. etapa (60%)		Conv. à direita (40%)		Ambas	Cruz. 2a. etapa (60%)	
		F. Oposto	Cap/faixa	F. Oposto	Cap/faixa	Cap/faixa	F. Oposto	Cap/faixa
C-Manhã	900	1500	170	750	950	253,1	500	640
Meio-Dia	1000	1200	250	600	1080	361,0	900	380
Tarde	400	800	430	400	1280	585,5	1800	115
Noite	300	500	640	250	1450	824,2	400	720
D-Manhã	400	500	640	250	1450	824,2	1500	170
Meio-Dia	600	900	380	450	1220	524,4	1200	250
Tarde	900	1800	115	900	840	175,6	800	430
Noite	200	400	720	200	1520	912,0	500	640

Para os cruzamentos, pode-se ver que os fluxos secundários não teriam capacidade adequada nos períodos de pico diurnos em pelo menos uma das etapas, mesmo sem considerar o compartilhamento de faixas com as manobras de conversão à direita nas aproximações das vias C e D. Para as conversões à direita, a capacidade seria suficiente para uma faixa exclusiva de conversões mas, com o uso compartilhado das faixas, a situação é distinta e mesmo a conversão à direita operaria mal (o uso de uma faixa exclusiva para a conversão à direita naturalmente pioraria a situação da manobra de cruzamento).

Considerando ambos os movimentos, a operação diurna sem semáforo não seria normalmente recomendada. O efeito operacional dependeria da duração dos

picos e da possibilidade de criar uma faixa de conversão livre, separada da linha de retenção do semáforo por uma ilha de canalização. Se isso puder ser feito mantendo as duas faixas para a manobra de cruzamento, que permanece semaforizada, haverá uma melhoria ponderável. Entretanto, se nenhuma outra medida fosse cabível, seria recomendável implantar um semáforo no local.

A possibilidade de utilizar o semáforo para indicar uma sinalização de prioridade contínua para a via principal, em certos períodos, permitiria combinar a vantagem de ambas as formas de controle de tráfego em diferentes períodos. Em algumas cidades, existe a prática de operar o semáforo em certos períodos com vermelho (ou amarelo) piscante para a via secundária (a principal receberia a indicação de verde ou verde piscante) como forma de reproduzir a sinalização de prioridade nesses períodos. Outra estratégia é a utilização de amarelo piscante para todas as aproximações (sem sinalizar uma via como principal). Estas estratégias não são regulamentadas no Brasil e que tem aspectos importantes de segurança de tráfego que teriam de ser considerados para decidir ou não pela sua adoção.

Em alguns períodos da noite, os semáforos operam de uma forma bastante ociosa e este recurso seria vantajoso. Analisando apenas o efeito na capacidade de tráfego, pode-se verificar se esta seria uma opção possível para o período noturno, quando os fluxos são menores (deve-se notar, no entanto, que os aspectos de segurança são também mais delicados e importantes nesse período).

Para a via C, o cruzamento teria uma capacidade por faixa de cerca de 650 v/h na primeira etapa (fluxo conflitante de 500 v/h) e 720 v/h na segunda etapa (fluxo conflitante de 400 v/h). A conversão à direita teria uma capacidade por faixa de cerca de 1450 v/h (fluxo conflitante de 250 v/h). Admitindo que existe pouca interferência entre a operação das faixas e que a capacidade dobra com as duas faixas existentes, a demanda de 300 v/h (40% ou 120 v/h à direita), tem-se

$$X = \frac{180}{2.650} + \frac{120}{2.1450} = 17,98\% \Rightarrow C = \frac{300}{0,1798} = 1668 \text{ v/h}$$

Para a via D, o cruzamento teria uma capacidade por faixa de cerca de 720 v/h na primeira etapa (fluxo conflitante de 400 v/h) e 650 v/h na segunda etapa (fluxo conflitante de 500 v/h). A conversão à direita teria uma capacidade por faixa de cerca de 1520 v/h (fluxo conflitante de 200 v/h). Admitindo que existe pouca interferência entre a operação das faixas e que a capacidade dobra com as duas faixas existentes, a demanda de 200 v/h (40% ou 80 v/h à direita), tem-se

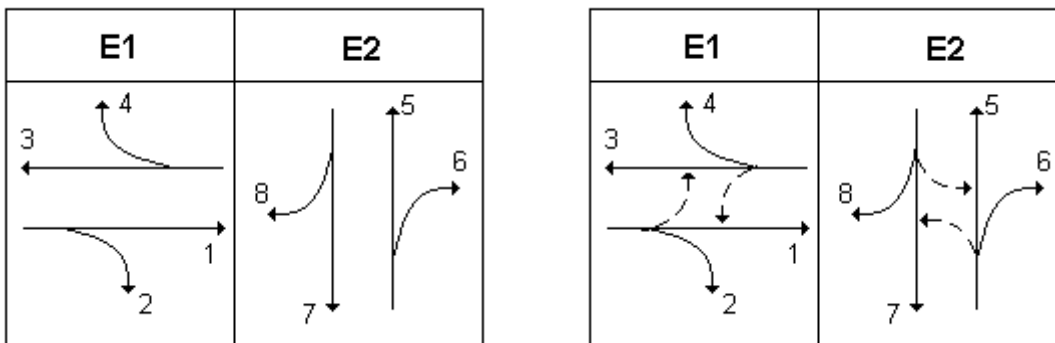
$$X = \frac{120}{2.720} + \frac{80}{2.1520} = 10,97\% \Rightarrow C = \frac{200}{0,1097} = 1824 \text{ v/h}$$

Portanto, mesmo sem a criação de uma faixa de conversão à direita, a operação no período noturno poderia considerar a opção correspondente à sinalização de prioridade, ponderando os aspectos de capacidade e segurança desta opção em relação à alternativa de manter a operação semaforizada normal.

Com relação às manobras de conversão à esquerda, a operação na via principal deve ser analisada antes e não depende da existência de canteiro (um canteiro com baía de conversão seria interessante para evitar o bloqueio de uma faixa de tráfego principal durante a espera por uma brecha no fluxo oposto). Para as conversões da via A, a situação crítica ocorre no pico da tarde, em que o fluxo oposto é de 1800v/h. Para as conversões da via B, a situação crítica ocorre no pico da manhã, em que o fluxo oposto é de 1500 v/h. Em ambos os casos, a capacidade seria bastante reduzida.

Para as manobras de conversão à esquerda na via secundária, a operação sem canteiro parece bastante difícil. O fluxo oposto para as conversões da via C no pico da tarde seria de 3500 v/h (incluindo 900v/h da via D). Na via D seria de 3000 v/h (incluindo 400 v/h na via C). Mesmo a operação com canteiro teria dificuldade maior que a conversão à esquerda da via principal. A primeira etapa, além de ter o mesmo fluxo oposto ainda sobre a interferência da própria conversão à esquerda da via principal (que pára esperando sua brecha). A segunda etapa, embora não tenha interferência, tem de atravessar o fluxo normal da via principal e o fluxo oposto da via secundária.

(b) O plano usual de 2 estágios, dependendo da proibição ou não das conversões à esquerda, utiliza um dos esquemas seguintes:



Os dados de demanda e os fluxos de saturação normalmente são diferentes, em cada período, para cada um dos esquemas. A proibição da conversão à esquerda produz alterações de rota para estes usuários e altera a demanda na interseção e nas suas imediações. O atendimento da conversão à esquerda na interseção com operação permitida (não protegida), faz com que estes usuários tenham que parar e esperar uma brecha no fluxo oposto (o que reduz a sua capacidade e a dos demais fluxos, por causar interferência nos demais usuários).

A conversão à esquerda permitida pode ser também um dos principais problemas de segurança em interseções semaforizadas, especialmente quando a capacidade existente para estas manobras não for suficiente, quando houver problemas de visibilidade do final da fila de veículos que aguarda conversão ou de intervisibilidade entre os veículos da conversão à esquerda e seu fluxo oposto.

Na análise feita a seguir, admite-se que os dados foram fornecidos de forma consistente (isto é, que os dados de demanda e de fluxo de saturação referem-se a um ou outro plano de operação semaforica). A viabilidade das conversões à esquerda permitidas será comentada nos itens adiante.

O tempo de ciclo mínimo é $t_{c,\min} = \frac{t_p}{1 - Y_c}$, onde Y_c é a soma das taxas de solicitação críticas de cada estágio ($Y_c = Y_1 + Y_2$) e t_p é o tempo perdido total. Neste exemplo, considerando o tempo morto igual a 1 segundo menos que o amarelo, $t_p = (4 - 1) + 2 + (4 - 1) + 2 = 10\text{seg}$. Nos planos semaforicos propostos, as taxas críticas de solicitação de cada estágio correspondem à maior entre as taxas de solicitação de cada uma das aproximações que operam no estágio (isto é, $Y_1 = \max\{y_A, y_B\}$ e $Y_2 = \max\{y_C, y_D\}$, onde $y = \frac{Q}{S}$ é a taxa de solicitação).

Por exemplo, no período noturno, tem-se $Y_1 = \max\left\{\frac{500}{3500}, \frac{400}{3500}\right\} = 0,143$ e $Y_2 = \max\left\{\frac{300}{2200}, \frac{200}{2200}\right\} = 0,182$. Portanto, $Y = 0,325$ e $t_{c,\min} = 14,8\text{seg}$. Os dimensionamentos usuais não adotam tempos de ciclo mínimos e os tempos de

verde não devem ser inferiores a 8 segundos, ou valores ainda maiores, em condições normais, independentemente dos tempos de ciclo calculados.

Repetindo estes cálculos para os diversos períodos, os resultados podem então ser obtidos e resumidos como na tabela seguinte:

Períodos	Y_A	Y_B	Y_C	Y_D	Y_1	Y_2	$t_{c,min}$	U_{ef}
Manhã	0,375	0,125	0,300	0,100	0,375	0,300	30,769	0,675
Meio-Dia	0,316	0,237	0,400	0,240	0,316	0,400	35,211	0,716
Tarde	0,200	0,450	0,133	0,300	0,450	0,300	40,000	0,750
Noite	0,143	0,114	0,136	0,182	0,143	0,182	14,815	0,325

Para chegar a um dimensionamento praticável, pode-se impor limites às taxas de utilização de capacidade para todas as aproximações. No caso de adotar

$X_i \leq 90\%$, deve-se ter $y_i/u_i \leq 90\% \Rightarrow u_i \geq y_i/0,90$. Dado X_{pi} , pode-se calcular

$\tilde{y}_i = y_i/X_{pi}$ que é a taxa de solicitação relativa ou aparente, que deve ser

observada quando se deseja ter $X_i \leq X_{pi}$, e fazer $t_{c,90} = \frac{t_p}{1 - \tilde{Y}}$ (onde \tilde{Y} é a taxa de solicitação aparente total, considerando os fluxos críticos de cada estágio).

Por exemplo, para o período noturno novamente, $\tilde{Y}_1 = 0,143/0,90 = 0,159$ e $\tilde{Y}_2 = 0,182/0,90 = 0,202$, resultando em $t_{c,90} = 15,6\text{seg}$. Este valor ainda é muito reduzido e também não seria praticável. Um dimensionamento prático deveria impor as restrições de verde mínimo nos estágios ou adotando uma condição de projeto mais generosa (como $X_i \leq 80\%$), aspectos ignorados adiante.

Repetindo-se os cálculos para todos os períodos, tem-se os resultados sumarizados na tabela seguinte:

Períodos	Y_A	Y_B	Y_C	Y_D	Y_1	Y_2	$t_{c,90}$	U_{ef}
Manhã	0,417	0,139	0,333	0,111	0,417	0,333	40,000	0,750
Meio-Dia	0,351	0,263	0,444	0,267	0,351	0,444	48,913	0,796
Tarde	0,222	0,500	0,148	0,333	0,500	0,333	60,000	0,833
Noite	0,159	0,127	0,151	0,202	0,159	0,202	15,652	0,361

Estes resultados mostram que a interseção operaria com tempos de ciclos reduzidos (uma característica frequente em interseções menos solicitadas). No período noturno, o dimensionamento prático teria de ser totalmente definido em função dos tempos mínimos de verde e dos tempos de entreverdes (isto é, teria de ser utilizado $t = (8 + 4 + 2) + (8 + 4 + 2) = 28\text{seg}$, que satisfaz com folga todas as demais restrições de dimensionamento). No entanto, nem todos os controladores semafóricos permitem variar planos de tráfego (especialmente os mais antigos).

Tendo de utilizar um único plano de tráfego, o critério mínimo seria o de atender a taxa de solicitação máxima de cada um dos estágios ao longo do dia, mesmo que eles não aconteçam simultaneamente no mesmo período, para evitar que ocorressem sobre-demandas em qualquer dos períodos.

No caso do exercício, por exemplo, a taxa de solicitação máxima no E_1 seria de 0,450 no período da tarde, e no E_2 , de 0,400 no período do meio-dia, sendo o tempo de ciclo mínimo igual a $\frac{10}{1 - (0,450 + 0,400)} = 66,7$ seg. Com este tempo de

ciclo, a aproximação crítica no período de maior utilização do seu estágio operaria com $X = \frac{Q}{C} = 100\%$ (nos demais casos haveria uma folga ou ociosidade). A

imposição de $X_i \leq 95\%$ (dado que $X_i \leq 90\%$ levaria a um ciclo muito alto e traria muita ociosidade) implica em um ciclo de $\frac{10}{1 - (0,474 + 0,421)} = 95$ seg, com verde

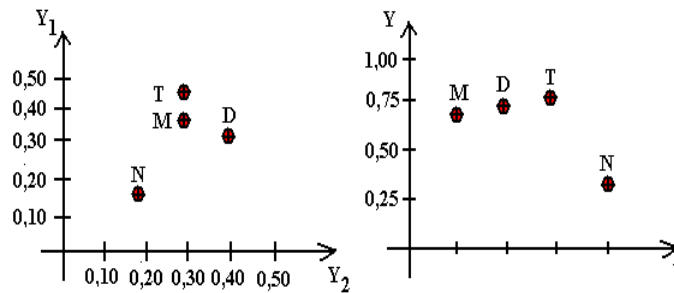
efetivo de 45 seg para o estágio 1 e de 40 seg para o estágio 2 (os verdes de foco são de 44 seg e 39 seg, respectivamente, mais os entreverdes adotados).

Naturalmente um tempo de ciclo maior poderia ser adotado para obter um desempenho melhor, mesmo nas aproximações e períodos críticos. As folgas de capacidade implicam em tempos de ciclos maiores e estes tempos de ciclos majorados acarretam atrasos maiores para os usuários da via. Atualmente, todos os controladores semafóricos permitem variar planos de tráfego e programar a sua utilização através de tabelas de horário, dias da semana e datas especiais.

A substituição dos equipamentos, assim como as opções de dimensionamento, tem de ser traduzidas no impacto nas condições de operação do tráfego para verificar qual é a alternativa que oferece melhor desempenho aos usuários, utilizando os recursos econômicos da sociedade e do governo de forma eficiente.

A delimitação e a definição do número de planos de tráfego a utilizar é normalmente feita através de análises gráficas expeditas. Um recurso útil é a plotagem dos valores das taxas de solicitação críticas de cada estágio (ou dos estágios principais) e das taxas de solicitação globais em cada período. Uma análise mais fundamental pode ser feita verificando as taxas de utilização de capacidade dos movimentos críticos (valores entre 80% e 95% são aceitáveis).

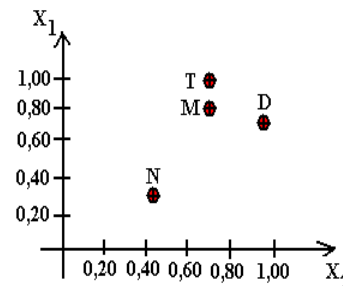
Por exemplo, no caso analisado, teríamos as seguintes representações iniciais:



Pode-se ver que o período noturno é claramente distinto e que, caso fosse necessário eliminar um plano, seria melhor agrupar os picos da manhã e da tarde e manter os períodos do meio-dia e da noite com planos específicos. Note que os movimentos críticos de cada estágio nos picos da manhã e da tarde são inversos mas as taxas críticas correspondentes são similares (embora maiores à tarde).

Se fosse adotado o plano semafórico único com tempo de ciclo de 95 seg, taxa de verde efetivo de 47,4% para o estágio 1 e de 42,1% para o estágio 2 (que corresponde ao dimensionamento anteriormente discutido para ter $X_i \leq 95\%$), as taxas de utilização de capacidade resultantes seriam as seguintes:

Períodos	Y_1	Y_2	X_1	X_2
Manhã	0,375	0,300	0,792	0,713
Meio-Dia	0,316	0,400	0,667	0,950
Tarde	0,450	0,300	0,950	0,713
Noite	0,143	0,182	0,302	0,432



Pode-se ver que haveria alguma ociosidade em todos os períodos, mas o período noturno é, neste aspecto, o mais crítico. A repartição única gera ociosidades indesejadas, maiores no período de pico da manhã (ambos os estágios) mas também presentes nos picos do meio-dia (estágio 1) e da tarde (estágio 2), isto considerando somente os fluxos críticos de cada estágio (os fluxos menos críticos teriam nível de ociosidade ainda maior).

Tanto quanto aumentar a eficiência operacional, a adoção de planos mais detalhados elimina comportamentos indesejados e eventualmente inseguros, como as transgressões intencionais do semáforo vermelho normalmente observadas em vista da ociosidade nos tempos programados. Portanto, é um recurso a ser utilizado sempre que corrigir deficiências importantes.

(d) Para $t_c = 120$ seg., o tempo de verde efetivo disponível é $G_{ef} = t_c - t_p = 110$ seg., que deve ser alocado para E_1 e E_2 , sendo $U_{ef} = \frac{110}{120} = 0,917$, ou seja, 91,7% do tempo de ciclo (portanto, com maior tempo de ciclo, a taxa de verde efetivo disponível é maior e as capacidades poderiam ser majoradas).

Analisando as aproximações A e B em E_1 , para evitar sobre-demandas, a sua taxa de verde mínima é dada pela taxa de solicitação de verde, em cada período ou pelo maior valor ao longo do dia. Nessa condição, a taxa de verde máxima corresponde ao mínimo para os demais estágios, que é a máxima taxa de solicitação em E_2 em cada período ou ao longo do dia.

Na situação mais crítica ao longo do dia, tem-se

$$\begin{aligned} \therefore Y_{1,max} &= 0,45 \text{ e para } E_1 \ g_{ef}^{min,E1} = 0,45 \cdot 120 = 54 \text{ seg.} \\ \therefore Y_{2,max} &= 0,40 \text{ e para } E_2 \ g_{ef}^{min,E2} = 0,4 \cdot 120 = 48 \text{ seg.} \end{aligned}$$

Então, $g_{ef}^{max,E1} = 110 - 48 = 62$ seg $\therefore u_{E1}^{max} = \frac{62}{120} = 0,517$ (um aumento de 13% em relação à $Y_{1,max}$). Ambos os dimensionamentos são suficientes para todas as situações ao longo do dia para A e B.

Analisando agora as aproximações C e D em E_2 , a sua taxa de verde mínima é a maior taxa de solicitação ao longo do dia $\therefore Y_{2,max} = 0,40$ e para E_2 $g_{ef}^{min,E2} = 0,40 \cdot 120 = 48$ seg

A taxa de verde máxima corresponde ao mínimo para o estágio alternado, que é a máxima taxa de solicitação em E_1 ao longo do dia $\therefore Y_{1,max} = 0,45$ e para E_1 $g_{ef}^{min,E1} = 0,45 \cdot 120 = 54$ seg

Então, $g_{ef}^{max,E2} = 110 - 54 = 56$ seg $\therefore u_{E2}^{max} = \frac{56}{120} = 0,467$ (um aumento de 14,3% em relação à $Y_{2,max}$). Aqui também ambos os dimensionamentos são suficientes para todas as situações ao longo do dia para C e D.

Com o critério de alocação proporcional, ter-se ia

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0,45 \text{ e } g_{ef}^1 = \frac{0,45}{0,85} \cdot (120 - 10) = 58 \text{ seg} \Rightarrow u_1 = \frac{58}{120} = 0,483; X_1 = \frac{0,45}{0,483} = 0,93; \\ Y_2 &= 0,40 \text{ e } g_{ef}^2 = \frac{0,40}{0,85} \cdot 110 = 52 \text{ seg} \Rightarrow u_2 = \frac{52}{120} = 0,433; X_2 = \frac{0,40}{0,433} = 0,92; \end{aligned}$$

que corresponde a uma situação de igual grau de saturação para cada movimento crítico (para a interseção também pois $U = \frac{110}{120} = 0,917; X = \frac{0,85}{0,917} = 0,927$).

A operação com sinalização de prioridade somente poderia ser adotada para o período noturno e teria de ponderar aspectos de operação e segurança. Em termos de operação apenas, a comparação poderia ser feita através das estimativas de atraso em ambos os casos.

As fórmulas usuais de estimativa de atraso em fila são:

$$d_p = d_r + d_s = \frac{1}{c_r} + \frac{T_p}{4} \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8 \cdot X}{C \cdot T}} \right] \text{ para vias secundárias;}$$

$$d_p = d_r + d_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1-u)^2}{(1-y)} \cdot t_c + \frac{T_p}{4} \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8 \cdot X}{C \cdot T}} \right] \text{ em semáforos}$$

(tendo-se $X = \frac{y}{u}$, $C = u \cdot S$ para cada aproximação semaforizada)

onde será adotada a duração uma hora para o pico no período noturno. Em ambos os casos, o atraso total acumulado é calculado considerando a demanda específica por $D = Q \cdot d_p$, em veículos-hora/hora. Estes valores correspondem também à fila média no período correspondente.

Para a operação com sinalização de prioridade, os atrasos afetam somente as manobras secundárias, tendo-se as estimativas seguintes:

atraso	cf	C	X	d	Q	D
aprox.C-conversão	1450	1648,3	0,182	2,97	120	0,10
-1a.etapa	640	1648,3	0,182	6,11	180	0,31
-2a.etapa	720	1440	0,125	5,36	180	0,27
aprox.D-conversão	1520	1824,0	0,110	2,61	160	0,12
-1a.etapa	720	1824,0	0,110	5,24	240	0,35
-2a.etapa	640	1280	0,094	5,92	240	0,39

Para a operação com semáforo para $X \leq 90\%$ os atrasos afetam todas as aproximações, tendo-se as estimativas seguintes:

atraso	y	u	X	S	C	d	Q	D
aprox.A	0,159	0,485	0,327	3500	1698,5	19,93	500	2,77
aprox.B	0,127	0,485	0,261	3500	1698,5	18,95	400	2,11
aprox.C	0,151	0,431	0,350	2200	949,0	24,90	300	2,07
aprox.D	0,202	0,431	0,469	2200	949,0	27,65	400	3,07

Portanto, o atraso total acumulado na opção de utilizar a sinalização de prioridade é de 1,5 veículos-hora/hora e na opção de manter o semáforo com o plano de operação normal o atraso acumulado é de 10,0 veículos-hora/hora, o que mostra que, em termos operacionais, a estratégia de usar a sinalização de prioridade seria vantajosa em relação ao semáforo para o período noturno.