

Leitura complementar 2

Semáforo: ser ou não ser inteligente?

Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real

Professor João Cucci Neto, abril de 2015

Apresentação

Este trabalho foi produzido com a intenção de colocar de maneira prática e visual as diferenças entre a operação semafórica em tempos fixos, de uso absolutamente predominante no Brasil, e a em tempo real, mais conhecida pelo nome comercial de “semáforo inteligente”.

A qualificação “inteligente”, no caso dos semáforos, vem sendo aplicada em equipamentos e sistemas que não têm as características técnicas apropriadas. Outro dos objetivos aqui presentes é a de tentar esclarecer o que realmente qualifica um sistema semafórico para que ele possa ser considerado como inteligente.

A sinalização de trânsito no Brasil, não raro, é tratada de forma amadora ou com uso apenas superficial da técnica adequada e, o que é pior, frequentemente em desobediência à legislação.

Em relação à sinalização semafórica a legislação a ser seguida é composta pelo Código de Trânsito Brasileiro e seus anexos e pelo “Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V – Sinalização Semafórica”, publicado pelo Contran como anexo da Resolução 483/14.

Em coerência com o exposto acima, o conteúdo aqui apresentado segue essa legislação.

1. A opção de instalar um semáforo

Assim como para toda a sinalização de trânsito, a decisão pela colocação de um semáforo requer uma avaliação técnica.

O “Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V – Sinalização Semafórica”, que doravante será referido apenas como “Manual”, traz comentários sobre as implicações de se instalar um semáforo e os critérios técnicos detalhados a serem observados para a sua colocação.

O quadro reproduzido a seguir foi extraído do Manual e mostra que o semáforo pode ser uma solução, quando bem utilizado, ou trazer problemas, se implantado de forma não justificada.

IMPLANTAÇÃO JUSTIFICADA	IMPLANTAÇÃO NÃO JUSTIFICADA
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento da segurança viária ✓ Melhoria da fluidez do trânsito, na medida em que promove distribuição adequada dos tempos destinados a cada movimento ✓ Controle do direito de passagem dos movimentos de veículos e pedestres com a consequente redução de conflitos ✓ Redução de atrasos ✓ Credibilidade por parte dos usuários em relação à sinalização 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aumento de ocorrência de acidentes de trânsito ✓ Imposição de atrasos excessivos ✓ Indução ao desrespeito à sinalização devido à ociosidade na operação ✓ Descrédito em relação à sinalização ✓ Gastos desnecessários de recursos públicos

2. Conceitos da operação semafórica

Uma vez que a análise técnica resulte na colocação de um semáforo, é preciso decidir de que forma ele vai operar.

As formas de operação podem ser divididas em: monoplane ou multiplane; isolado ou em rede; centralizado ou não centralizado e tempo fixo ou tempo real.

Vamos ver cada uma delas.

3. Monoplane X Multiplane

A programação de tempos de um semáforo é inserida em uma máquina chamada de controlador semafórico.

Atualmente, os controladores, em sua grande maioria, são eletrônicos (baseados em microprocessadores), o que permite que sejam previstas várias programações ao longo do dia, entre outros recursos.

A possibilidade da existência de várias programações (cuja denominação mais apropriada é “planos”) operando no controlador é o que se denomina como “multiplanos”.

Por outro lado, quando existe um único plano que roda durante todos os dias, temos uma programação monoplane.



4. A programação monopiano

É praticamente impossível encontrar um local onde o trânsito tenha a mesma intensidade durante o dia inteiro.

O normal é que haja variações, sejam elas devido às horas do dia ou aos dias de semana.

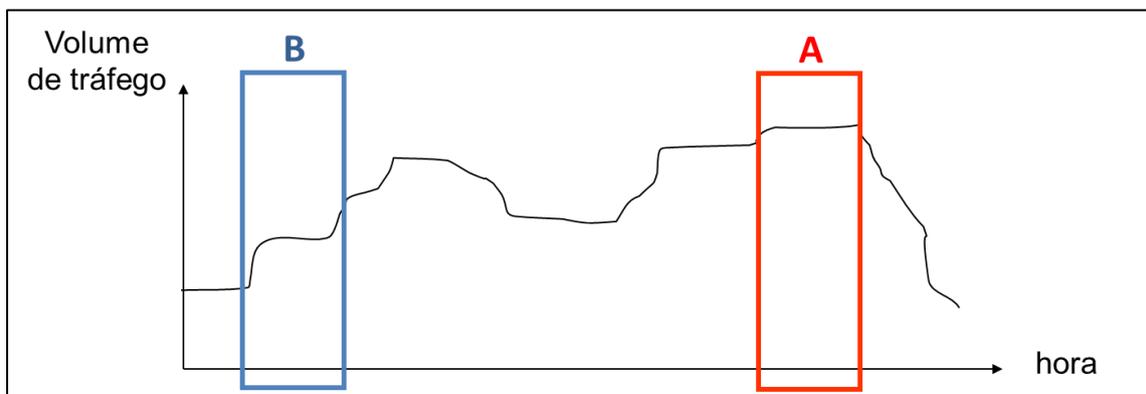
Ou seja, normalmente, o trânsito de um dia útil às 17h00 não tem a mesma intensidade do que em um domingo às 8h00.

Quando se tem apenas um plano, este deve ser dimensionado para o horário crítico do movimento (o de maior demanda do tráfego).

O raciocínio por trás disso é que, se o semáforo mostrou-se necessário, ele deve atender à condição crítica daquele cruzamento, ou seja, a de maior demanda, para garantir que, no pior caso, o trânsito seja administrado corretamente.

Se por um lado essa forma de pensar garante que não ocorram congestionamentos no horário de maior demanda, por outro gera ociosidades em parte do dia.

O gráfico a seguir mostra uma situação genérica, onde vemos que o dimensionamento pelo pico da demanda (seção A) vai gerar ociosidades no período da seção B, pois nesta o volume é muito menor do que em A.

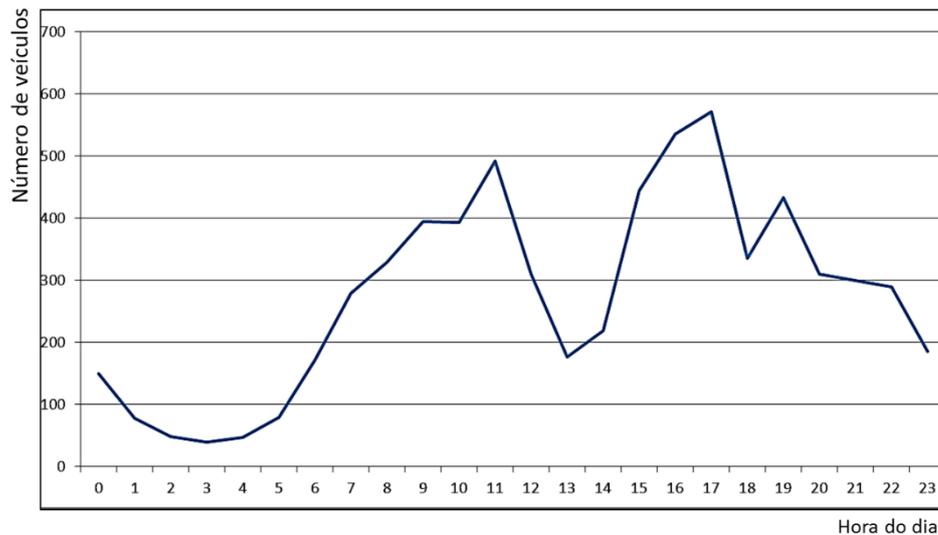


O fato de haver ociosidades é indesejável porque pode levar a acidentes. Os acidentes podem ser gerados pela espera desnecessária e excessiva, eventualmente induzindo ao desrespeito ao semáforo por parte do motorista e do pedestre, que se expõem a sério riscos ao avançar no vermelho. Isso nos leva à conclusão que a programação monopiano não se justifica na maioria dos casos e deve ser preterida pela multiplano.

5. A programação multiplano

O gráfico a seguir foi obtido por meio de um contador automático de veículos instalado na Rua Antônio Carlos, entre as Ruas Haddock Lobo e Bela Cintra, no centro de São Paulo.

O que vemos no gráfico é a variação do volume de trânsito pelas horas do dia, em uma segunda-feira (01.mar.2004).



A análise do gráfico nos mostra como o trânsito variou ao longo do dia, apresentando as configurações típicas de picos e vales. Por ser uma área central e, portanto, o destino final de grande parte do tráfego, o pico da manhã acontece mais tarde em relação ao resto da cidade. O pico da tarde, por outro lado, ocorre em um horário típico (por volta de 17h30).

O vale entre os dois é conhecido como “entre picos”.

O gráfico mostra, ainda, a queda acentuada do fluxo de veículos à noite/madrugada.

Com um controlador capaz de operar em modo multiplano seria possível calcular uma programação semafórica que procurasse acompanhar as variações de demanda, de modo a reduzir as esperas dos usuários nos horários de menor volume. Isso se aplicaria também em relação a cada dia da semana, ou seja, a programação do domingo poderia ser específica, levando em conta a redução que normalmente ocorre no trânsito.

6. Semáforo isolado e em rede

Isolado é aquele que não tem nenhuma relação com os semáforos ao seu redor, ou seja, opera de forma independente.

Normalmente, o semáforo isolado fica distante dos demais (algo na faixa de 300 a 500 metros ou mais) ou, então, opera um cruzamento de forma distinta dos seus vizinhos (uma praça localizada em uma avenida, por exemplo). Em áreas adensadas, como o centro das grandes cidades, predomina a organização dos semáforos em redes.

A seguir uma ilustração sobre uma situação fictícia com três casos de semáforos tipicamente isolados.



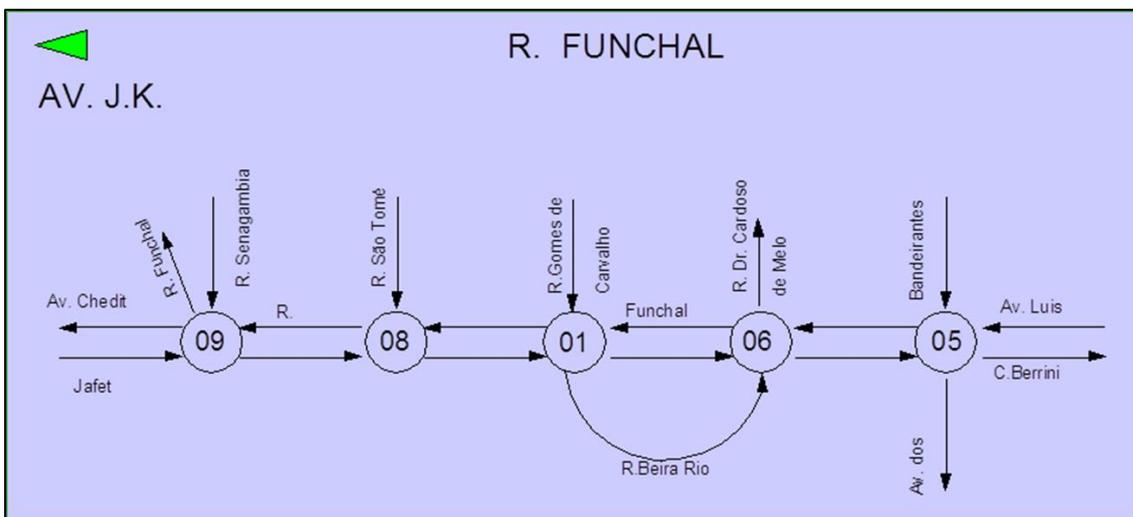
Na figura anterior, nos cruzamentos marcados, se houvesse semáforos, estes seriam isolados, seja pela distância entre eles, seja pela descontinuidade de conexão pelo sistema viário mostrado.

Semáforos em rede são utilizados quando há a necessidade de haver coordenação entre eles, ou seja, quando é importante haver um controle sobre os tempos de abertura ou fechamento de cruzamentos consecutivos.

As redes de semáforos proporcionam a programação de ondas verdes, isto é, a determinação de uma sequência de aberturas que permita que os veículos vençam vários cruzamentos seguidos durante o tempo de verde.

Em geral, os semáforos dos eixos mais importantes das cidades (as avenidas do sistema viário principal) são integrados em redes.

A figura a seguir mostra a configuração de uma rede semafórica.



Para haver uma rede, são necessários dois requisitos: todos os controladores deverão obedecer à mesma referência de tempo e todos operarão com o mesmo tempo de ciclo.

Essas condições são as que asseguram que se possa programar uma onda verde e que ela sempre aconteça da mesma forma, pois, ao obedecer uma única referência de tempo, os controladores estarão sincronizados.

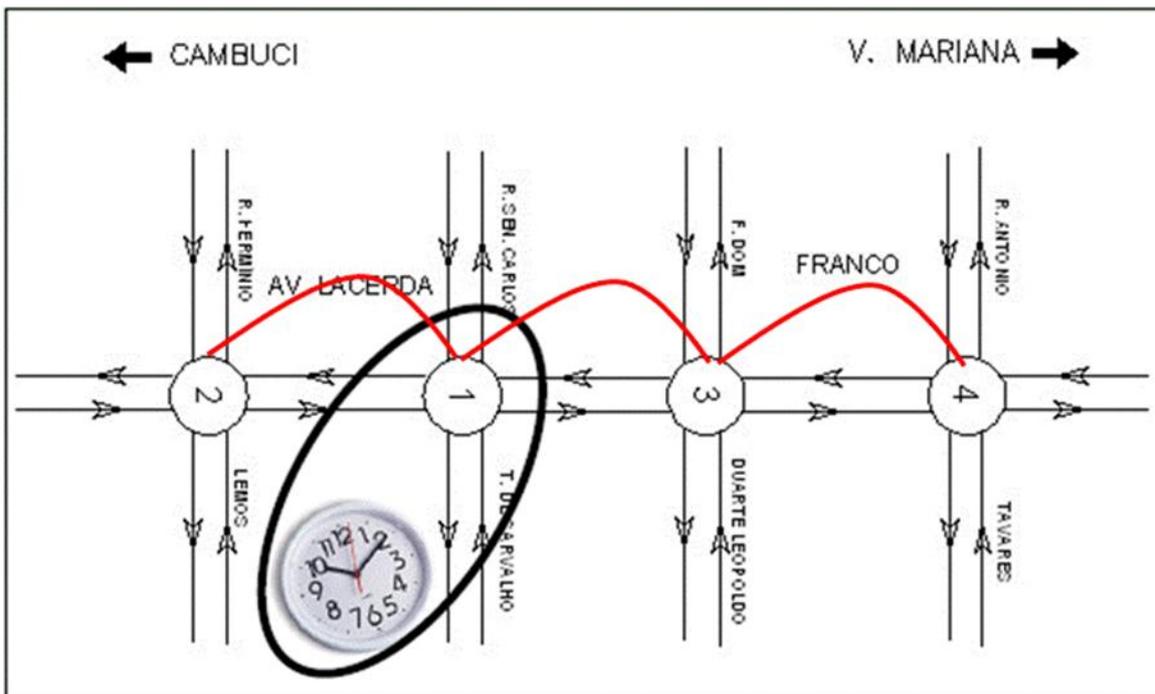
Caso contrário, com relógios trabalhando em ritmos diferentes ou com tempos de ciclo desiguais, à medida que o tempo avançar, os controladores perderão o sincronismo e os instantes de abertura ocorrerão de forma desordenada.

A garantia da referência de tempo pode ser obtida de, pelo menos, três formas:

- com cabo de sincronismo
- acerto de relógio via GPS
- acerto de relógio via computador

6.1. Com cabo de sincronismo

Um dos controladores da rede é configurado como mestre e seu relógio interno é periodicamente passado aos demais via cabo (em vermelho na figura).

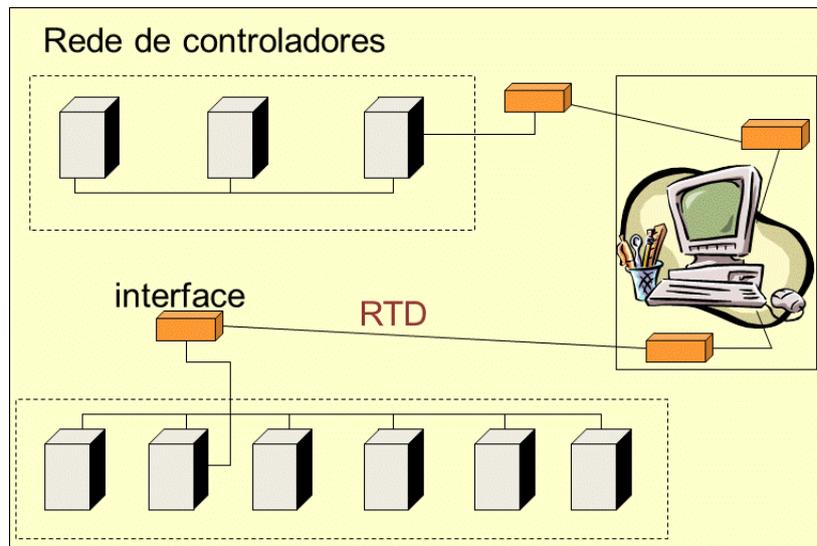


6.2. Acerto de relógio via GPS

O uso do horário captado do GPS possibilita que os controladores estejam sempre sincronizados, o que dispensa a conexão física entre eles. Para tanto, cada controlador da rede deve ter um receptor de GPS.

6.3. Acerto de relógio via computador

Neste caso, a referência de tempo é o relógio do computador, transmitido, em geral, via rede física (RTD – Rede de Transmissão de Dados).



7. Semáforo não centralizado e centralizado

Na figura anterior vemos que há um computador conectado aos controladores. Esse sistema oferece mais recursos do que apenas garantir o sincronismo dos relógios. A esse arranjo, ou seja, computador conectado aos controladores, se dá o nome de “centralização”.

A centralização tem várias vantagens operacionais, tanto em termos de programação quanto de manutenção. Ela permite que se alterem os tempos do semáforo remotamente, a partir de um centro de controle. Essas alterações podem ser duradouras (a atualização da programação de uma rede após uma revisão semafórica, por exemplo) ou transitórias (mudança operacional nos tempos devido a um acidente, por exemplo).

Em termos de manutenção, a principal facilidade é o monitoramento das falhas. No instante em que o controlador apresenta uma falha de funcionamento, um alarme é emitido pelo computador, permitindo o acionamento imediato da manutenção de campo.

Para haver a centralização é necessária uma infraestrutura, composta de um computador dotado de um software específico (em geral, fornecido pelo fabricante dos controladores); uma rede de transmissão de dados (privada ou alugada) e uma sala de operações.

Uma alternativa à rede física é a transmissão e recepção de dados via telefonia celular (GPRS).

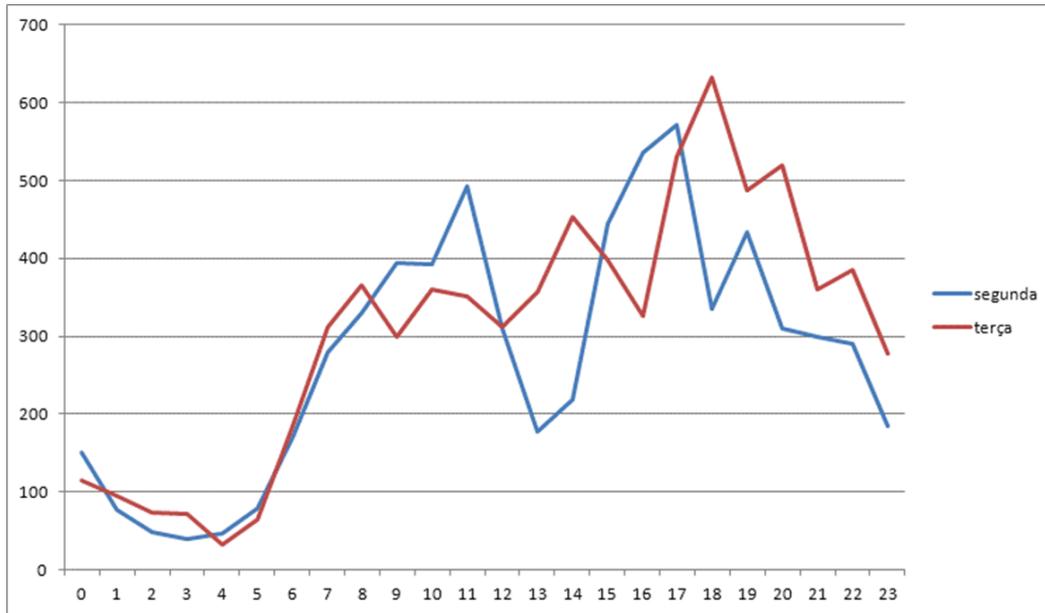
Embora a infraestrutura não demande um investimento muito alto, a maioria dos semáforos do Brasil opera no modo não centralizado.

8. Semáforos em tempos fixos

Como vimos, a demanda do trânsito em uma rua varia conforme o tempo. Um controlador multiplano permite que as programações semafóricas procurem acompanhar a variação da

demanda. Ocorre que as variações de demanda podem ser em uma dimensão maior do que alguém imaginaria à primeira vista.

O gráfico a seguir foi mostrado anteriormente, só que agora foi incluída a variação do trânsito no dia seguinte (terça, 2.mar.14).



Podemos notar que os gráficos indicam comportamentos bem distintos a partir das 8h30 da manhã.

Essa variação é natural, pois existem fatores diversos que interferem na demanda do tráfego. O fato é que o trânsito apresenta um forte componente aleatório, que inclui eventos como chuva; acidentes; manifestações; obras; aspectos locais, como o tipo do uso do solo (comercial, industrial, residencial, misto); a composição do trânsito (tipos de veículos predominantes); o sistema viário (vias largas ou estreitas, malha viária regular ou irregular), entre outros.

Uma forma de exemplificar o quanto as aleatoriedades interferem no comportamento do tráfego está na história do primeiro modelo de cálculo do tempo de ciclo de um semáforo, desenvolvido pelo Engenheiro inglês Webster, na década de 50.

A demonstração matemática de Webster resultou no modelo reproduzido a seguir.

$$Tc = \frac{Tp}{1 - \Sigma Y}$$

Onde: Tc é o tempo de ciclo; Tp é o tempo perdido (basicamente a soma dos amarelos e dos vermelhos gerais) e Y é a taxa de ocupação das vias envolvidas.

O modelo inicial de Webster mostrou-se inadequado, pois os ciclos resultantes geravam congestionamentos. O problema do primeiro modelo é que não havia folga no tempo calculado para compensar as aleatoriedades do trânsito.

Depois de vários testes, Webster chegou ao modelo final, que, após a inclusão de tempos de folga, se mostrou operacional.

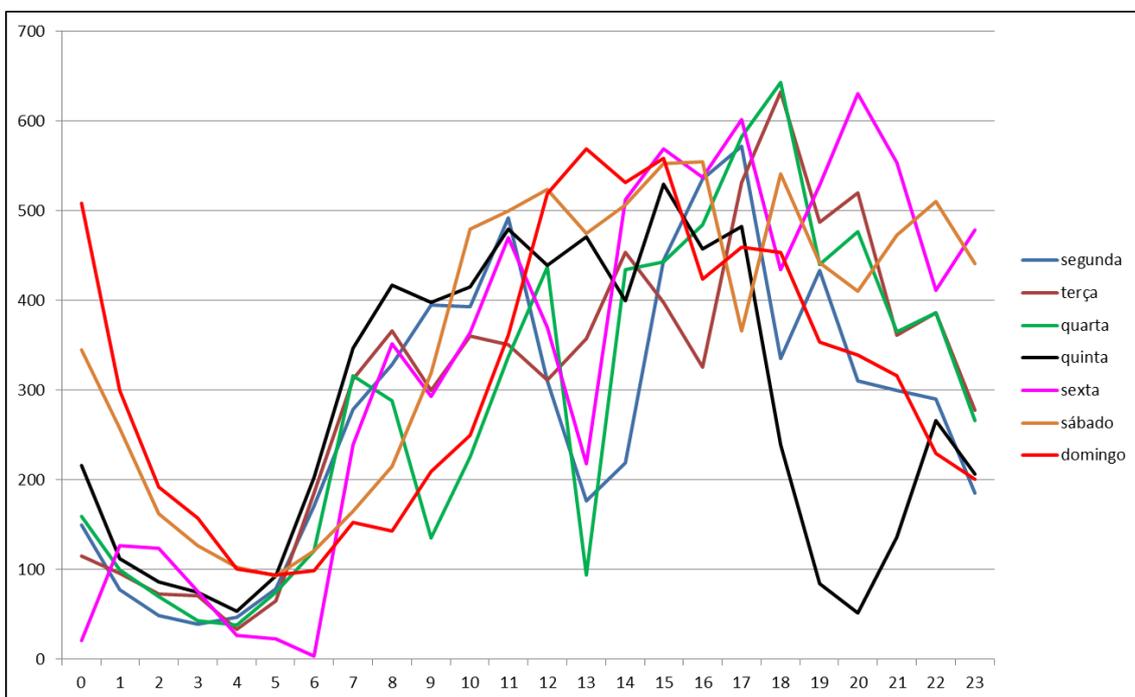
$$Tc = \frac{1,5 \cdot Tp + 5}{1 - \Sigma Y}$$

Portanto, a compensação devido à aleatoriedade foi na monta de um aumento de 50% no tempo perdido e mais 5 segundos!

9. A formação de uma tabela horária

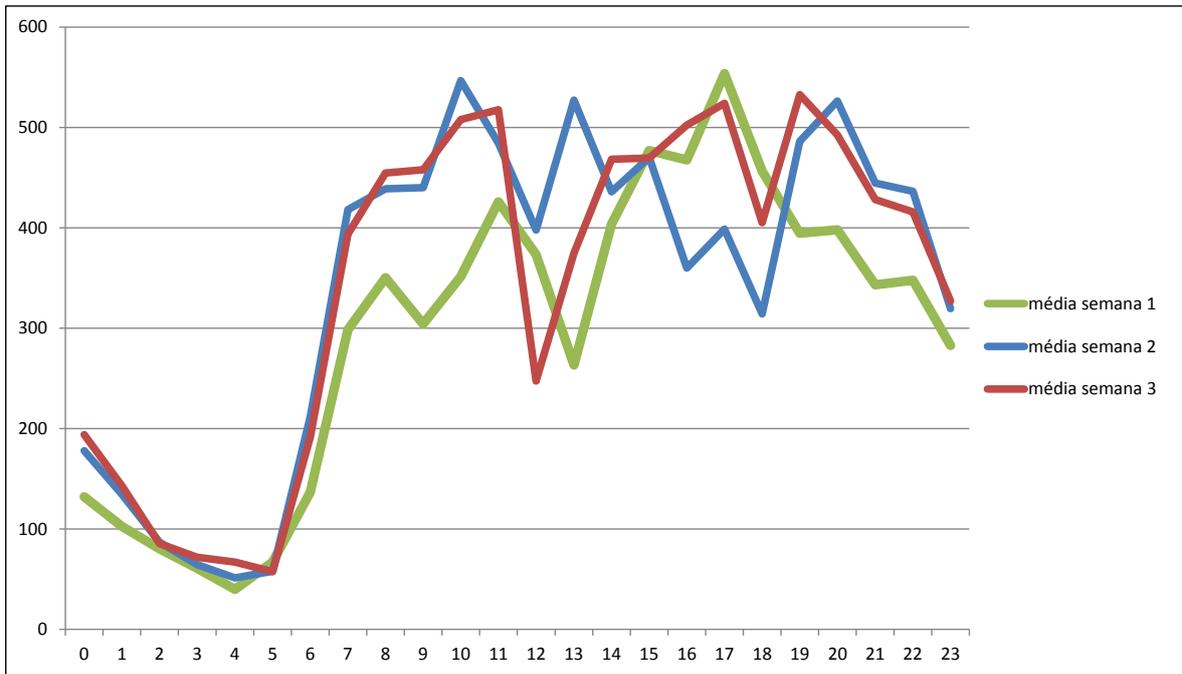
Voltando à questão da programação multiplanos buscando acompanhar a variação da demanda, vamos iniciar o processo que resultará na descrição do que é uma tabela horária.

Os três gráficos a seguir foram extraídos da mesma fonte de dados dos dois anteriores (contadores automáticos na R. Antônio Carlos), sendo que o primeiro deles traz os volumes de todos os dias de uma semana (de 01 a 07 de março de 2004).

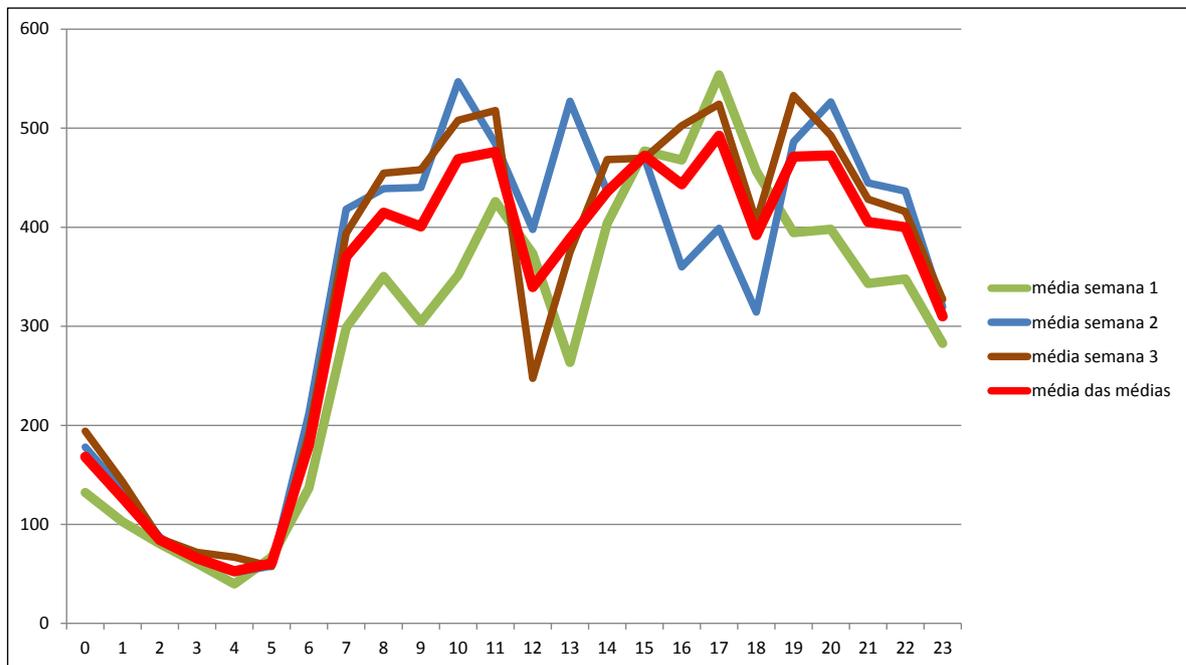


Conforme citado anteriormente, as características de cada local devem ser levadas em conta na análise da demanda.

O gráfico anterior reflete uma dessas características locais: trata-se de uma região de vários restaurantes e casas noturnas, o que intensifica o movimento nos finais de semana. Podemos verificar no gráfico um fluxo maior do que nos demais dias após as 22h00 da sexta e do sábado. A programação semafórica poderia prever tempos de ciclos específicos para esse caso.



Temos no segundo gráfico uma comparação entre as médias de volume de três semanas (2ª a 6ª) consecutivas. É possível notar um comportamento bem diferente entre a segunda semana e as demais.



A linha vermelha mostra a média das 3 semanas apontadas no gráfico anterior.

Cabem alguns comentários em relação aos gráficos anteriores:

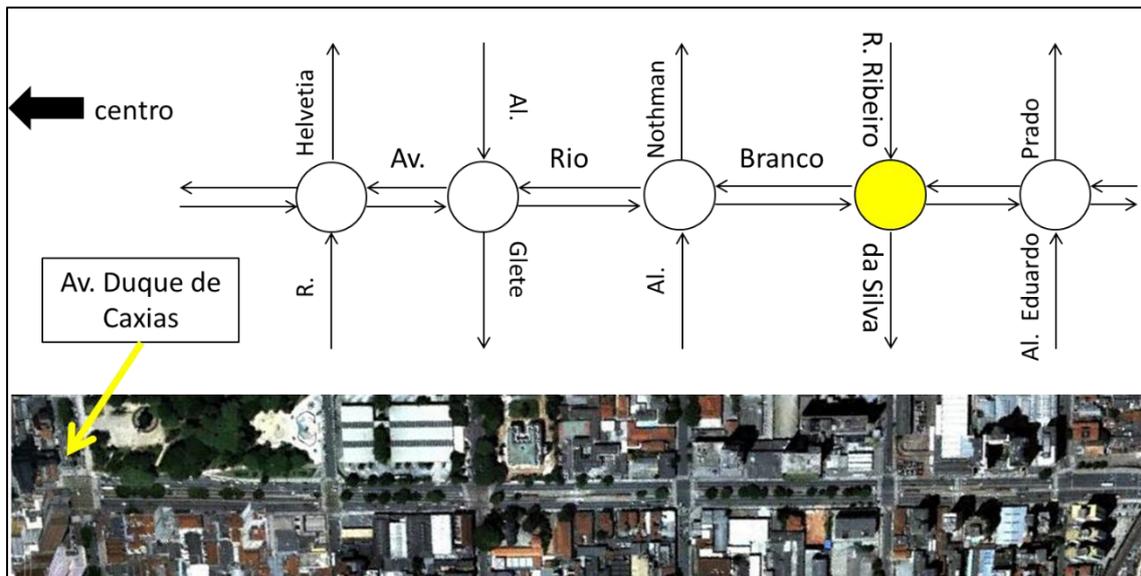
- o comportamento diferenciado na segunda semana precisaria ser investigado antes de seus dados de volume serem considerados nos cálculos, pois não é normal ocorrer uma variação tão grande entre semanas. Pode ter havido algum evento específico, como uma obra, inauguração ou algo do gênero e que tornou o volume atípico.
- a queda de volume por volta das 12h00 deve-se a outra particularidade do local: a presença de uma escola próxima, que tem intenso movimento. A outra queda acentuada, as 18h30, é reflexo da lentidão do pico da tarde.

Diante de todas essas variações, como elaborar programações que atendam a todos os casos?

A resposta é a mesma que Webster indicou: trabalhando com folgas e médias.

Para exemplificarmos como as programações podem ser elaboradas e como os planos típicos geram uma tabela horária, vamos analisar o caso de uma rede semafórica da Av. Rio Branco, na região central de São Paulo.

Os cinco cruzamentos mostrados na figura a seguir formam uma rede. Será gerada a tabela horária do cruzamento em destaque (Av. Rio Branco X R. Ribeiro da Silva).



Vista da Av. Rio Branco, no trecho da rede em questão



Vista do cruzamento Av. Rio Branco X R. Ribeiro da Silva

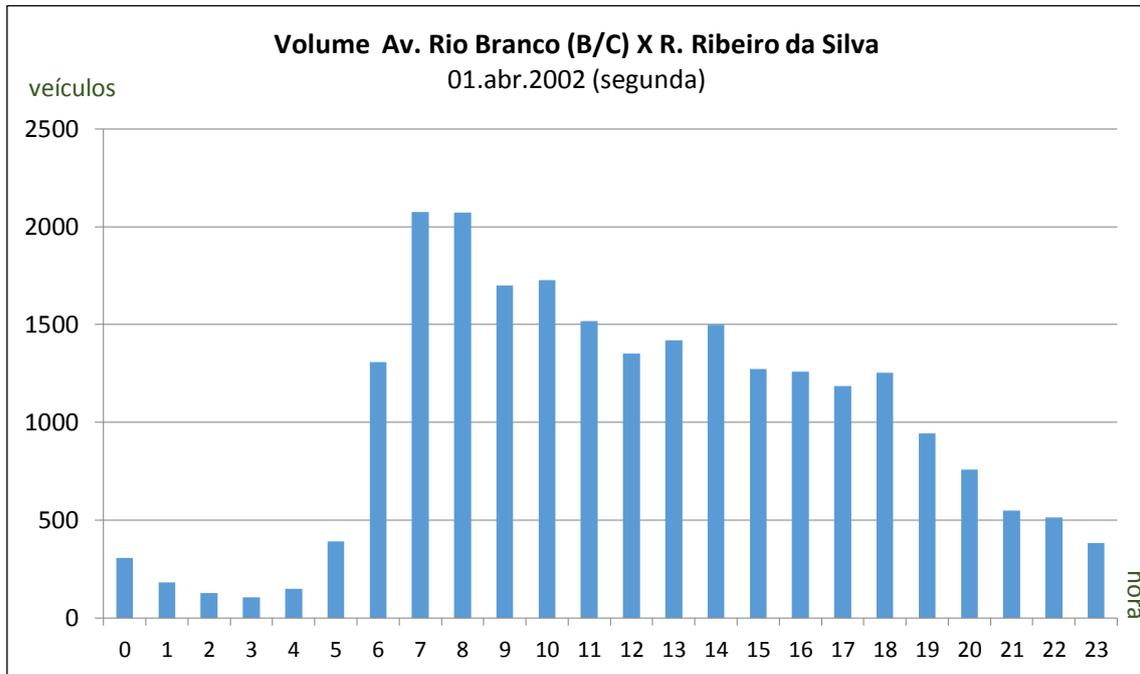
O cruzamento Av. Rio Branco X R. Ribeiro da Silva tem as seguintes características:

- na Av. Rio Branco há corredor de ônibus na esquerda;
- embora a foto mostre duas faixas veiculares na avenida, recentemente ela foi rebalizada e apresenta três faixas por sentido, além do corredor de ônibus;
- o semáforo opera com três estágios: verde para a Rio Branco; estágio de pedestres e verde para a Ribeiro da Silva;
- A Ribeiro da Silva tem forte movimento de conversão à esquerda, sentido bairro.

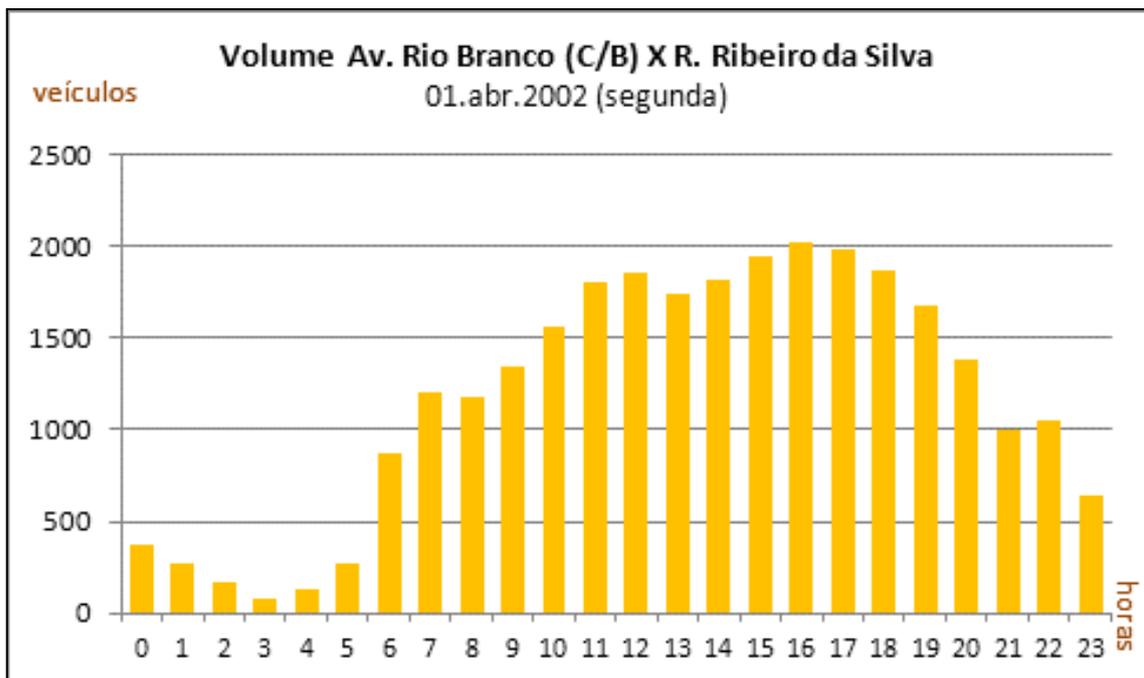
Para os cálculos semafóricos foram utilizados os seguintes valores

- Fluxos de Saturação (FS): para a Av. Rio Branco, 4.500 veíc/h e para a R. Ribeiro da Silva, 3.500 veíc/h;
- esses valores são decorrentes das características específicas das vias. A redução da largura das faixas na Rio Branco elevou o atrito lateral, o que interfere no rendimento; no caso da Ribeiro da Silva, a questão já citada da conversão à esquerda também interfere no rendimento de saída;
- os entreverdes são de 6 segundos para os veículos; o estágio de pedestres tem 11 segundos no total, o que resulta em 23 segundos de tempo perdido no ciclo.

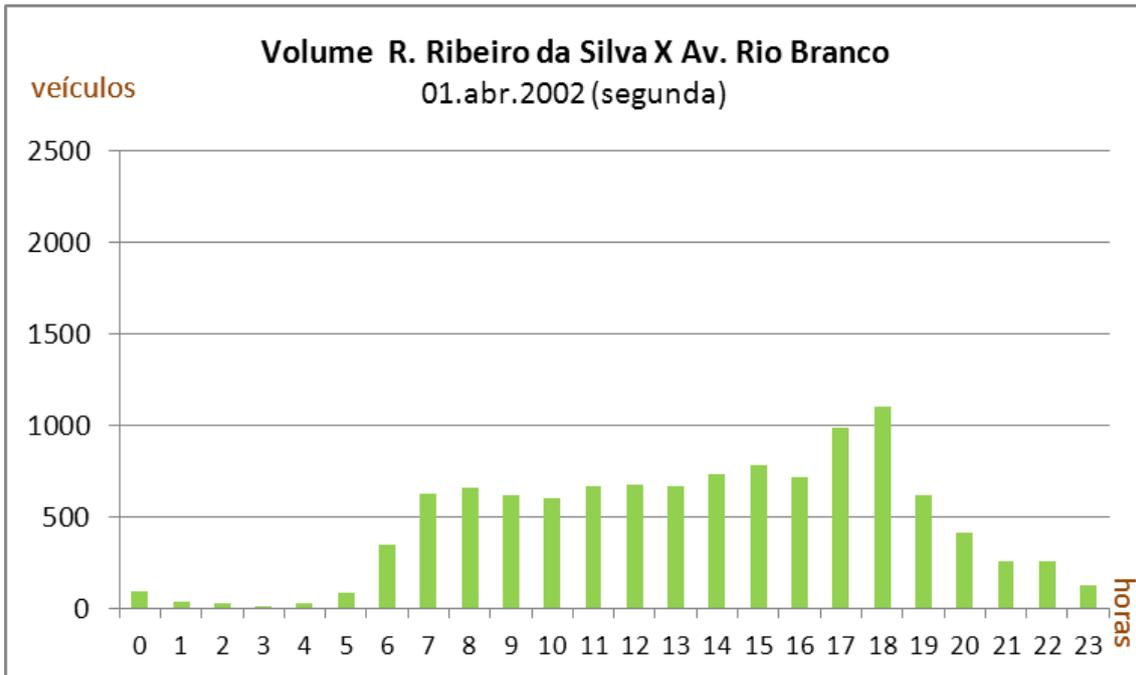
Os gráficos a seguir trazem a variação de demanda (um para cada sentido) da Av. Rio Branco no cruzamento em questão, obtidos por meio de contadores automáticos.



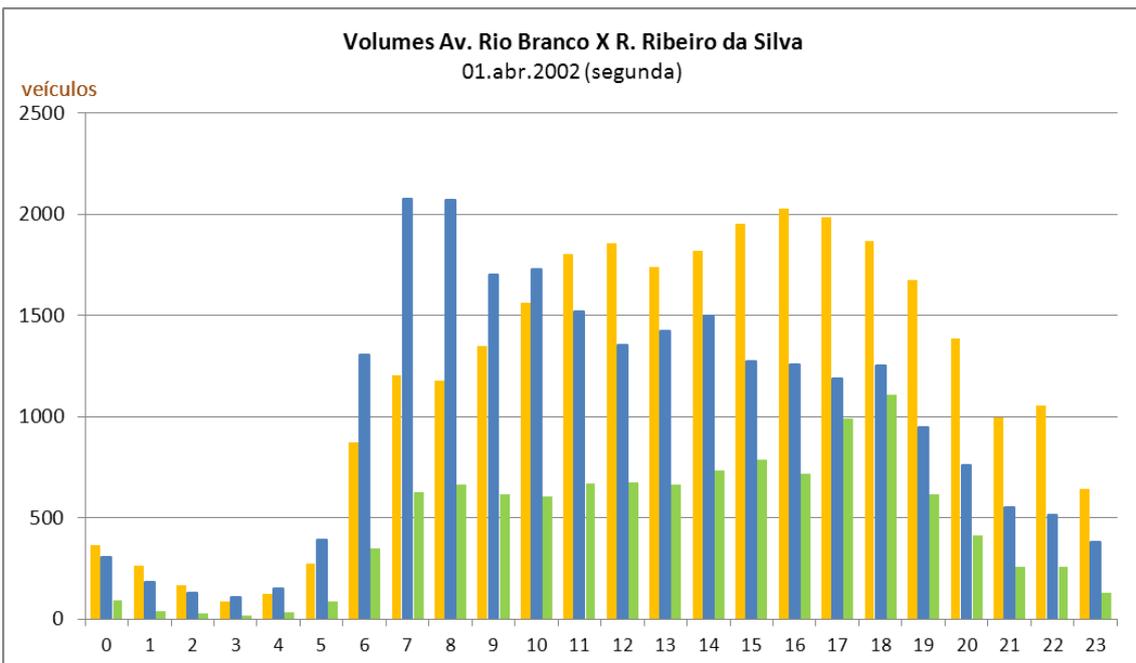
É possível verificar que os volumes dos dois sentidos tem picos em horários diferentes: o sentido bairro-centro (gráfico anterior) tem maiores volumes na parte da manhã, o oposto do que ocorre na figura seguinte, que apresenta maiores volumes à tarde.



O volume da transversal (R. Ribeiro da Silva) é bem menor do que os da avenida, além de apresentar uma certa estabilidade entre 7h00 e 16h00 (gráfico seguinte).

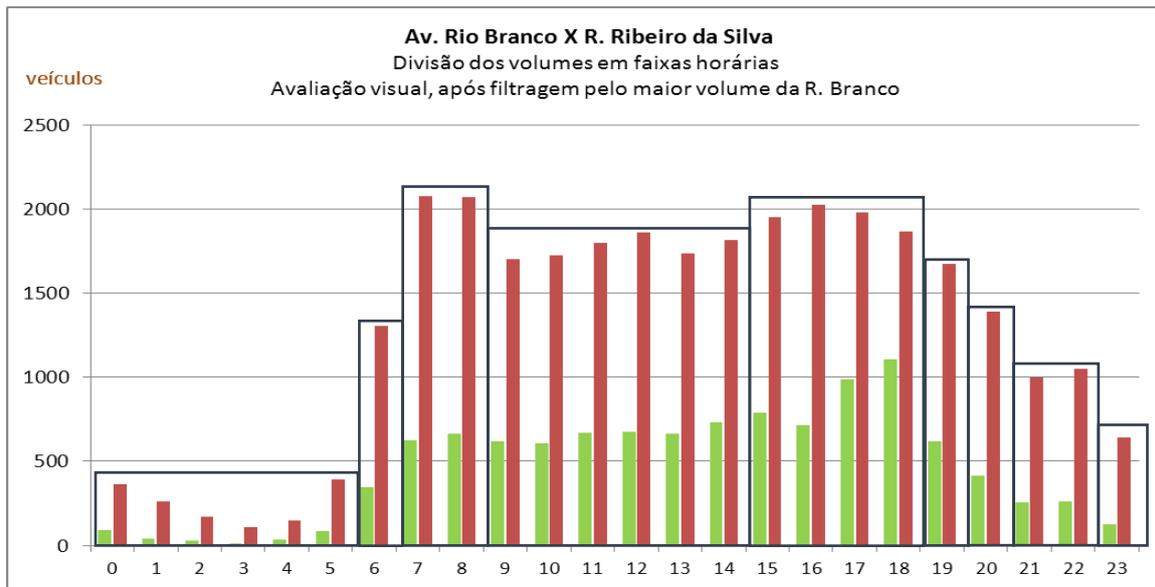


No próximo gráfico estão reunidos os volumes das três aproximações que compõem o cruzamento. A partir desses dados, podemos propor uma programação que acompanhe as variações de volume do cruzamento ao longo do dia.

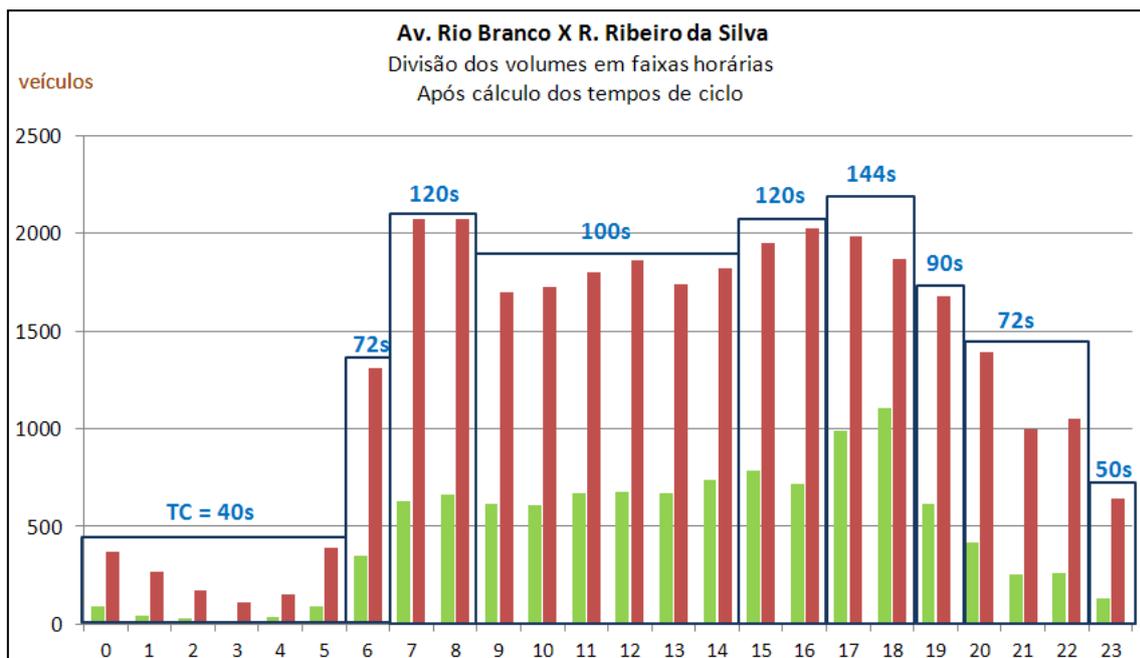


Os maiores volumes entre os dois sentidos da Av. Rio Branco e o da transversal (em verde) foram destacados no gráfico a seguir. Os retângulos em azul formam uma tentativa de agrupar

os volumes por faixas horárias de comportamento semelhante. Essa divisão foi baseada em uma avaliação apenas visual.



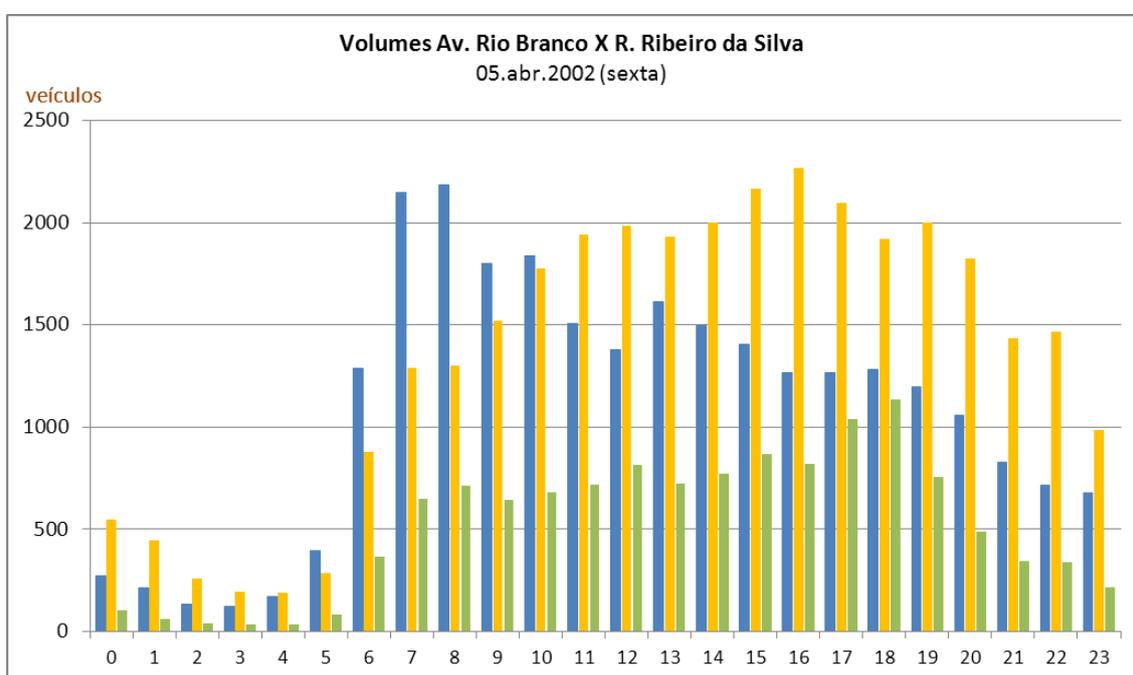
O que temos a seguir são divisões em faixas típicas após o cálculo dos tempos de ciclo, detalhados na tabela à frente. As diferenças entre as divisões dos gráficos anterior e posterior aparecem a partir da 15h00, o que indica que não se deve decidir sobre a repartição das faixas horárias típicas baseado apenas em uma avaliação visual.



A tabela a seguir traz, hora a hora, os volumes dos três detectores utilizados, as taxas de ocupação de cada aproximação, os tempos de ciclo de cada horário, calculados via Webster e o agrupamento entre ciclos próximos. Esse agrupamento seria a tabela horária para esse cruzamento, nas condições da contagem.

Faixa horária	Detector D01321 (RB b/c)	Detector D01323 (RB c/b)	Detector D01322 (RS)	Taxa Ocupação RS	Fluxo crítico RB	Taxa de ocupação da RB	Taxa Ocupação total	TC calculado (Webster)	TC tabela horária
0	306	366	92	0,02	366	0,07	0,09	44	40
1	183	264	39	0,01	264	0,05	0,06	42	
2	128	169	29	0,01	169	0,03	0,04	41	
3	107	84	15	0,00	107	0,02	0,02	41	
4	149	125	33	0,01	149	0,03	0,04	41	
5	392	274	86	0,02	392	0,08	0,10	44	72
6	1307	872	348	0,07	1307	0,26	0,33	65	
7	2075	1202	625	0,13	2075	0,42	0,54	110	120
8	2072	1175	664	0,13	2072	0,41	0,55	113	
9	1700	1347	617	0,12	1700	0,34	0,46	89	100
10	1726	1563	607	0,12	1726	0,35	0,47	89	
11	1518	1800	670	0,13	1800	0,36	0,49	97	
12	1351	1858	677	0,14	1858	0,37	0,51	100	
13	1421	1736	666	0,13	1736	0,35	0,48	93	
14	1499	1818	734	0,15	1818	0,36	0,51	102	120
15	1273	1950	787	0,16	1950	0,39	0,55	116	
16	1258	2027	717	0,14	2027	0,41	0,55	115	144
17	1187	1982	990	0,20	1982	0,40	0,59	143	
18	1253	1866	1106	0,22	1866	0,37	0,59	147	90
19	945	1674	617	0,12	1674	0,33	0,46	87	
20	758	1388	415	0,08	1388	0,28	0,36	69	72
21	549	998	256	0,05	998	0,20	0,25	56	
22	515	1052	259	0,05	1052	0,21	0,26	57	
23	383	644	127	0,03	644	0,13	0,15	48	50

Entretanto, o dia utilizado no exemplo foi uma segunda-feira. Em São Paulo, em geral, a segunda-feira apresenta volumes ligeiramente menores do que nos demais dias. Para possibilitar uma comparação, em seguida foi dado tratamento semelhante aos volumes obtidos na sexta-feira da mesma semana. Esses volumes estão representados no próximo gráfico.



Esse gráfico mostra as contagens agrupadas das três aproximações do cruzamento em análise, obtidas na sexta-feira da mesma semana em que foram colhidos os dados anteriores.

Conforme esperado, os valores obtidos na sexta-feira da mesma semana foram ligeiramente maiores do que os da segunda.

De forma análoga ao que foi feito para a segunda-feira, o quadro seguinte traz os dados de fluxo e dos tempos de ciclo obtidos, mantendo-se as demais variáveis. Em seguida é apresentada uma comparação entre as duas tabelas horárias calculadas: a de segunda-feira X a de sexta-feira.

Faixa horária	Detector D01321 (RB b/c)	Detector D01323 (RB c/b)	Detector D01322 (RS)	Taxa Ocupação RS	Fluxo crítico RB	Taxa de ocupação da RB	Taxa Ocupação total	TC calculado (Webster)	TC tabela horária
0	270	547	104	0,02	547	0,11	0,13	47	50
1	212	444	58	0,01	444	0,09	0,10	45	
2	130	258	37	0,01	258	0,05	0,06	42	
3	120	196	31	0,01	196	0,04	0,05	42	
4	170	186	35	0,01	186	0,04	0,04	42	
5	394	286	82	0,02	394	0,08	0,10	44	72
6	1289	877	365	0,07	1289	0,26	0,33	65	
7	2149	1288	646	0,13	2149	0,43	0,56	117	120
8	2184	1299	714	0,14	2184	0,44	0,58	127	
9	1800	1518	642	0,13	1800	0,36	0,49	95	
10	1839	1777	679	0,14	1839	0,37	0,50	99	
11	1508	1939	717	0,14	1939	0,39	0,53	108	
12	1375	1984	815	0,16	1984	0,40	0,56	121	
13	1611	1933	721	0,14	1933	0,39	0,53	108	
14	1494	1998	771	0,15	1998	0,40	0,55	118	144
15	1406	2166	868	0,17	2166	0,43	0,61	146	
16	1268	2266	821	0,16	2266	0,45	0,62	151	160
17	1266	2095	1040	0,21	2095	0,42	0,63	166	
18	1280	1920	1134	0,23	1920	0,38	0,61	158	120
19	1194	2001	753	0,15	2001	0,40	0,55	116	
20	1056	1823	489	0,10	1823	0,36	0,46	87	90
21	826	1436	342	0,07	1436	0,29	0,36	68	
22	716	1467	337	0,07	1467	0,29	0,36	68	
23	675	984	217	0,04	984	0,20	0,24	55	60

Faixa horária	TC tabela horária	TC tabela horária
0	40	50
1		
2		
3		
4		
5	72	72
6		
7	120	120
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14	120	144
15		
16		
17	144	160
18		
19	90	120
20		
21		
22	72	90
23		
23	50	60

A comparação nos mostra que os tempos de ciclo da sexta-feira (coluna da direita), de um modo geral, são maiores do que na segunda (coluna do meio). Isso é reflexo dos fluxos maiores que ocorrem em São Paulo, às sextas-feiras.

Os horários de entrada dos planos permanecem os mesmos, com uma única exceção.

Uma programação multiplanos pode ser confeccionada para atender variações como essa, ou seja, adaptadas às flutuações dos volumes ao longo da semana, mesmo entre os dias úteis.

O próximo quadro mostra a tabela horária que roda oficialmente na rede da Av. Rio Branco, para os dias úteis.

Como pode ser visto, o ciclo de 135s é utilizado durante grande parte do dia.

A denominação em diferentes planos (de 1 a 5) mas de mesmo

ciclo, indicam mudanças em outras variáveis, como divisão de verde e instantes de abertura.

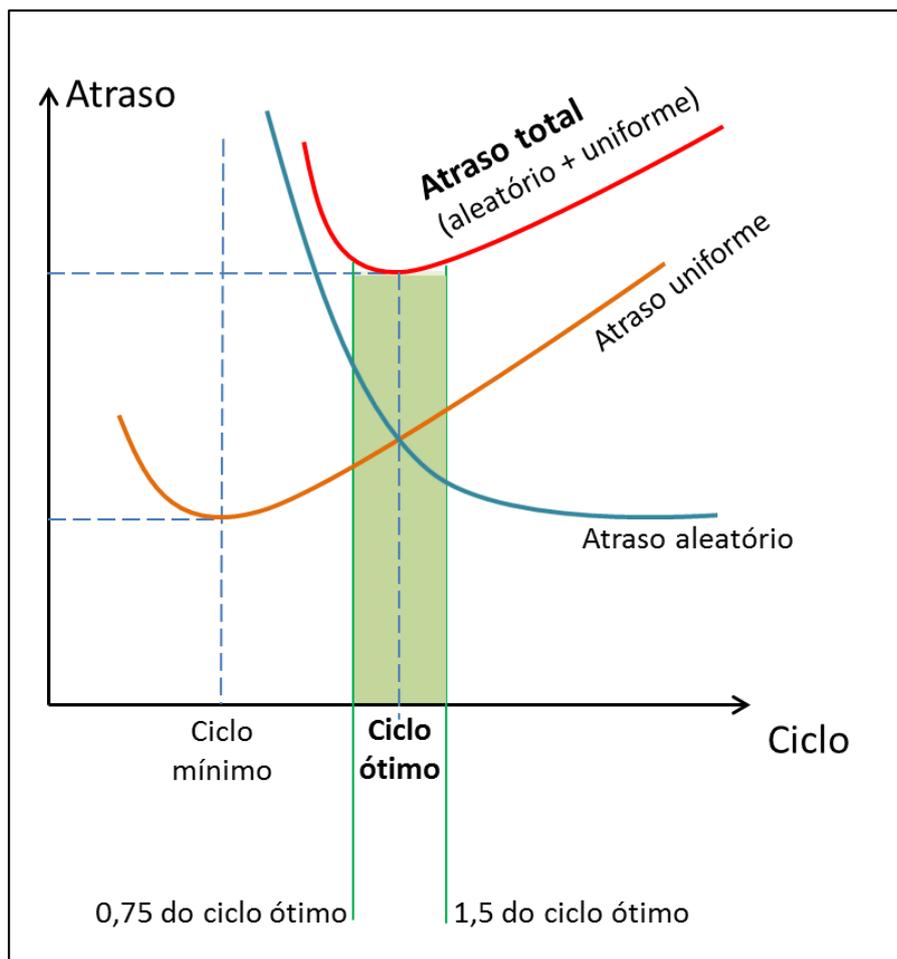
Vale lembrar que essa tabela é para toda a rede e não apenas para um de seus cruzamentos, como era o caso das análises mostradas até então, em que focalizamos somente a Av. Rio Branco X R. Ribeiro da Silva. Na hora de compor a tabela para toda a rede, como é necessário equalizar os tempos de ciclo para todos os cruzamentos, mais adaptações são realizadas, embutindo novas folgas e médias ao processo.

A utilização de um ciclo um pouco menor ou um pouco maior do que o ciclo ótimo calculado, não se constitui um problema (desde que os tempos de verde sejam corretamente dimensionados), conforme mostra o gráfico seguinte.

horário entrada plano	número do plano	tempo de ciclo (S)
6h27	1	135
9h27	2	135
11h33	3	135
14h06	4	135
16h30	5	135
20h00	6	100
22h00	7	80

Esse gráfico traz a representação das curvas de variação dos atrasos gerados em um semáforo (o atraso uniforme e o atraso aleatório). A soma dos dois atrasos (atraso total) está representado pela curva na cor vermelha

Podemos observar que, na faixa compreendida pela área verde do gráfico, uma variação em torno do tempo de ciclo ótimo gera uma variação mínima no atraso total.



Conforme comentário anterior, na faixa entre 0,75 e 1,5 do ciclo ótimo calculado, o atraso total sofre uma variação mínima, o que permite flexibilizar o tempo de ciclo a ser adotado em uma programação, sem que isso gere prejuízos significativos ao trânsito. Vale ressaltar que a curva mostrada para o atraso aleatório indica chegadas dispersas, como as de um semáforo isolado.

Retomando o conceito de rede, vamos lembrar que nela o tempo de ciclo deve ser o mesmo para todos os cruzamentos.

O tempo de ciclo que deve ser utilizado em uma rede é aquele que atende ao seu cruzamento crítico. Cruzamento crítico é aquele que, quando efetuados os cálculos separadamente, apresenta o maior tempo de ciclo entre os componentes da rede.

No exemplo a seguir temos uma rede com quatro cruzamentos, cujos tempos de ciclo (em segundos) foram calculados separadamente e que estão representados internamente aos círculos.



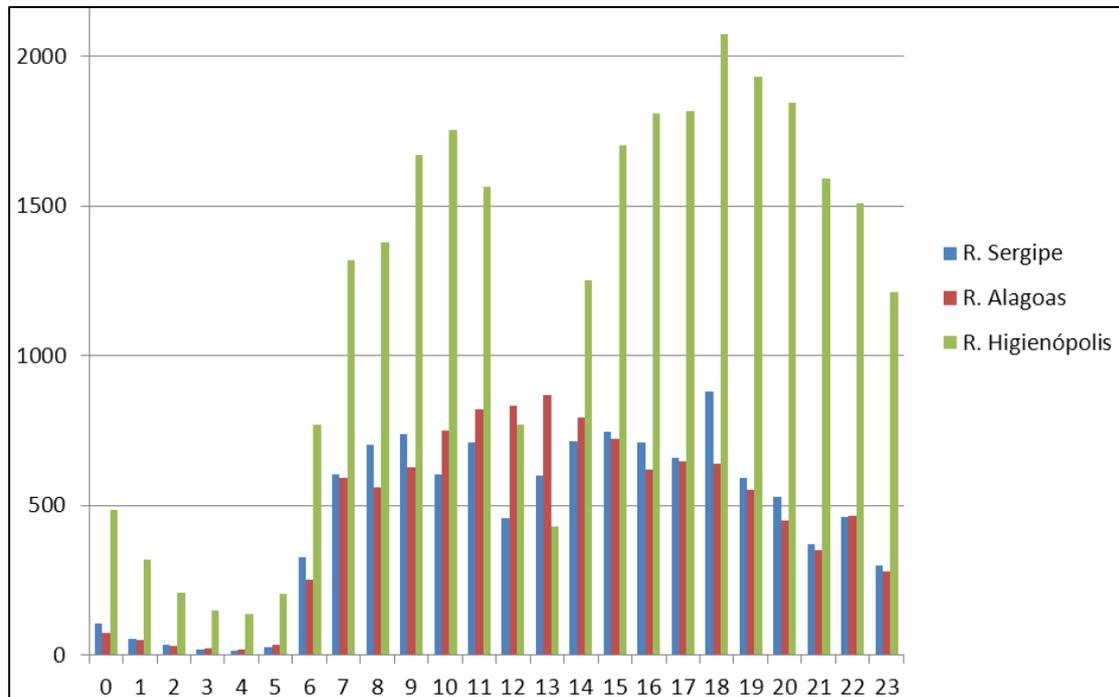
Portanto, neste exemplo, a rede deverá ter **ciclo de 50 segundos**, tempo este determinado pelo cruzamento crítico da rede.

Cabe aqui apenas a referência a um recurso de programação usado eventualmente – é possível estabelecer múltiplos do ciclo da rede para um cruzamento. Ou seja, em uma rede com ciclo de 120 segundos, é possível um cruzamento fora do eixo principal trabalhar com ciclo duplo de 60 segundos ou até mesmo com ciclo triplo de 40 segundos. Nesses casos, o sincronismo do verde se dará apenas em uma das entradas do verde.

Em uma rede, em geral os valores de fluxo variam a cada trecho, devido às conversões e aos volumes das transversais, que podem apresentar níveis diferentes de utilização.

Para exemplificar essa diferença, o gráfico seguinte compara o volume de três transversais da rede da Av. Angélica (R. Sergipe, R. Alagoas e Av. Higienópolis), em São Paulo, obtidos por contadores automáticos no mesmo dia (05.abr.04).

Analisando-se o gráfico, vemos que, claramente, a Av. Higienópolis tem maior volume do que as demais, o que tornaria sua intersecção com a Av. Angélica a crítica, caso as três formassem uma rede. Deve-se ressaltar que estes são apenas três dos cruzamentos da rede atual (que tem mais de dez). Portanto, para se chegar ao ciclo da rede, os demais deveriam ser medidos e analisados.



Ainda em relação ao gráfico, é possível notar que o volume das outras transversais Sergipe e Alagoas, tem comportamentos diferentes: ora uma tem volume maior, ora a outra.

10. Conclusões sobre a programação em tempo fixo

Após analisarmos os dados obtidos na R. Antônio Carlos, na Av. Rio Branco e na Av. Angélica, podemos concluir que:

- para a elaboração de uma programação de rede em tempos fixos de boa qualidade é necessária uma grande quantidade de dados, coletados durante vários dias;
- o processo de elaboração dos planos e de suas entradas da tabela horária tem uma série de acúmulos de folgas de tempo, para compensar as aleatoriedades e para permitir que se programe as progressões de verde (onda verde);
- as médias também estão embutidas nas trocas de plano. Quando escolhemos uma troca de plano em um determinado horário (digamos, às 17h00), esse valor é arbitrário e baseado em uma série de fatores, entre eles a média histórica da variação dos volumes. Portanto, a troca de plano não indica que o trânsito mude de comportamento exatamente às 17h00. Um dia será um pouco antes, no outro um pouco depois e assim por diante

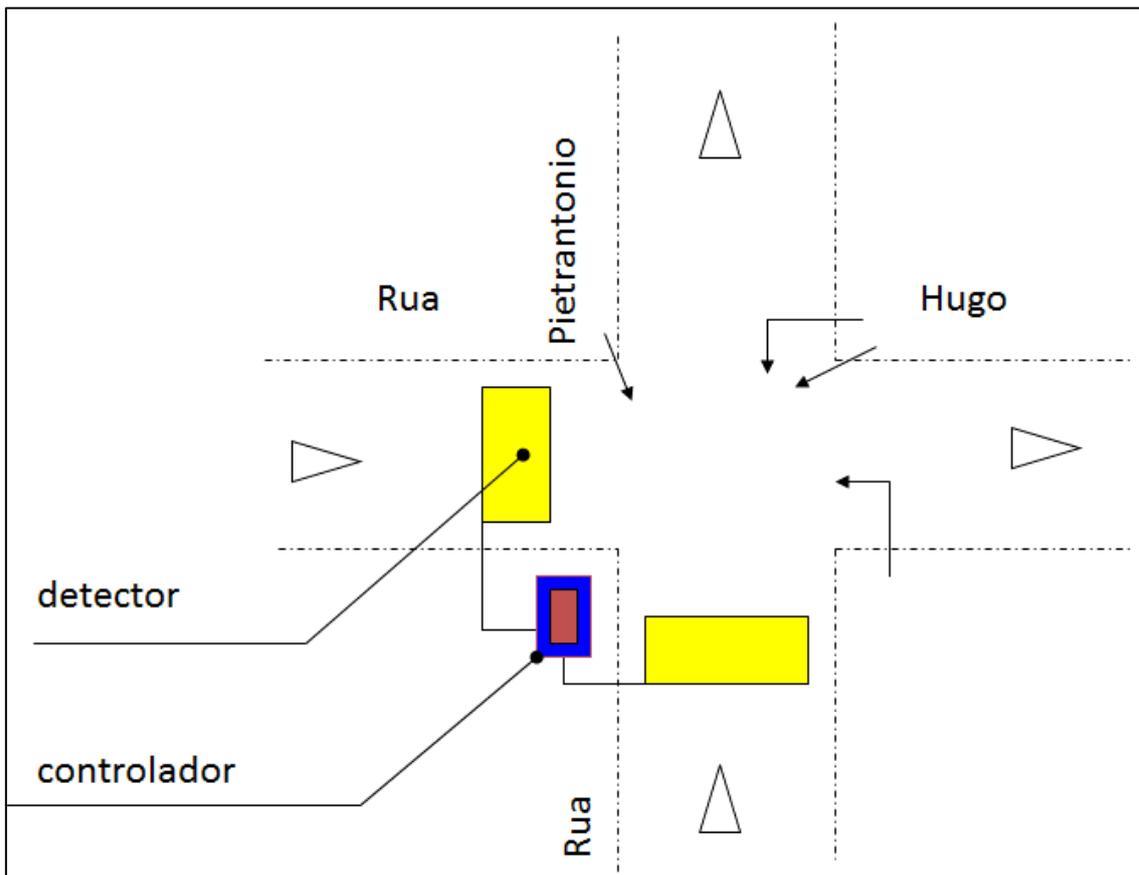
De qualquer forma, apesar desses problemas, o sistema em tempos fixos atende razoavelmente às necessidades do trânsito há dezenas de anos. Ainda é o mais utilizado em todo o mundo

11. Os semáforos por demanda – a eliminação da tabela horária

A condição de se trabalhar com todas essas folgas sempre preocupou os Engenheiros. O ideal seria que o semáforo reagisse à demanda, ou seja, ajustasse os tempos conforme a necessidade do tráfego. Há muitos anos que esse modelo de semáforo está disponível e pode ser dividido em dois tipos: atuado e em tempo real.

Os primeiros semáforos a operarem por demanda do tráfego foram chamados de “atuados” e seu funcionamento está descrito a seguir:

- nos semáforos atuados não existe programação prévia. A passagem do tráfego por dispositivos de detecção instalados nas vias é processada no controlador, que adapta os tempos semafóricos para atender às variações da demanda veicular. Portanto, não existe uma tabela horária;
- o controlador trabalha com parâmetros estabelecidos previamente, como os tempos de ciclo e de verde máximos e mínimos e extensões de verde. Dentro dos limites estabelecidos por esses valores, os tempos podem variar continuamente;
- em razão de não ter tempos de ciclos fixos, o que impediria a programação de ondas verdes, o semáforo atuado só pode ser utilizado em cruzamentos isolados.



12. A operação em tempo real

Com a evolução da tecnologia, foi possível estender-se a condição de semáforos por demanda de tráfego para as redes.

Surgiu então o que ficou denominado como “semáforos em tempo real” ou “semáforos inteligentes”.

O princípio de funcionamento é o mesmo dos semáforos atuados, ou seja, os veículos são detectados por sensores e a variação dos tempos procura acompanhar a evolução do tráfego.

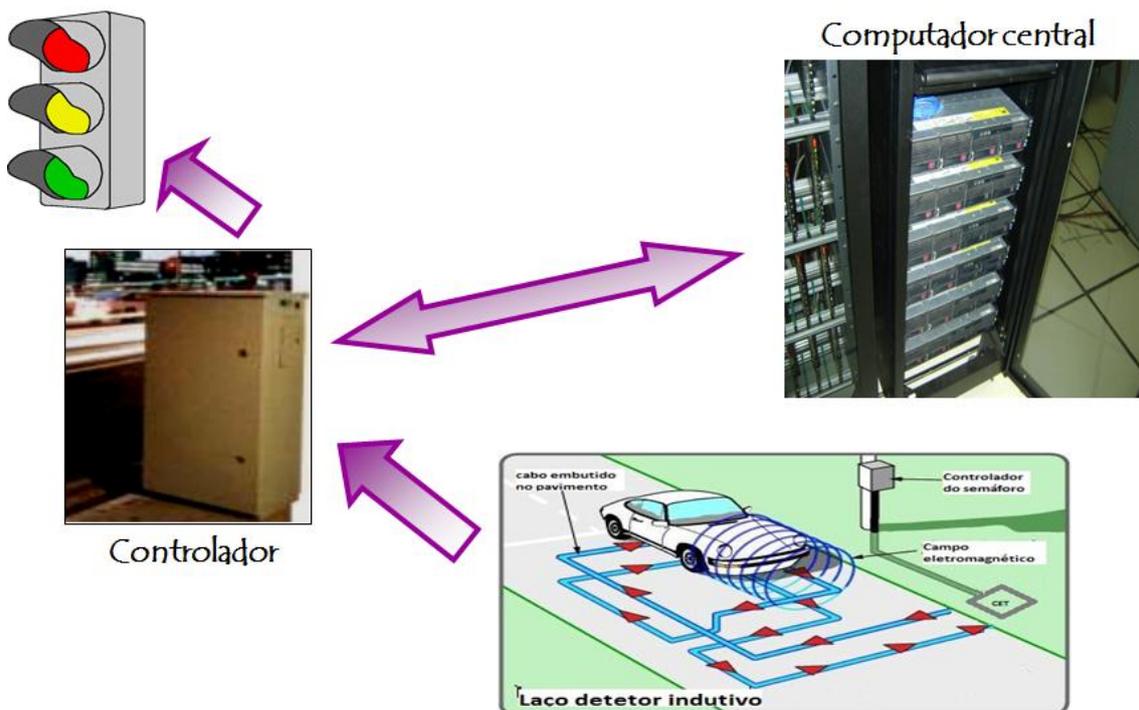
O sistema semafórico em tempo real proporciona expressivas reduções, principalmente no número de paradas, no atraso global da rede, na emissão de poluentes e no consumo de combustível.

Existem, entretanto, diferenças significativas entre o modo atuado e o em tempo real.

Em primeiro lugar, o sistema em tempo real deve ser centralizado, pois o processamento dos dados coletados pelos detectores é feito em um computador central, que possui o software que faz todos os cálculos semafóricos.

Isso pressupõe uma rede de transmissão de dados, para interligar os sensores aos controladores e estes ao computador.

A figura a seguir traz um esquema da operação em tempo real:



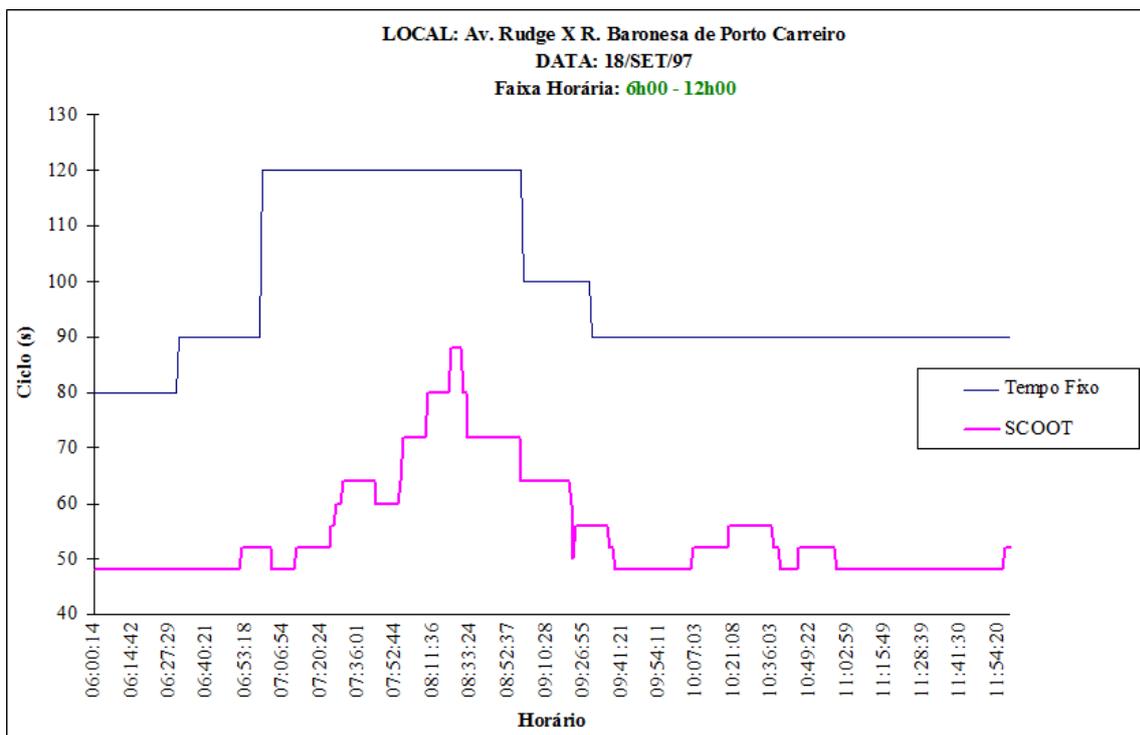
Na figura anterior temos a sequência de eventos da operação em tempo real:

- 1) O veículo é identificado quando passa pela seção de detecção;
- 2) Essa informação é enviada ao controlador;

- 3) O controlador envia, via RTD, o dado de contagem ao computador;
- 4) O computador processa a informação e devolve uma resposta ao controlador, que pode ser uma ordem para manter ou para alterar a cor do grupo focal;
- 5) O controlador executa a ordem dada pelo computador, alterando ou mantendo a cor do grupo focal.

Com esta forma de operação, há uma grande redução nas folgas e ociosidades. Elas não são totalmente eliminadas porque o princípio de operar com o mesmo tempo de ciclo na rede ainda tem que ser cumprido. Isso pode fazer com que um (ou mais) cruzamentos da rede operem com ciclos superiores aos ótimos, em nome do benefício da onda verde.

O gráfico a seguir traz uma comparação entre a operação em tempos fixos e em tempo real em um cruzamento (obs.: "Scoot" é o nome de um dos sistemas semafóricos que opera em tempo real).



No gráfico anterior a linha azul representa a tabela horária que estaria vigente caso o controlador estivesse em tempos fixos.

É notável a grande diferença de tempos de ciclos: o maior ciclo atingido pelo tempo real foi de 88 segundos (apenas por vinte minutos), sendo que em tempos fixos estaria rodando um ciclo de 120 segundos, por um período de duas horas.

Pode-se notar, também, a grande variação no tempo real de ciclos no período. Seria impossível elaborar uma programação em tempos fixos com tamanha variação.

Ainda em relação ao gráfico, deve-se ressaltar que a utilização de tempos de ciclos menores:

- reduziu os tempos de espera dos motoristas;
- aumentou a segurança, minimizando as ociosidades;
- economizou combustível;
- diminuiu a emissão de gases pelos veículos.

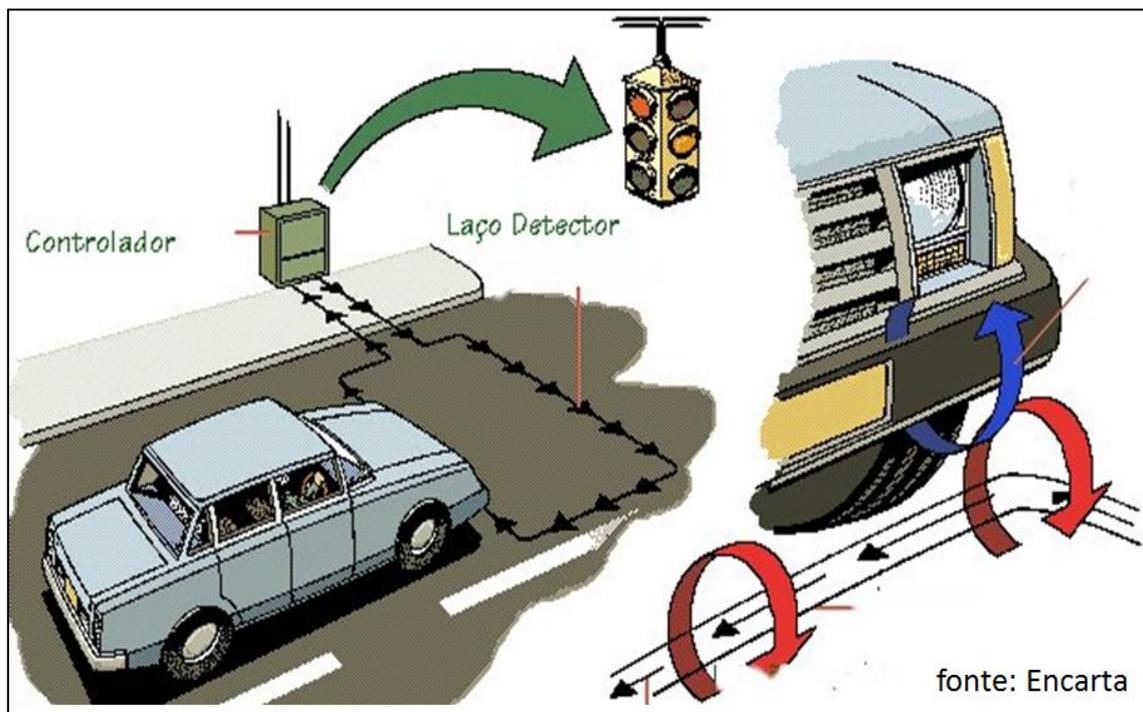
13. A detecção dos veículos

Existem várias formas de se detectar a passagem de um veículo para a finalidade da operação em tempo real ou no modo atuado. As mais usadas são o laço indutivo e a imagem de câmeras. O mais importante é destacar que os detectores são vitais para a operação sob demanda e sua manutenção é estratégica para que se obtenham bons resultados.

Vamos a uma breve apresentação de cada um deles.

A figura a seguir mostra esquematicamente o funcionamento de um laço indutivo. Para sua instalação é feito um corte no asfalto, em um ponto da via que varia conforme as exigências de posicionamento do sistema de controle. Nesse corte é enrolado um cabo metálico (em geral, três voltas), que é conectado ao controlador. O cabo recebe uma corrente que, ao percorrer a espira formada, gera um campo magnético.

A passagem de uma massa metálica sobre o laço altera o campo magnético, gerando a contagem do veículo.





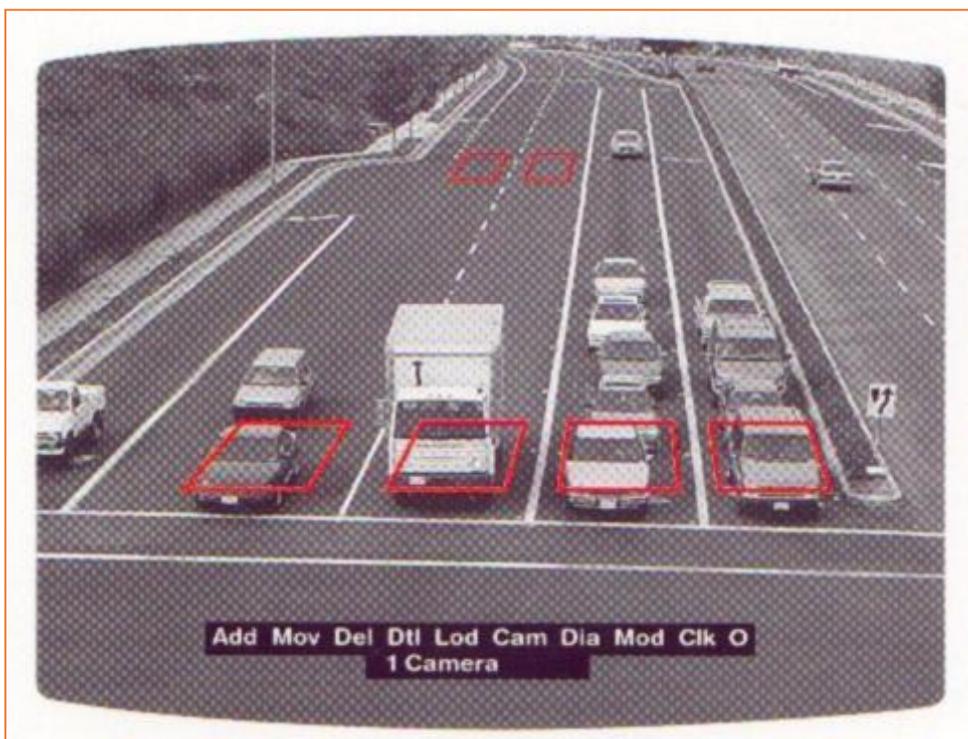
Exemplo de secção de detecção por laço indutivo.

O sistema de detecção por câmeras opera com laços detectores virtuais.

Por meio de um software específico são criados laços virtuais na imagem capturada pela câmera (esta deve ser fixa), posicionada estrategicamente para ter em seu campo visual todo o trecho de via onde a detecção deve ser realizada.

A detecção se dá pelo contraste (na verdade, pela variação dos pixels) entre a imagem de fundo e a passagem de um veículo na área interna do laço virtual.

A imagem a seguir mostra um exemplo da aplicação de laços virtuais.



14. Comparação entre semáforos em tempo real e em tempos fixos

Tendo em vista o aporte de investimentos necessário e a infraestrutura envolvida, a instalação de um controle semaforico em tempo real é mais justificada em termos de custo-benefício em locais estratégicos da cidade, como no sistema viário principal ou em corredores de transporte coletivo.

Por outro lado, quando corretamente instalado traz ganhos significativos à população, reduzindo esperas e a poluição.

O quadro a seguir traz uma comparação entre as duas formas de controle: tempos fixos e tempo real.

	Vantagens	Desvantagens
Tempos fixos	<ul style="list-style-type: none">• Forma predominante no Brasil e, portanto, com maior domínio por parte dos técnicos• Não depende de tecnologia importada• Custo de implantação relativamente baixo	<ul style="list-style-type: none">• Depende de uma grande quantidade de dados para se chegar a uma programação de boa qualidade• Por trabalhar com médias e tempos de folga, impõe aos usuários atrasos excessivos e ociosidades
Tempo real	<ul style="list-style-type: none">• Varia os tempos conforme a demanda de tráfego, reduzindo as esperas e os atrasos• Aumenta a segurança e reduz as emissões de poluentes e o consumo de combustível	<ul style="list-style-type: none">• Não existe tecnologia nacional• Custo de implantação relativamente alto• Necessita de manutenção constante

15. Considerações finais sobre semáforos inteligentes

Como visto, um sistema de controle para ser considerado inteligente, deve ser responsivo, isto é, responder a uma demanda externa.

No caso dos semáforos, a resposta é o ajuste dos tempos à variação da demanda de tráfego.

Atualmente existem diversos equipamentos de controle de trânsito que se denominam indevidamente como “inteligentes”, como os contadores regressivos de tempo (foto à frente).

Esse tipo de dispositivo apenas utiliza como fonte de informação o tempo corrente na programação, não tendo nenhuma ação na otimização da operação do semáforo.

Também vimos que o sistema em tempo real requer uma infraestrutura considerável, formada por computador dotado de um software específico de controle semaforico; rede de transmissão de dados e instalação de detectores de veículos.

Sendo assim, sistemas semafóricos simples, sem detecção de veículos e sem um software que realize a otimização dos tempos de forma automática, contínua e responsiva não pode ser considerado inteligente.

Veza por outra nos deparamos com equipamentos e sistemas que usam do título “semáforo inteligente” como estratégia de marketing, normalmente baseados no uso de alguma nova tecnologia que o diferencia dos usuais, sem, no entanto, trazer os benefícios que os semáforos em tempo real oferecem.



Exemplos de equipamentos que muitas vezes são vendidos como “inteligentes” e que, levados em conta os conceitos apresentados anteriormente, de fato não o são, pois não otimizam tempos, apenas repetem a programação vigente.