

UTILIZAÇÃO DE SEMÁFOROS ATUADOS PELO TRÁFEGO

Eng. Wagner Bonetti Jr., Esp.

EMDEC - Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas S/A

Eng. Hugo Pietrantonio, Prof.Dr.

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho procura identificar os critérios de utilização do controle atuado pelo tráfego passando pela evolução tecnológica dos controladores de tráfego que lhes dá suporte no Brasil. Os critérios usuais para uso de semáforos atuados pelo tráfego foram abordados sob as visões genérica e específica. Na genérica trata-se das vantagens e desvantagens do uso do controle atuado pelo tráfego. Nas específicas trata-se do enfoque deste tipo de controle em critérios de instalação de semáforos. Um estudo de campo realizado na cidade de Campinas é apresentado, com o objetivo de se comparar os desempenhos dos controles semaforicos a tempos fixos e atuado pelo tráfego em uma interseção isolada.

O uso do controle semaforico atuado pelo tráfego não é disseminado no Brasil tal como o é em países como os Estados Unidos e Austrália. As vantagens e desvantagens da utilização dos semáforos atuados pelo tráfego são pouco estudadas no Brasil, o que pode ser citado como causa e/ou consequência de seu pequeno uso. Em relação às diferentes linhas de evolução abertas hoje a um sistema de administração de tráfego, no que diz respeito à atuação, o uso em interseções isoladas vai ao encontro às características de variação dos fluxos nos núcleos urbanos regionais periféricos às áreas centrais dos municípios.

Atualmente, existem modelos de previsão e avaliação de desempenho sensível aos parâmetros de controle atuado pelo tráfego, mas que não consideram os ganhos relativos à adaptação aos incidentes e/ou envelhecimento dos planos. Os critérios de parametrização existentes também são praticáveis na maior parte dos casos, embora ainda devam ser desenvolvidos para acomodar situações específicas relevantes (como a necessidade de priorizar alguma corrente de tráfego e/ou a presença de veículos pesados em aclives). Estas observações indicam a necessidade de aprimorar as técnicas atuais (ver BONETTI, 2001, para ambos os aspectos).

Portanto, o estudo sobre a utilização dos controladores atuados e o desenvolvimento das técnicas relacionadas é uma linha de pesquisa que merece maior atenção, pois a atuação pode ser avaliada como estratégia final em interseções isoladas ou como estratégia intermediária em redes semaforicas.

ABSTRACT

This work tries to identify the actuated signals use approaches going by the controllers' technological evolution that gives them support in Brazil. The usual approaches were related under the generic and specific visions. In the generic, the advantages and disadvantages of the use of actuated signals control. In the specific, the focus of this control type in warrants of traffic signals. A field study accomplished in the city of Campinas is presented, with the objective of comparing the control performance at fixed times and actuated in an isolated intersection.

The use of the actuated control is not disseminated in Brazil just as it is in countries as United States and Australia. The advantages and disadvantages of the use of actuated control are not very studied in Brazil, what can be mentioned as cause and/or consequence of its small use. In relation to the different lines in the traffic administration system actual evolution, in what it tells respect the performance, the use in isolated intersections is going to the encounter to the characteristics of variation of the flows in the outlying regional urban nuclei to the urban central areas.

Now, forecast models and evaluation of sensitive acting exist to the actuated signals control parameters, but that don't consider the relative gains to the adaptation to the incident and/or aging of the traffic plans. The existent approaches of parameters set calculations are also practicable in most of the cases, although they should still be developed to accommodate important specific situations (as the need to prioritise some current of traffic and/or the presence of vehicles weighed). These observations indicate the need of improve the current techniques.

Therefore, the study about the use of actuated controllers and the development of the related techniques is a research line that deserves larger attention, because the performance can be evaluated as final strategy in isolated intersections or as intermediary strategy in net signals control.

1. INTRODUÇÃO

Os semáforos modernos foram desenvolvidos a partir de equipamentos manuais de operação de tráfego utilizados em Londres no ano de 1868. Em 1913, James Hoge inventou o primeiro semáforo elétrico como hoje é conhecido (aplicado em Cleveland em 1914). Esta invenção aparece como sendo a origem do semáforo a três cores, o qual se propagou nos Estados Unidos no começo da década de 20. Semáforos interligados começaram a ser utilizados na cidade de Salt Lake City em 1917. Um sistema progressivo foi proposto em 1922. Os primeiros semáforos atuados foram instalados em New Haven, East Norwalk e Baltimore em 1928 (HOMBURGUER et al., 1992).

A evolução dos equipamentos de controle semafórico permitiu maior flexibilidade da filosofia de controle, gerando a possibilidade de desenvolver estratégias mais sofisticadas, que buscaram maior eficiência na administração do tráfego (de forma geral, através da maior sensibilidade às variações das condições de operação).

O controle atuado pelo tráfego veicular é aquele no qual o tempo de verde de uma aproximação é influenciado pela detecção imediata de veículos, onde cada aproximação está sujeita aos tempos mínimo e máximo de verde e alguns estágios podem ser ignorados, se não houver demanda em seu detector (TRB-HCM, 1997)¹. A atuação pode ser total (em todas as correntes de tráfego) ou parcial (como na semi-atuação, em que apenas as correntes secundárias são atuadas).

Das estratégias de resposta às condições de tráfego, deve ser diferenciado o controle dos semáforos por atuação do controle adaptativo como lógica descentralizada alternativa. O controle adaptativo é aquele no qual um esquema de horizonte móvel é utilizado para prever as condições de tráfego existentes (normalmente projetadas 15 minutos adiante) e calcular o plano semafórico. Em contrapartida, no controle atuado total, essas intensidades dos fluxos de tráfego são absorvidas pelas variações dos períodos de verde em cada instante, de acordo com os eventos detectados (BONETTI, 2001).

Portanto, a lógica da atuação tradicional permite a eliminação da folga na programação semafórica necessária para acomodar flutuações nas condições de tráfego em vista da possibilidade de ajustar os tempos de verde a cada ciclo, através da alocação de um tempo de verde igual ao necessário para escoar as filas (condição de máxima produtividade), dentro de uma faixa de mínimo e máximo verde definida.

A importância do estudo dos semáforos atuados reside principalmente em:

- a) ritmo de mudanças das condições de tráfego observado no Brasil;
- b) existência de núcleos urbanos afastados, que favorecem seu uso.

No entanto, a prática efetivamente observada pode ser resumida em:

- c) sua pouca utilização no Brasil;
- d) os controladores semafóricos no Brasil são pouco desenvolvidos;
- e) descrédito deste tipo de controle entre os técnicos brasileiros.

¹ A referência TRB-HCM será citada apenas como HCM (Highway Capacity Manual) no restante do trabalho.

A seguir, as características dos controladores atuados e o seu desempenho prático serão analisados. O item 2 discute a evolução da tecnologia semafórica, particularmente da atuação, no Brasil em comparação com o exterior. Os itens 3 e 4 apresentam a lógica tradicional de atuação e os recursos existentes nos controladores nacionais. O item 5 revisa os critérios usuais para uso e modelos para análise de desempenho de semáforos atuados e o item 6 apresenta os resultados de um estudo de campo que permite avaliar a adequação desses critérios. Por fim, o item 7 discute conclusões e recomendações derivadas do estudo apresentado.

2. EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA SEMAFÓRICA E USO DA ATUAÇÃO NO BRASIL

Como visão preliminar, pode-se identificar duas linhas diferentes de evolução na informatização ou automação do controle semafórico. Por um lado, pode-se destacar a concepção e implantação de sistemas de controle computadorizado centralizados (que pode ser relacionada com a tradição inglesa, em particular), que são aqueles nos quais o computador comanda diretamente a programação dos semáforos, informando a cada instante qual a situação luminosa que deve acontecer (ZSASZ, 1997). De outro, pode-se destacar também a sofisticação das ferramentas de automação dos semáforos com base em informação imediata e local, que corresponde ao controle atuado pelo tráfego (que pode ser relacionada com a tradição norte-americana), em que se medindo o fluxo através de detectores, é possível melhorar o desempenho e manter a programação ótima, acompanhando a flutuação aleatória e microscópica do tráfego, ciclo a ciclo (ZSASZ, 1997).

A evolução do controle semafórico no Brasil desenvolveu-se na década de 70 por linhas definidas pelas experiências de outros países e foi liderada pelas iniciativas tomadas pela CET/SP - Companhia de Engenharia de Tráfego do Município de São Paulo.

No primeiro passo, quando aqui ainda imperavam os equipamentos eletromecânicos, ocorreu a introdução de controladores multiplanos, de tempo fixo (de origem norte-americana, em 1976). O segundo passo incluiu a implantação da centralização de equipamentos com programações a tempos fixos (com o projeto SEMCO em São Paulo, em 1980), utilizando controladores eletrônicos importados (da Plessey, fabricante inglesa). A iniciativa de desenvolver e testar um controlador atuado nacional (realizado em conjunto pela CET/SP e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT) foi um esforço paralelo que teve uma significação menor (BONETTI, 2001).

O controle semafórico atuado pelo tráfego como alternativa intermediária entre os sistemas em tempo real e o controle em modo *off-line* não foi empregado no Brasil². Por exemplo, na cidade

² Sistemas centralizados podem ser definidos em quatro linhas básicas, de acordo com sua geração, ou seja, supervisão e operação, monitoração, seleção automática de planos e controle em tempo real (SZASZ, 1997). A premissa comum a todos é que os controladores de tráfego são interligados a um computador central que tem incorporado um *software* de controle. Os sistemas de supervisão e operação semafórica são aqueles em que o *software* permite a supervisão do estado da operação, isto é, qual estágio ou intervalo do plano de tráfego a tempos fixos vigente está em operação. Como exemplo desse tipo de *software* de controle pode-se citar duas marcas de controladores nacionais: a Digicon e a Tesc. (BONETTI, 2001) Os sistemas de monitoração de tráfego são aqueles em que, através de detectores que colhem dados do tráfego, é possível mensurar e monitorar as condições das correntes de tráfego, acumulando dados em tempo real ou por processo de comparação com parâmetros pré-fixados, tais como saturação, comprimento de fila e ocupação. Os sistemas centralizados chamados de seleção automática de planos (ou seleção dinâmica de planos) também possuem detecção veicular e parâmetros de controle, tal qual o

de São Paulo, após a implantação do controle em modo coordenado *off-line*, o controle semafórico em modo atuado foi cogitado posteriormente, mas foi implantado em cerca de 30 interseções (contra os mais de 400 semáforos centralizados).

Dessa época aos dias de hoje, o controle semafórico em modo atuado não tem sido utilizado em larga escala no Brasil, exceto para estágios específicos de travessia de pedestres acionados por botoeira, talvez pela ausência de recursos mais avançados nos equipamentos nacionais.

A realidade de outros centros urbanos parece nortear-se por esta estratégia utilizada pela CET-SP (pode-se citar, entre outros, Rio de Janeiro, Juiz de Fora e Campo Grande com sistemas baseados em detectores e seleção dinâmica de planos, Porto Alegre, Vitória, Campinas e Ribeirão Preto com sistemas de supervisão da operação dos semáforos, ainda a estratégia existente em Curitiba).

Ressalta-se que no Brasil, mesmo fora de São Paulo, não se tem notícia de nenhuma outra cidade que utilizasse controle semafórico centralizado até meados dos anos 80 (quando foi implantado em Curitiba). Apesar disso, também não se teve o controle atuado (nem o centralizado) nas demais grandes cidades brasileiras.

Nos Estados Unidos, grande parte dos corredores de tráfego opera combinando coordenação *off-line* com semi-atuação local. No entanto, os controladores utilizam lógicas mais complexas orientadas para otimizar a inclusão ou exclusão de estágios de conversão à esquerda, do que a lógica tradicional disponível nos controladores nacionais. Dessa forma, o controle pode não apresentar uma seqüência fixa de estágios dependendo da existência de demanda nas conversões. A forma usual de atuação utiliza os controladores com anéis duais (*dual ring*; ver HCM, 1997), que usam atuação em duas seqüências alternativas paralelas.

Outra forma de controle atuado comum nos Estados Unidos (também não disponível nos controladores nacionais) é chamado de controle Volume-Densidade (HCM, 1997). Neste tipo de atuação, a lógica é baseada na contagem do número de chegadas durante o período de vermelho para determinar o verde inicial variável e na redução progressiva no Intervalo de Corte durante o tempo de verde estendido (KELL *et al*, 1982).

Na Austrália, antes da evolução representada pelos sistemas centralizados em tempo real (especialmente o SCATS), desenvolveram-se os controladores semafóricos para o controle atuado, relacionados com a busca de parametrizações para melhor atender as variações dos fluxos de tráfego. O controle do tipo americano Volume-Densidade também é utilizado e ainda há uma terceira técnica de atuação, a chamada de Mudança por Desperdício (*waste change*). Neste tipo de controle, a lógica de interrupção de verde considera o acúmulo do excesso dos intervalos entre os veículos em relação ao valor básico de saturação, ou seja, ao intervalo médio no movimento normal da fila (AKÇELIK, 1995).

sistema de monitoração de tráfego. A diferença está na tomada de decisão operacional quando os dados colhidos pelos detectores apontam que os parâmetros de referência foram superados. (SZASZ, 1997). O controle em tempo real é aquele onde o processo de informação (coleta de dados) acontece de uma maneira suficientemente rápida de forma que os resultados são disponíveis a tempo de influenciar o processo de controle ou monitoração, no próprio ciclo ou adiante (KELL *et al*, 1982).

Os controladores nacionais apresentam recursos de operação de planos a tempos fixos nos modos isolado e coordenado e atuação no modo isolado, porém apenas com a lógica tradicional e com poucos parâmetros operacionais. O modo atuado coordenado, normalmente oferecido, ainda não foi suficientemente testado para ter-se uma avaliação dos resultados. Por sua vez, em geral os controladores nacionais dispõem do recurso de centralização em supervisão e operação, distinguindo-se entre si pela característica de interfaces mais ou menos amigáveis para tanto.

As iniciativas em São Paulo seguiram, portanto, a tradição inglesa. Esta linha de evolução contrasta com a observada nos EUA, onde os sistemas centralizados evoluíram de forma pouco significativa e o uso de controladores atuados com ajustes de tempos e seleção de estágios, combinada com a coordenação *off-line*, foi o caminho predominante. A evolução das técnicas de controle semafórico na Austrália também teve uma relação mais próxima com o uso da atuação (influenciando os sistemas de controle em tempo real, como no SCATS).

No Brasil, aparentemente, a pequena evolução da atuação nos controladores eletrônicos nacionais pode ser citada como causa e consequência desse processo. A dificuldade de implantar sistemas centralizados também limita o desenvolvimento da tecnologia no setor.

3. LÓGICA DA ATUAÇÃO TRADICIONAL

As variações da demanda em uma aproximação são significativas e apresentam um caráter aleatório (Mc SHANE e ROESS, 1990). O semáforo a tempos fixos não apresenta características para atender essa variação aleatória. O que norteia o semáforo atuado pelo tráfego é primordialmente esse atendimento.

Na atuação total, o conceito que embasa a operação é aquele em que as demandas que competem em uma interseção são igualmente importantes, e que não há nenhum padrão de chegada estruturado em qualquer uma das aproximações orientando a priorização de um movimento (Mc SHANE e ROESS, 1990). A semi-atuação, por sua vez, norteia-se no conceito de interromper o menos possível uma via principal, dependendo da demanda na via secundária ou de pedestres, gerando melhores condições operacionais na via de maior fluxo, principalmente em relação ao atraso. Em relação à ausência de controle semafórico, o fluxo veicular na via secundária, ou na travessia de pedestres, ganha maior segurança, pois não tem que se sujeitar, na entrada ou travessia, à existência de brecha na via principal.

A Figura 3.1 ilustra o funcionamento de um estágio atuado sob a lógica de operação da atuação tradicional. O período de verde de uma aproximação tem variação entre os valores mínimo e máximo. O primeiro período de verde é aquele denominado de verde inicial, e vem dimensionado por critérios de segurança e/ou fluidez do tráfego. Após o período de verde inicial, o verde é estendido de uma unidade de extensão (UE). A cada período de tempo predeterminado pelo tipo de equipamento (normalmente igual ao passo de programação da unidade de extensão) é checada a existência de demanda. No instante em que um veículo for detectado, o verde é novamente estendido de uma unidade de extensão e a verificação de demanda recomeça a partir daquele instante. Esse procedimento repete-se até que o intervalo entre os veículos seja maior que o intervalo de corte, ou o período de verde atinja o valor parametrizado como verde máximo.



Figura 3.1

Lógica de operação da atuação tradicional (Mc SHANE e ROESS, 1990)

Normalmente fala-se em intervalo de corte, mas programa-se nos controladores brechas de corte, ou seja, intervalos que são medidos após o final da detecção e que, portanto, não contém o tempo que o veículo atua o detector (que no caso de um detector de presença é a ocupação do detector, e no caso do detector de passagem é o pulso de detecção).

É interessante ressaltar que após a ausência de detecção que acarreta a interrupção do período de verde sem que se atinja o verde máximo, sempre será completada uma unidade extensão (acrescida ao período de verde decorrido até o momento da última detecção).

Nos controladores nacionais, e mesmo no exterior, normalmente os valores da Unidade de Extensão e o do Intervalo de Corte são os mesmos. Entretanto, conceitualmente, essas variáveis são distintas. À Unidade de Extensão cabe permitir que o último veículo detectado possa passar pela interseção com segurança e isso depende fundamentalmente da posição do detector em relação à linha de retenção e das dimensões da interseção. O intervalo de corte deve indicar o término da dissipação da fila com escoamento com fluxo de saturação, tendo relação com a extensão do detector no caso de controladores que medem brecha (*gap*) ao invés de intervalos de corte. Muitas vezes, alguns controladores, indicam a diferença de unidade de extensão e intervalo de corte em um parâmetro chamado de retardo de verde, ou seja, um período de verde adicional acrescentado ao intervalo de corte, no caso de se encerrar o período de verde para garantir a segurança do último veículo detectado.

No controle semi-atuado, o verde da via principal varia a partir de um Verde Mínimo calculado tal qual o dimensionamento a tempos fixos. Na via secundária a parametrização é feita seguindo os critérios da atuação, ou seja, verde entre inicial e máximo. Dessa forma, a atuação ocorre somente na via secundária. O direito de passagem permanece à via principal até que haja demanda na via secundária. Quando há demanda na via secundária, depois da via principal

receber o direito de passagem durante o período de verde mínimo, o direito de passagem passa à via secundária (iniciando o processo descrito para uma aproximação atuada). Quando não há demanda na via secundária, o verde da via principal é estendido indefinidamente, no caso de uma interseção isolada.

A semi-atuação pode ser usada quando a interseção faz parte de um sistema coordenado. Neste caso, o tempo de ciclo é conhecido (fixo) e, portanto, os arranjos de tempo dependem desse ciclo. Os processos de parametrização dos tempos de verde são os mesmos para a primeira utilização, mas existem recursos para assegurar as defasagens na coordenação da via principal, podendo não ocorrer o verde na secundária se isso for necessário (isto é, se não couber o verde mínimo da secundária) ou então ocorrer o término antecipado do verde da secundária (mesmo com atuação e antes do seu verde máximo) para garantir o início de um novo tempo de ciclo.

4. RECURSOS DA ATUAÇÃO NOS CONTROLADORES NACIONAIS

Os controladores, dependendo da fábrica, utilizam o conceito de intervalos ou estágios para descrição da programação dos planos de tráfego. Da mesma maneira, a inserção de dados pode ser feita por teclados incorporados à CPU e/ou por equipamento dedicado a esse fim chamado de *keyboard*. Tal operação ainda pode ser realizada por *laptop*, estando em desenvolvimento a utilização de *palmtop* com comunicação por infravermelho.

Quesito	CONTROLADORES ELETRÔNICOS NACIONAIS			
	Brascontrol	Tesc	Digicon	Hodos BSE
Programação	Teclado	Keyboard	Teclado	Laptop
Display	16 dígitos	16 dígitos	16 dígitos	-
Painel de facilidades	Isolado	Isolado	Isolado	Isolado
Facilidades no painel	Liga/desliga am.	Liga/desliga am.	Liga/desliga am.	Liga/desliga am.
	Intermit. Modo manual	Intermit. Modo manual	Intermit. Modo manual	Intermit. Modo manual
	programação	programação	programação	programação
Mostradores visuais	Operação	Operação	Operação	Operação
	detetores falhas	detetores falhas	detetores falhas	detetores falhas
Montagem em <i>plug in</i>	Sim	Sim	Sim	Sim
Tipo de lâmpadas	halógenas	halógenas	halógenas	halógenas
	incandescentes	incandescentes	incandescentes	incandescentes
Modularidade módulo potência	2	2	2	4
Grupos de tráfego	8/16	6/16	4/16	8/16
Seqüência de cores	Programável	Programável	Fixa	Programável
Número de planos de tráfego	17	8	16	8
Seqüência de partida	Programável	Programável	Fixa	Fixa
Passo de verde	1 s	0,1 ou 1 s	1 s	1 s
Passo de extensão verde	0,1 s	0,1 s	0,1 s	1 s
Verde máximo	175 S	199 s	199 s	240 s
Extensão máxima	9,5 s	9,9 s	9,9 s	tempo de ciclo

Tabela 4.1
Quesitos Gerais dos Controladores Eletrônicos Nacionais (EMDEC, 1995)

As características e facilidades dos controladores nacionais, obtidas em um levantamento realizado pela EMDEC - Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas, em 1995, estão resumidas na Tabela 4.1.

Quanto à atuação, as características comuns a todos os controladores nacionais são:

- os parâmetros de programação são independentes para cada plano de tráfego
- para cada estágio define-se o Verde Inicial (VD_{ini}), o Verde Máximo (VD_{max}) e o Intervalo de Corte (IC)
- associa-se cada seção de detecção a um determinado detector, podendo haver mais de uma detecção associada ao mesmo detector
- uma vez iniciado o estágio o VD_{ini} é obrigatoriamente cumprido
- o verde será prolongado adicionando-se UE a partir dos respectivos instantes de detecção
- após o VD_{ini} fixo haverá no mínimo uma UE obrigatória.
- o tempo de verde será prolongado até o VD_{max} , onde é interrompido, independentemente da presença ou não de detecções adicionais.
- as detecções não atendidas não são lembradas para o ciclo seguinte.
- o VD_{max} é computado a partir do início do VD
- os estágios podem ser obrigatórios e não obrigatórios
- os detectores podem ser prioritários ou não prioritários

Pode-se notar que os esquemas de atuação mais sofisticados não estão disponíveis nos controladores nacionais, mas os recursos básicos de atuação sim.

5. CRITÉRIOS USUAIS PARA USO DE SEMÁFOROS ATUADOS PELO TRÁFEGO

Segundo a revisão de critérios realizada, não existe uma visão clara sobre os contextos onde a atuação é um recurso útil e importante. A seguir procura-se distinguir uma visão genérica favorável e visões específicas que limitam o uso da atuação a contextos muito restritos.

5.1. Visão Genérica

Segundo HOMBURGER *et al* (1992), por exemplo, as vantagens e desvantagens da utilização de semáforos de tempos atuados em relação aos de tempos fixos podem ser resumidas em:

Vantagens:

- a) normalmente reduz o atraso (se com parâmetros ajustados);
- b) adapta-se às flutuações do fluxo de tráfego;
- c) normalmente aumenta a capacidade (pelo contínuo acréscimo de verde);
- d) pode continuar operando em condições de baixos fluxos, enquanto o semáforo a tempos fixos deve operar em amarelo intermitente;
- e) especialmente efetivo em interseções de múltiplos estágios;

Desvantagens:

- a) O custo de instalação é maior que o semáforo a tempos fixos;
- b) Os detectores têm um custo de instalação significativo e requerem manutenção específica.

Como se pode observar, as desvantagens que o semáforo atuado apresenta, de uma forma geral, são de ordem financeira e de manutenção, e não dizem respeito a sua eficácia em relação ao controle de tráfego em si. Admite-se, no entanto, que seu uso sempre melhora o desempenho operacional (o que deve ser comparado com o custo adicional). As vantagens e desvantagens apresentadas não levam em consideração o tipo de equipamento existente, o que no Brasil é fator relevante, uma vez que os controladores de tráfego brasileiros ainda não apresentam recursos de atuação tais como aqueles à disposição nos controladores em outros países.

A semi-atuação é tradicionalmente utilizada em duas circunstâncias. A primeira aquela em que se deve controlar uma interseção de via principal com fluxo significativo (tipo vias arteriais ou coletoras) e via secundária de baixo fluxo (via local) ou travessia de pedestres. A segunda, não usual no Brasil, quando a interseção em controle atuado faz parte de um sistema coordenado.

Esta visão genérica não está, entretanto, claramente incorporada nos critérios usualmente recomendados para decidir sobre a instalação de semáforos e seleção do seu modo de operação. Em BONETTI (2001, pp.57-108), é feita uma revisão mais extensa destas recomendações.

5.2. Visões Específicas

As versões do MUTCD (1978 e 1988) são as referências classicamente utilizadas para identificar critérios para estudos de instalação de semáforos (não são normativos e sim indicativos para estudos, não sendo por si só justificativas para instalação). Os critérios contidos em cada uma das versões mencionadas são os seguintes:

1978	1988
1- Volume veicular mínimo	1- Volume veicular mínimo
2 - Interrupção do tráfego contínuo	2 - Interrupção do tráfego contínuo
3 - Volume mínimo de pedestres	3 - Volume mínimo de pedestres (*)
4 - Travessia de escolares	4 - Travessia de escolares (*)
5 - Movimentos progressivos	5 - Movimentos progressivos
6 - Índices de acidentes	6 - Índices de acidentes (*)
7 - Sistemas	7 - Sistemas
8 - Combinação de critérios	8 - Combinação de critérios
	9 - Volume de 4 horas
	10 - Atraso na hora pico
	11 - Volume nas horas pico

Somente o MUTCD (1988), trata do uso de semáforos atuados, especificamente. Nestes critérios, a atuação é mencionada apenas em 3 deles (os marcados com asterisco na relação acima). O semáforo implantado seguindo o critério do volume mínimo de pedestres deve ser semi-atuado (botoeira) quando a travessia de pedestres ocorrer na via principal. Em relação à travessia de escolares, recomenda que o controle deverá ser normalmente atuado, sendo conveniente a existência de detecção em todas as aproximações, no mínimo deverá ser semi-atuado e nas travessias fora de interseções, deverá ser semi-atuado (botoeira). Para o critério de índices de acidentes, quando o semáforo for instalado somente por este critério, deverá ser semi-atuado se

fizer parte de um sistema coordenado e normalmente deverá ser totalmente atuado se tratarem-se de interseções isoladas.

Portanto, pode-se verificar que o MUTCD (1988) restringiu claramente o uso da atuação a contextos em que a justificativa para a implantação de semáforos de tempos fixos não é satisfeita de forma ampla, em particular onde os volumes de tráfego não são suficientemente altos para justificar a instalação de semáforos e a atuação deve ser utilizada como recurso para minorar os impactos da sua implantação (atrasos).³

No Brasil, a fonte usual é o manual do DENATRAN (1979), por sua vez baseado em CET (1978). Estes mesmos critérios encontram-se propostos em VILANOVA (1990), que incluiu um critério específico para uso de semáforos atuados, considerando:

- 1 - Fluxos veiculares mínimos em todas aproximações da interseção;
- 2 - Interrupção do tráfego contínuo;
- 3 - Fluxos conflitantes em interseções de cinco ou mais aproximações;
- 4 - Fluxos mínimos de pedestres que cruzam a via principal;
- 5 - Índice de acidentes e os diagramas de colisão;
- 6 - Combinação de critérios;
- 7 - Melhoria de sistema progressivo;
- 8 - Controle de áreas congestionadas;
- 9 - Semáforos atuados pelo tráfego (*);
- 10 - Situações locais específicas.

Os critérios 1 e 2 são oriundos do MUTCD (1978), e os critérios 3, 4, 5 e 6 do SETRA (1973). Os critérios 7 tem tratamento similar, com valores diversos, em relação ao MUTCD (1978). Os critérios 8 e 10 foram baseados em CET (1978). A atuação é considerada em separado em um critério originalmente proposto em VILANOVA (1990), mas baseado no critério para uso de semáforos de pedestres proposto em CET (1978) (estendendo o mesmo conceito para fluxo veicular). A idéia que norteia este critério refere-se à interrupção da continuidade do tráfego, onde a intensidade elevada de tráfego da via principal causa atraso na via secundária ou na travessia de pedestres, pela inexistência de brechas apropriadas para a atravessá-la ou adentrá-la. Não ocorrendo volumes correspondentes aos critérios 2 e 4, a existência de um fluxo importante na via secundária ou travessia, para veículos ou pedestres respectivamente, justifica a instalação de um semáforo desde que seja atuado (ou, no caso, semi-atuado).

³ As propostas incorporadas ao MUTCD em sua versão do ano 2000, recentemente adotadas, seguem a mesma linha geral. Os critérios são resumidos em: 1 - Volume veicular - 8 horas; 2 - Volume veicular - 4 horas; 3 - Hora de pico; 4 - Volume de pedestres (*); 5 - Travessia escolares (*); 6 - Sistema semaforico coordenado; 7 - Índice de acidentes; 8 - Estratégia de redes. O MUTCD (2000) retira muitas das recomendações, sem indicar um enfoque alternativo. A atuação é mencionada em dois critérios (marcados com asterisco na relação acima) e relacionados com as necessidades dos pedestres. Nas interseções, como mínimo, recomenda-se que o semáforo deverá ser atuado por detetores de pedestres (botoeiras). A atuação total deve também ser considerada. Quando se tratar de travessia de pedestres fora de interseções, deverá necessariamente ser atuado por pedestres (botoeiras).

5.3. Desenvolvimento de Critérios Genéricos

Os critérios genéricos e específicos não são correspondentes. Diversos trabalhos teóricos e práticos buscaram desenvolver o enfoque genérico. Entre estes, pode-se citar:

a. TARNOFF e PARSONSON (1981) – NCHRP-233:

O trabalho apresentado tem significativa importância pela análise do tipo de equipamento a ser utilizado no controle semaforico, tendo relação direta com o modo de operação do controle. A correlação entre as características operacionais e os custos decorrentes serve como base para a escolha do controle, entre tempos fixos, atuado total, semi-atuado e volume-densidade. A escolha do tipo de controle é dificultada pela diferença de desempenho, com suas condições específicas de custo em cada tipo de localização (centro ou periferia, isolado ou com semáforos próximos). Para tanto, a análise descreve as necessidades de manutenção, os atrasos na vias principal e secundária, a segurança (de forma genérica), a possibilidade de coordenação e a efetividade em relação aos custos.

Os resultados do trabalho apresentado demonstraram que o tipo de controle que minimiza o atraso e as paradas em uma interseção também minimizam o consumo de combustível e emissão de poluentes. As diferenças nos custos anuais entre as diversas opções de controle semaforico, tais como os equipamentos, implantação, operação e manutenção, são significativamente menores que os benefícios que se obtém para cada tipo de controle. Por essa razão, a alternativa de controle que minimiza atraso e paradas também é aquela que provê melhor relação custo/benefício. Enfatiza-se que a parametrização da atuação não foi descrita detalhadamente e é sabido que essa parametrização influencia o desempenho desse tipo de controle semaforico.

b. SZASZ (1992, 1997)

O trabalho de SZASZ (1992), publicado pelo Núcleo de Estudos de Tráfego da CET-SP, apresenta uma tentativa de quantificação das vantagens e desvantagens das diversas possibilidades ou alternativas de sinalização (incluindo implantação de controle semaforico e atuação). A análise para recomendação da melhor opção é feita em função da sua comparação traduzida no custo total da utilização das alternativas de possíveis soluções. Não são abordados detalhes da metodologia de análise de custos, mas apenas um exemplo de sua aplicação.

Qualquer que seja a alternativa a ser implantada, a análise de seu custo pode ser feita através de dois componentes, o custo operacional e o custo chamado de “social”. O custo operacional representa todas as despesas que o órgão gestor de tráfego tem ao decidir implantar uma alternativa. O custo “social” representa todo ônus que a sociedade arca quando a alternativa é implantada (além do custo operacional). Dentro dos custos operacionais estão incluídos basicamente os salários dos funcionários envolvidos em todo o processo (ou compra de serviços) e os materiais necessários. Os custos “sociais” são representados pelos transtornos que a solução implantada vai causar (em termos de atrasos, acidentes e incômodos) aos usuários do sistema viário, onde os parâmetros mais usuais para se quantificar o benefício social são tempo, conforto e segurança. Este enfoque é, portanto, estritamente semelhante ao proposto por TARNOFF, PARSONSON (1981).

Os valores dos custos operacional e social são transformados em equivalentes monetários, somados, e escolhe-se a alternativa de menor custo total. Na análise dos custos sociais de implantação semafórica, as variáveis mais importantes são atrasos e acidentes. Para os custos operacionais foram, de uma maneira simplificada, considerados apenas três elementos: custo de implantação, custo de manutenção e custo de regulação. Na composição dos custos operacionais, o custo de implantação ocorre de uma só vez no início, os demais ocorrem distribuídos ao longo do tempo e, portanto há necessidade de ajuste deste custo por um fator de conversão do valor inicial pelo valor/tempo. Esse fator depende da duração do projeto e da taxa de juros geral adotada. Os parâmetros de custos estudados incluem a implantação de semáforos atuados (ver BONETTI, 2001, pp.87-93).

O método de SZASZ (1992) não apresenta uma análise sobre a influência no desempenho da operação do tráfego da autoregulação obtida com recurso à atuação ou da necessidade de se estabelecer a periodicidade da revisão semafórica (que é função das variações dos fluxos de tráfego na malha viária, estabelecendo-se as correlações entre locais onde há consolidação do viário e uso do solo, fatores que parecem ser importantes para avaliar os benefícios para os usuários da via, como redução dos seus custos “sociais”).

Uma análise preliminar dos custos operacionais anuais calculados para uma interseção padrão de larguras das vias 10 X 10 metros, com duplo sentido de circulação em ambas as vias, também mostrou que os benefícios sociais são mais importantes que os custos de implantação (como no método de TARNOFF e PARSONSON, 1981).

Em SZASZ (1997), a idéia do método é mais bem aplicada à análise da atuação, ou do controle em tempo real, e baseia-se na comparação do benefício anual que cada tipo de controle implementado traria à cidade. Para tanto, foram considerados os tipos de controle isolado a tempos fixos, isolado atuado, coordenado *off line* e centralizado em tempo real. O método compara as relações benefício/custo utilizando o tempo de viagem como custo social.

O método de estimativa de benefícios associados a autoregulação do semáforo atuado é, no entanto, simplificada. SZASZ (1997) assume que um semáforo operando atuado pelo tráfego consegue redução máxima de 40 % nos atrasos em relação ao controle a tempos fixos, dos quais cerca de 10 % se referem a adequação geral ao volume de tráfego, e 30 % à micro regulação ciclo a ciclo (ver BONETTI, 2001, pp.93-95).

5.4. Modelos de Previsão de Desempenho

Um enfoque desta natureza, baseado em uma análise benefício/custo, tem como necessidade básica a utilização de um modelo de previsão de desempenho capaz de municiar as estimativas de benefícios relevantes para a comparação com os custos da atuação. As alternativas usuais são:

a. HCM (1985, 1994)

O método proposto nas versões do HCM de 1985 e 1994 baseia-se na comparação de atrasos para determinar o Nível de Serviço em termos de fluidez, e não discute critérios de seleção entre opções de controle de tráfego. A análise é, entretanto, mais detalhada e pode ser considerada no contexto geral que pondera os custos sociais.

No HCM (1985 e 1994), há procedimentos simplificados que estimam a operação do semáforo atuado, com um tempo de ciclo médio estimado, supondo-se grau de saturação de 95 % (para tempos fixos 85%) e com verdes médios estimados sob repartição proporcional. O atraso vem calculado como no caso de semáforos a tempos fixos ajustados, para dar conta da atuação.

Portanto, o procedimento do método proposto pelo HCM (1985 e 1994) é o de prever os tempos de verde e ciclo através de modelo analítico, comparando atrasos por fórmulas usuais (não há referência sobre seqüência de estágios variável e, por conseqüência, o método supõe uma seqüência de estágio fixa “equivalente” para atuação). O método não é sensível aos parâmetros da atuação.

b. HCM (1997)

O HCM (1997) adota os mesmos princípios tradicionais de avaliação de Nível de Serviço, mas inclui um método proposto para análise de desempenho com atuação, que leva em consideração os parâmetros operacionais do controlador, devendo estes ser capazes de adequar os tempos à demanda de cada estágio. Tal método tem como objetivo a determinação de como o controlador responde à combinação dos parâmetros de programação e às condições do tráfego, permitindo a geração de indicações de valores ótimos dos parâmetros. Uma vez gerados os tempos de verde médio para cada estágio e o tempo de ciclo médio correspondente, utilizando o método analítico calculam-se os atrasos com as fórmulas usuais.

Para semáforos atuados pelo tráfego, os tempos de verde de uma aproximação são variáveis, dependendo do tempo de vermelho dos movimentos conflitantes, significando uma dependência da dissipação das filas formadas e do tipo de chegada dos fluxos de tráfego após a dissipação. Dessa forma, o tempo de verde médio de cada movimento pode ser estimado como o tempo de atendimento das duas situações apontadas, ou seja, a dissipação da fila formada durante o tempo de vermelho e a passagem do fluxo de tráfego normal. (BONETTI, 2001, pp.95-100)

O processo de cálculo é iterativo, pois não se atinge diretamente os objetivos da determinação dos tempos médios de verde de cada estágio (e, por sua vez, o tempo médio de ciclo), pois o tempo de verde de cada estágio é dependente do seu tempo de vermelho (isto é, do tempo de verde dos outros estágios), criando-se uma dependência circular cuja solução requer um processo iterativo. O tempo de ciclo vem calculado como a soma dos tempos de verde e entreverdes de cada estágio.

6. ESTUDO DE CAMPO SOBRE USO DA ATUAÇÃO

6.1. Seleção do Local para Estudo

O local para estudo foi escolhido na cidade de Campinas, pela facilidade profissional e apoio dado pela gestora do tráfego dessa cidade, a Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas S/A (EMDEC). A Figura 6.1 apresenta o croqui da interseção.

Como critério de seleção, estabeleceu-se que a interseção estudada deveria proporcionar a verificação da utilização do controle semaforico atuado pelo tráfego, em diferentes níveis de utilização da capacidade viária, com características que permitissem detectar o rendimento da

atuação fora dos horários de pico, uma vez que, em tais horários a operação na interseção não está próxima da saturação, mais sujeita às flutuações do tráfego. E, também, nos períodos de pico, nos quais a operação aproxima-se da saturação, sendo possível verificar se o controle atuado tende ao controle a tempos fixos nessas condições operacionais.

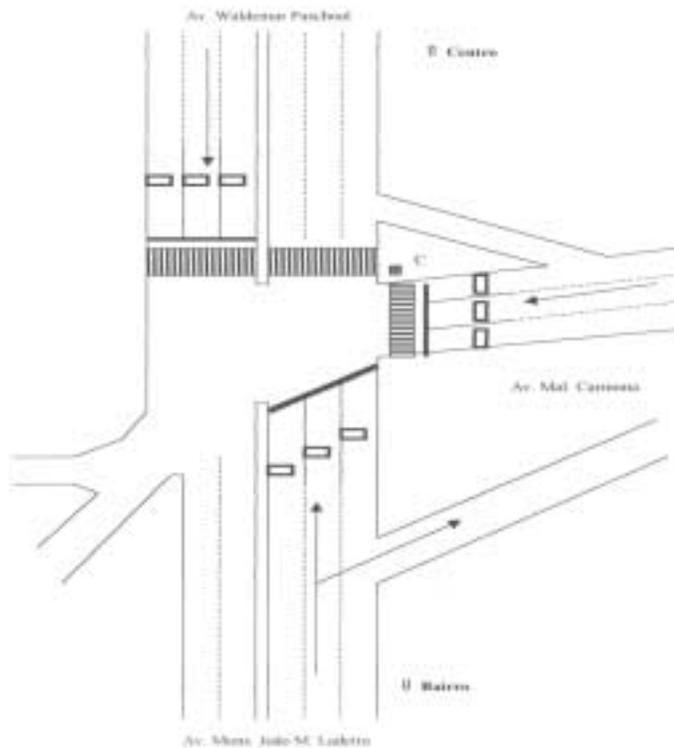


Figura 6.1
Croqui da Interseção Estudada

6.2. Projeto Semafórico

A primeira análise realizada foi a verificação da adequação dos ciclos da programação a tempos fixos existente e, para tanto, fez-se necessário levantamento de dados de volume e fluxo de saturação nas aproximações da interseção. De posse desses dados levantados em campo com contagem veicular classificada no horário entre 07:00 e 24:00 horas (em intervalos de 15 minutos) e histogramas de fluxo para diversos períodos (picos da manhã, meio-dia e tarde), foi possível a verificação dos tempos de ciclo, e das respectivas faixas horárias para aplicação dos planos de tráfego. Com as faixas de pertinência dos planos de tráfego definiu-se, então, o dimensionamento dos mesmos a tempos fixos, utilizando dois critérios complementares:

- o método proposto por WEBSTER e COBBE (1966), na determinação do ciclo ótimo, nos planos não saturados

- para os planos calculados com tempo superior ao máximo, adotou-se o valor limite e a repartição da proposta de cálculo do HCM (1997), que prevê a adoção do grau de saturação operacional ao redor de 95% para a aproximação crítica, determinando-se residualmente o tempo de verde restante à outra aproximação.

A política de gestão de tráfego em Campinas adota como tempo máximo de ciclo, para o controle semafórico a tempos fixos, o valor de 110 segundos. Esta análise confirmou a adequação da programação a tempos fixos existente, que foi então mantida.⁴

A Tabela 6.1 apresenta os tempos de ciclo no controle a tempos fixos antes da implantação do controle atuado, e suas respectivas faixas de tempo e repartição de verde.

Nota-se pelos dados da Tabela 6.1 que as faixas de validade dos planos de tráfego apresentam uma evolução nos tempos de ciclo coerente com os perfis de tráfego na interseção. Apenas um período justificou a utilização do tempo de ciclo máximo (adotado como 105 segundos). Os planos de tráfego com tempo de ciclo de 90 s são introduzidos antes e depois do pico da tarde para obter-se o efeito de acomodação da demanda de maneira suave, de tal forma a evitar-se a entrada do horário de pico com uma probabilidade maior de condições próximas à saturação e, no pico da manhã, tem-se o tempo de ciclo de 60 s que exerce a mesma função operacional. Esta técnica de acomodação é, também, uma política do órgão gestor do tráfego na cidade de Campinas para o controle semafórico a tempos fixos e busca responder a alterações no horário aumento ou redução da demanda antes e depois do período de pico.

Faixa de validade do plano de tráfego	Tempo de ciclo (s)	VD (estágio 1)	VD (estágio 2)
Das 05:00 às 06:30 hs	60	33	17
Das 06:30 às 09:00 hs	85	53	22
Das 09:00 às 11:00 hs	60	33	17
Das 11:00 às 14:30 hs	70	40	20
Das 14:30 às 16:00 hs	65	33	22
Das 16:00 às 16:45 hs	90	56	24
Das 16:45 às 19:30 hs	105	70	25
Das 19:30 às 20:00 hs	90	51	29
Das 20:00 às 21:00 hs	60	33	17
Das 21:00 às 00:00 hs	55	30	15

Tabela 6.1
Programação dos planos a tempos fixos antes da implantação do controle atuado (EMDEC, 2001)

⁴ A análise gráfica da variação da soma das taxas de ocupação permite a determinação das faixas de validade dos planos de tráfego em relação à permanência ao longo do decorrer do tempo. A comparação das faixas obtidas, utilizando os dados colhidos em campo, não apresentaram variação significativa em relação aos horários dos planos no controle a tempos fixos e, portanto, optou-se pela utilização das mesmas faixas horárias já existentes. Os tempos de ciclo e repartições de verde calculadas foram diferentes dos já existentes, mas deve ser ressaltado que os dados colhidos em campo foram de apenas um dia da semana, tendo sido assumido como perfil típico à interseção. Como as programações existentes são fruto de em constantes ajustes operacionais em campo e, portanto, apresentam um caráter operacional mais refinado, optou-se por mantê-las.

No caso do controle atuado pelo tráfego esta estratégia operacional não é necessária, uma vez que o teor de acomodação da atuação garante o mesmo efeito e, portanto, não há necessidade dos planos anteriores e posteriores ao período de pico, seja no período matinal ou vespertino.

Outra estratégia de controle de tráfego usual, também aplicada, busca evitar a saturação na via mais importante, especialmente nos períodos mais saturados (expressa no critério de dimensionamento do HCM, 1997). Em Campinas, os planos de transição inseridos depois dos picos buscam compensar esta política pela inversão de prioridade em relação ao período de pico (prioridade para a via secundária nos períodos de transição depois do pico).

Utilizando-se as mesmas faixas de validade dos tempos de ciclo do controle a tempos fixos e introduzindo a consideração dos planos de tráfego de acomodação da demanda, a Tabela 6.2 apresenta os volumes horários máximos colhidos em campo às respectivas faixas de validade dos planos de tráfego.

Faixa de validade do plano de tráfego	Av. Waldemar Paschoal C/B	Av. Waldemar Paschoal B/C	Av. Mal. Carmona
Das 06:30 às 09:00 hs	2769	2100	976
Das 09:00 às 11:00 hs	2237	1619	812
Das 11:00 às 14:30 hs	2529	1486	947
Das 14:30 às 16:00 hs	1986	1252	800
Das 16:00 às 20:00 hs	3435	2215	1051
Das 20:00 às 21:00 hs	1370	1262	463
Das 21:00 às 00:00 hs	1170	953	713

Tabela 6.2

Volumes horários máximos nas faixas de validade dos planos de tráfego para o controle atuado (veic/h)

Com os histogramas de fluxo, foram obtidos os fluxos de saturação nas três aproximações da interseção no pico da manhã, do almoço e da tarde, com o objetivo de verificar sua variação ao longo dia. Os dados colhidos estão apresentados na Tabela 6.3.

Aproximação	Manhã	Almoço	Tarde
Av. Waldemar Paschoal centro/bairro	4404	5199	5112
Av. Waldemar Paschoal bairro/centro	4572	4914	4794
Av. Marechal Carmona	3900	3840	3906

Tabela 6.3

Fluxos de Saturação nas aproximações em veículos por hora

Na parametrização dos planos de tráfego para o controle atuado, quando se trata da utilização dos controladores nacionais, temos três parâmetros a serem dimensionados para cada estágio de cada plano de tráfego: verde mínimo, verde máximo e intervalo de corte. Os critérios usualmente empregados para parametrização estão descritos em BONETTI (2001, pp.29-53). Quatro hipóteses foram testadas em campo para avaliar-se o desempenho das programações do controle atuado

pelo tráfego com a combinação de duas premissas do verde mínimo e duas do intervalo de corte, que perfazem quatro alternativas.

Para o verde mínimo foram consideradas as premissas de atendimento mínimo de segurança aos pedestres e de atendimento da dissipação de 75% da fila formada com ciclo mínimo. Já em relação ao intervalo de corte, foram consideradas as premissas de probabilidade de corte prematuro no verde de um estágio em 5 e 10% dos ciclos. A Tabela 6.4 mostra as alternativas da pesquisa de campo com os parâmetros de atuação.

Alternativa	Probabilidade de corte prematuro	Verde mínimo
A	5%	Pedestre
B	10%	Pedestre
C	10%	75% da fila
D	5%	75 % da fila

Tabela 6.4

Alternativas do experimento para probabilidade de corte prematuro no verde e verde mínimo

Em todos os casos, o verde máximo foi dimensionado utilizando o critério proposto pelo método de KELL *et al* (1982), que prevê a majoração de 25% no verde calculado pelo método de WEBSTER e COBBE (1966) ou do HCM (1997), conforme o nível de saturação.

Para o parâmetro verde máximo no controle atuado pelo tráfego foi utilizado o dimensionamento proposto pelo ITE (1983), no qual a base advém do dimensionamento de tempos fixos, com uma majoração adotada de 25%. A Tabela 6.5 apresenta os verdes máximos dos planos de tráfego para o controle atuado, sendo que o estágio 1 atende à Av. Waldemar Paschoal e o estágio 2 atende à Av. Marechal Carmona.

Faixa de validade do plano de tráfego	VD max (s) (estágio 1)	VD max (s) (estágio 2)
Das 06:30 às 09:00 hs	91	34
Das 09:00 às 11:00 hs	55	25
Das 11:00 às 14:30 hs	63	27
Das 14:30 às 16:00 hs	33	25
Das 16:00 às 20:00 hs	93	33
Das 20:00 às 21:00 hs	35	25
Das 21:00 às 00:00 hs	28	22

Tabela 6.5

Tempos de Verdes Máximos dos estágios

Os verdes mínimos dependem da alternativa de cálculo, de acordo com a Tabela 6.4 e, portanto variam nas alternativas A, B, C e D. O critério das alternativas A e B é um requisito de segurança. Quando o valor do verde mínimo calculado às alternativas C e D foi menor que aquele das alternativas A e B, o valor dessas últimas foi adotado como critério de segurança. As Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam essa variação em função das alternativas.

Verde mínimo	Alternativas A e B
Estágio 1	12 s
Estágio 2	20 s

Tabela 6.6
Verdes mínimos dos estágios às alternativas de cálculo A e B

Faixa de validade do plano de tráfego	Verde mínimo (estágio 1) (s)	Verde mínimo (estágio 2) (s)
Das 06:30 às 09:00 hs	52	21
Das 09:00 às 11:00 hs	28	20
Das 11:00 às 14:30 hs	30	20
Das 14:30 às 16:00 hs	14	20
Das 16:00 às 20:00 hs	55	22
Das 20:00 às 21:00 hs	12	20
Das 21:00 às 00:00 hs	12	20

Tabela 6.7
Verdes mínimos dos estágios às alternativas C e D

Os intervalos de corte foram determinados pelo método proposto por VILANOVA (1990) e são funções do fluxo de saturação e do somatório das taxas de ocupação das aproximações e, portanto, variam de acordo com os planos de tráfego e suas faixas de validade ao longo do tempo. A Tabela 6.8 apresenta os valores dos intervalos de corte para os planos de tráfego.

Faixa de validade do plano de tráfego	Alternativas A/D		Alternativas B/C	
	IC E1	IC E2	IC E1	IC E2
Das 06:30 às 09:00 hs	1,7	2,1	1,2	1,5
Das 09:00 às 11:00 hs	2,4	2,8	1,3	1,9
Das 11:00 às 14:30 hs	1,9	2,7	1,7	2,0
Das 14:30 às 16:00 hs	2,5	3,5	1,7	2,5
Das 16:00 às 20:00 hs	1,4	2,4	0,9	1,4
* modificações	2,4			
Das 20:00 às 21:00 hs	4,2	5,7	3,1	4,2
Das 21:00 às 00:00 hs	4,0	5,4	2,9	4,0

Tabela 6.8
Intervalos de corte calculados para os planos de tráfego para cada alternativa

Os testes de campo realizados com os valores de intervalo de corte calculados mostraram que a operação foi adequada exceto para a Av. Waldemar Pascoal no pico da tarde, que experimentava um número excessivo de cortes prematuros. Neste caso, os valores calculados não puderam ser mantidos e tiveram de ser majorados de forma significativa. Este fato será comentado adiante e foi relacionado com o efeito decorrente da presença de veículos pesados (ônibus e caminhões) em

um aclave. Por este motivo, abandonou-se a análise dos critérios de parametrização para o pico da tarde, dado que os valores de cálculo não puderam ser mantidos.⁵

6.3. Análise dos dados coletados

Os períodos para análise de desempenho foram pico da manhã (07:00 às 09:00 hs), entre-pico da manhã (das 09:00 às 11:00 hs) e pico do almoço (das 11:00 às 14:30 hs). Como anteriormente mencionado, a observação no período de pico da tarde teve de ser abandonada. A escolha destes horários baseou-se na condição de saturação ou não e, portanto, condição de maior análise da validação dos métodos propostos.⁶

A Tabela 6.9 apresenta os valores de atraso a tempos fixos coletados em campo através do procedimento proposto pelo HCM (1997, capítulo 9, apêndice 3).

Aproximação	Atraso médio s/veic		
	Pico da manhã	Entre pico	Pico do almoço
Av. Waldemar Paschoal c/b	5,97 ± 0,95	7,59 ± 1,18	9,47 ± 3,76
Av. Marechal Carmona	32,25 ± 5,97	16,68 ± 2,28	22,79 ± 6,05

Tabela 6.9

Atraso médio colhido em campo na programação a tempos fixos
(média de 4 a 5 medições de 2 dias distintos ± desvio padrão das medições)

O primeiro aspecto analisado foi a adequação dos critérios de parametrização, para definir-se qual alternativa seria melhor utilizar no controle semaforico atuado pelo trafego para garantir-se otimização operacional. Para isso, recorreu-se a uma pesquisa qualitativa entre quatro alternativas que foram testadas nos horários de pico e fora pico. Foram escolhidos o corte prematuro de verde e o verde ocioso como referências. Essa escolha deve-se ao fato de que as quatro alternativas são a combinação da variação desse dois fatores.

As Tabelas 6.10 e 6.11 apresentam os dados colhidos em campo em relação à porcentagem de ocorrência de cada fator em cada alternativa (colhidos em um dia útil distinto).

	A	B	C	D
Horário de pico	10%	30%	0%	0%
Fora do pico	10%	40%	20%	0%

Tabela 6.10

Porcentagem de ocorrência de corte prematuro de verde na Waldemar Paschoal
(sentido centro bairro)

⁵ Com um método de cálculo revisado, admitindo uma distribuição dicotômica de intervalos para autos e pesados (ponderada pela composição de trafego existente, adotando um fator equivalente igual a 2 para pesados), chegou-se a um intervalo de corte de 1,8 segundos (ainda menor que o valor de 2,4 segundos, que se mostrou praticável em campo). Isto sugere que o intervalo entre autos e pesados é relevante (como também sugere a observação de campo).

⁶ Note-se que a monitoração de desempenho observou apenas os fluxos dominantes de cada estágio.

	A	B	C	D
Horário de pico	0%	40%	30%	30%
Fora do pico	5%	50%	50%	40%

Tabela 6.11

Porcentagem de ocorrência de verde ocioso na Av. Marechal Carmona

A análise dos dados das Tabelas 6.10 e 6.11 demonstra que a alternativa D apresenta o melhor rendimento em relação ao corte prematuro, mas em relação ao verde ocioso da via secundária apresenta índices percentuais elevados. A alternativa A é aquela de melhor desempenho prático, uma vez que apresentou corte prematuro em 10% dos ciclos observados e apresenta a menor ocorrência de verde ocioso na Av. Marechal Carmona que se caracteriza como via secundária. As alternativas B e D representam uma situação operacional pior que as outras duas.

A aplicação da atuação nas alternativas A e B é menos restringida pelos verdes mínimos e, dessa forma, permite mais ajuste às flutuações da demanda. Nas alternativas C e D a atuação propriamente dita inicia somente após o verde que atende a dissipação de 75% da fila no ciclo mínimo, o que restringe o controle atuado pelo tráfego em relação às alternativas A e B, nas quais o verde mínimo é menor, pois atende à travessia de pedestres.

Outrossim, a alternativa A não tem ociosidade, mas exibe mais cortes prematuros que aqueles admitidos pela condição de projeto, ou seja, 10% contra 5% que corresponde a 95% de probabilidade de não haver cortes prematuros. A mesma característica ocorre nas outras alternativas que tiveram menor verde mínimo (determinado pelo tempo de pedestre) e é o aspecto que inviabilizou o a parametrização no período do pico da tarde.

Diante do exposto, a escolha para se efetuar a validação do método do HCM (1997), em relação à estimativa dos verdes médios, e conseqüente tempo médio de ciclo e atraso médio, recaiu sobre a alternativa A (intervalo de corte para probabilidade de 95% e verde mínimo para os pedestres).

Para esta alternativa, foi feita uma monitoração com medição dos atrasos médios observados em campo, novamente utilizando o procedimento proposto pelo HCM (1997, capítulo 9, apêndice 3), apresentados a seguir na Tabela 6.12.

Aproximação	Atraso médio s/veic.		
	Pico da manhã	Entre pico	Pico do almoço
Av. Waldemar Paschoal c/b	10,63 ± 3,20	8,78 ± 2,05	9,04 ± 0,57
Av. Marechal Carmona	31,46 ± 12,22	18,92 ± 4,36	16,88 ± 3,45

Tabela 6.12

Atraso médio colhido em campo na programação com atuação pelo tráfego

O aspecto analisado é relativo ao desempenho comparativo das programações do controle a tempos fixos ou atuado pelo tráfego. A comparação mostra que os atrasos cresceram mais para a

Av. Waldemar Paschoal e decresceram mais para a Av. Marechal Carmona, como mostra a Tabela 6.13. O pico do almoço, em que o desvio padrão relativo do atraso médio com a programação a tempos fixos foi maior, foi a de melhor resultado comparativo para a atuação.

Período	Δ %		
	Pico da manhã	Entre pico da manhã	Pico do almoço
Av. Waldemar Paschoal c/b	+78,06 %	+15,74 %	-6,26 %
Av. Marechal Carmona	-2,76 %	+13,37 %	-25,94 %

Tabela 6.13

Variação percentual do atraso médio colhido em campo para programações para o controle a tempos fixos e atuado pelo tráfego

Além de mostrar a habilidade de adaptação às flutuações, este padrão de resultado pode ser relacionado com a discrepância oriunda do desbalanceamento das prioridades para as diferentes aproximações introduzida na repartição de verde com a programação de tempos fixos.

Na parametrização da programação com controle semafórico atuado pelo tráfego, ambas as aproximações da interseção receberam mesma prioridade. Os critérios equivalentes, em termos de controle atuado, seriam relacionados com a utilização dos parâmetros de atuação (verde mínimo, verde máximo ou intervalo de corte) para gerar um padrão similar. A não utilização desta estratégia no controle atuado pode explicar os resultados obtidos.

Um comentário adicional, obtido pela observação qualitativa da operação em campo, é que o controle atuado pelo tráfego demonstrou-se eficaz no desmanche das filas formadas na ocorrência de imprevistos que reduziam temporariamente a capacidade das vias. O poder de adaptação do controle atuado pelo tráfego na variação da demanda e/ou da capacidade da via pode ser observado em campo quando da ocorrência de estacionamento de veículos junto à faixa de retenção de uma das aproximações. Os tempos de verde e, conseqüentemente os tempos de ciclo, se elevaram como resposta à restrição da capacidade da via, até que a interferência fosse removida. Após a remoção, os tempos de verde e ciclo voltaram às médias do período, caracterizando a adaptação do controle atuado pelo tráfego ao dinamismo operacional das vias.

O teor da validade operacional do controle atuado pelo tráfego pode ser observado em campo, pois a adaptabilidade dos tempos de verde foi capaz de resolver pontualmente as interferências que ocorreram nas vias. Por outro lado, os responsáveis pelo tráfego em Campinas admitiram a eficiência do controle, e prova desse fato foi a solicitação de estudos em relação a novas interseções que deverão receber o controle semafórico atuado pelo tráfego. Os técnicos que acompanharam a pesquisa e têm conhecimento das condições de tráfego das vias envolvidas apontaram uma sensível melhora visual nas condições do tráfego na interseção e, ainda, que houve redução na duração do horário dos picos, fato que não foi possível mensurar pela ausência de dados precisos.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As vantagens e desvantagens da utilização dos semáforos atuados pelo tráfego são pouco estudadas no Brasil, o que pode ser citado como causa e/ou consequência de seu pequeno uso.

A atuação pode ser avaliada como estratégia final em interseções isoladas ou como estratégia intermediária em redes semafóricas.

Em relação às diferentes linhas de evolução abertas hoje a um sistema de administração de tráfego, no que diz respeito a atuação, o uso em interseções isoladas vai ao encontro às características de variação dos fluxos nos núcleos urbanos regionais periféricos às áreas centrais dos municípios. São regiões onde o grau de saturação atinge valores considerados de médios a altos durante pouco tempo ao longo do dia, o que justificaria o uso desse tipo de controle, uma vez que a proposta do controle semafórico atuado é a adaptação dos tempos de verde de acordo com a demanda existente, reduzindo os atrasos inerentes às ociosidades (o que acontece no controle a tempos fixos).

Nas vantagens do uso da atuação em si, sem ser uma tecnologia de transição são pertinentes às características na micro-regulação (ciclo a ciclo) a acomodação automática à evolução da demanda ao longo do tempo, ou quando há variações de caráter operacional, tal como incidentes e eventos ocasionais. O controle semafórico a tempos fixos, mesmo utilizando-se controladores multiplanos, quando comparado com o controle atuado, apresenta desvantagens diretas, em relação a não contar com o recurso da micro regulação e acomodação de caráter operacional. Já em relação às variações de demanda ao longo do tempo, o controle a tempos fixos utilizando-se controladores multiplanos, atenderia essa necessidade, mas os custos de regulação das programações (revisões semafóricas) parcialmente faz com que a atuação seja mais eficiente.

Outra vantagem do controle atuado é a habilidade de adaptação à ocorrência de incidentes usuais na operação e eventualmente de melhorar o respeito à sinalização, pois com a micro-regulação minimiza-se as ociosidades dos períodos de verde no controle semafórico.⁷

Em relação às diferentes linhas de evolução abertas hoje a um sistema de administração de tráfego, no que diz respeito a atuação, o uso em redes de semáforos parece oferecer uma alternativa a uma tendência pela centralização em tempo real como forma de controle semafórico nas cidades brasileiras (que gera um impasse estrutural). Os controladores de tráfego em operação nas cidades brasileiras são, na sua grande maioria, de fabricação nacional e os softwares disponíveis permitem apenas centralização de supervisão e operação. Portanto, para se chegar ao controle em tempo real há necessidade da troca dos controladores existentes por equipamentos que suportem esse tipo de controle e, além disso, o controle em tempo real exige a implementação de detecção, fato que deve ser considerado na análise. Em qualquer controle

⁷ Além disso, o uso do amarelo piscante em uma interseção está vinculado às reduções das demandas nas vias que a compõem e o controle atuado pode reduzir o tempo de operação nesse modo, pois as adaptações automáticas à demanda devem ser capazes de se acomodar melhor às necessidades operacionais.

semafórico centralizado sempre há necessidade da implementação de rede de comunicação envolvendo os controladores de tráfego e a central de controle (fibra ótica, cabos coaxiais, linhas telefônicas privadas, etc.) o que gera custos de implantação e manutenção.

A implantação gradativa tende a cumprir os passos intermediários do controle semafórico, de tal forma a estabelecer o tipo de controle de acordo com o crescer das necessidades operacionais da malha viária urbana, sem que haja saltos provocando descontinuidade no processo. Por exemplo, se uma cidade conta com equipamento eletromecânico monopiano, devem ser implantados controladores eletrônicos multiplanos, operando em modo isolado. Neste ponto, o passo seguinte seria a implementação de redes com centralização de supervisão e operação e/ou o uso local da atuação pelo tráfego. Somente após isso dever-se-ia pensar em controles de seleção automática de planos ou tempo real. Passar diretamente do controle semafórico com equipamentos eletromecânicos para tempo real é queimar as etapas intermediárias e assumir os problemas causados por isso.⁸

Portanto, o estudo sobre a utilização dos controladores atuados tem importância na definição de uma alternativa de evolução em contraposição ao controle em tempo real.

No que se refere ao uso da atuação em semáforos isolados, existe um hiato entre as recomendações teóricas genéricas (favoráveis, que supõe eficiência dos semáforos atuados na redução de atrasos) e as recomendações práticas específicas (restritivas, que limitam o uso da atuação a correntes de tráfego secundárias de veículos ou pedestres).

Os estudos de campo realizados mostram que a efetividade potencial dos semáforos atuados depende de uma adequada parametrização ou ajuste de campo. Mesmo em interseções com graus variados de solicitação e correntes de tráfego importantes, os semáforos atuados podem operar adequadamente, em termos de atraso médio, e trazem vantagens operacionais relevantes ao acomodar as variações de demanda e oferta. Esta observação apoia a visão teórica genérica e aponta para a necessidade de critérios de implantação baseados em uma análise benefício/custo.

Atualmente, existem modelos de previsão e avaliação de desempenho sensível aos parâmetros de controle atuado pelo tráfego, mas que não consideram os ganhos relativos à adaptação aos incidentes e/ou envelhecimento dos planos. Os critérios de parametrização existentes também são praticáveis na maior parte dos casos, embora ainda devam ser desenvolvidos para acomodar situações específicas relevantes (como a necessidade de priorizar alguma corrente de tráfego e/ou a presença de veículos pesados em aclives). Estas observações indicam a necessidade de aprimorar as técnicas atuais (ver BONETTI, 2001, para ambos os aspectos).

Portanto, o estudo sobre a utilização dos controladores atuados e o desenvolvimento das técnicas relacionadas é uma linha de pesquisa que merece maior atenção.

⁸ As estratégias de detecção utilizadas por diferentes sistemas de controle em tempo real podem ou não ser compatíveis com as diferentes tecnologias de detecção. Por exemplo, detectores usuais, instalados próximos às linhas de retenção, são compatíveis com sistemas como o SCATS mas não com sistemas como o SCOOT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKÇELIK, R. (1995) **Signal Timing Analysis for Vehicle-Actuated Control** - Australian Road Research Board Ltd – Project TE 074 – Report WD TE 95/007, Australia.
- AKÇELIK, R. (1996) **Estimation of Green Times and Cycle Time for Vehicle-Actuated Signals** – Transportation Research Record 1457
- BONETTI, W. J. (2001) – **Utilização e Parametrização de Semáforos Atuados pelo Tráfego** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, Brasil
- BRASCONTROL S/A (1995) - **Catálogo de Controladores de Tráfego** – São Paulo
- BRASLÍNEA S/A (1995) – **Catálogo de Controladores de Tráfego** – São Paulo
- CET-SP - Companhia de Engenharia de Tráfego (1978), **Manual de Sinalização Urbana – Sinalização Semafórica**, ed. 1990, Prefeitura do Município de São Paulo, São Paulo, Brasil
- Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN (1978) – **Manual de Semáforos** – Ministério da Justiça, Brasil (elaborado pela Companhia de Engenharia de Tráfego da Prefeitura Municipal de São Paulo)
- DIGICON S/A (1995) – **Catálogos de Controladores de Tráfego** – Rio Grande do Sul
- Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas S/A – EMDEC - (1995) – **Questionário de Verificação de Especificações Técnicas de Controladores de Tráfego** – EMDEC – Campinas, São Paulo
- Federal Highway Administration (1978) – **Manual of Uniform Traffic Control Devices** - Department of Transportation, USA.
- Federal Highway Administration (1988) – **Manual of Uniform Traffic Control Devices** - Department of Transportation, USA.
- Federal Highway Administration (2000) – **Manual of Uniform Traffic Control Devices** - Department of Transportation, USA.
- HOMBURGER, W.S., KELL, J.S., PERKINS, D.D. (1992) - **Fundamentals of Traffic Engineering** - 13th ed. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, USA.
- KELL, J.H., FULLERTON, I.J. (1982) – **Manual of Traffic Signal Design** – Institute of Transportation Engineers - USA
- McSHANE, W.R, ROESS (1990), R.P. - **Traffic Engineering** - Englewood Cliffs, N.J.: Prentice – Hall, USA
- SETRA, (1973) – **Carrefour a Feux** - Ministère de L'Equipement, Direction des Routes et de la Circulation Routiere, Paris, França
- SZASZ, P.Á. (1992) – **Custos de Sinalização** - Nota Técnica No.150, Companhia de Engenharia de Tráfego, Prefeitura do Município de São Paulo, Brasil.
- SZASZ, P.Á. (1997) – **Estudo de Viabilidade de Implantação de Centralização Semafórica na Cidade de Campinas** – Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas (EMDEC), Campinas, Brasil
- TARNOFF, P.J.; PARSONSON, P.S. (1981) – **Selecting Traffic Signal Control at Individual Intersection** - NCHRP Report 233, National Research Council, USA.
- TESC INDÚSTRIA E COMÉRCIO S/A (1997) – **Catálogo de Controladores de Tráfego** – São Paulo

- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1985) - **Highway Capacity Manual** - National Research Council, Washington, D.C., USA.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1994) - **Highway Capacity Manual** - National Research Council, Washington, D.C., USA.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1997) - **Highway Capacity Manual** - National Research Council, Washington, D.C., USA.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000) - **Highway Capacity Manual** - National Research Council, Washington, D.C., USA.
- VILANOVA, L.M. (1990) – **Semáforos Atuados** - Curso Semáforos II, Companhia de Engenharia de Tráfego, Prefeitura do Município de São Paulo, Brasil.
- WEBSTER, F.V., COBBE, B.M. (1966). **Traffic Signals** - Road Research Laboratory, paper nº 56. H.M.S.O., London.

Agradecimentos:

Este trabalho não seria possível sem o apoio recebido pela Diretoria de Tráfego da Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas - EMDEC, Digicon S/A, Tesc S/A e Pro Traffic S/A

Set/2001