

TECNOLOGIA: SINALIZAÇÃO DE TRÂNSITO



Automação semafórica: aplicando tecnologia para maximizar a capacidade viária existente

Marcello Victorino Junqueira de Souza

M.Sc. em Engenharia de Transportes (PET/Coppe/UFRJ)

M.Sc. em Engenharia Urbana (PEU/Poli/UFRJ)

E-mail: victorinoeng@poli.ufrj.br

Armando Carlos de Pina Filho

D.Sc. em Engenharia Mecânica (PEM/Coppe/UFRJ)

Professor e coordenador do Programa de Engenharia Urbana (PEU/Poli/UFRJ)

E-mail: armando@poli.ufrj.br

Estima-se que semáforos mal programados sejam responsáveis por cerca de 10% dos atrasos diários nas principais rodovias norte-americanas, considerando todos os veículos (USDOT, 2004). O conceito de tempo é relativo, sendo influenciado pelo estado de espírito do indivíduo. Dessa forma, mesmo poucos segundos perdidos em uma interseção podem exercer expressivo impacto no nível de serviço percebido pelo usuário, particularmente nos casos em que a programação semafórica aloca significativa parcela do tempo de fase verde para um sentido da via que apresenta reduzido volume de veículos.

De fato, uma pesquisa nacional conduzida pela Administração Federal das Rodovias dos Estados Unidos (da sigla em inglês, FHWA), em 2001, apontou que 47% dos entrevistados consideravam os atrasos ocasionados por congestionamentos como o principal problema nas cidades americanas (FHWA, 2001).

No entanto, as externalidades causadas pelos congestionamentos não são exclusividades de países desenvolvidos. No Brasil, por exemplo, o tempo médio de deslocamentos do tipo casa-trabalho apresenta tendência de crescimento. A cada nova pesquisa, as regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo superam os seus já elevados números, disputando a liderança pela região com pior desempenho do país, como pode ser visto na figura 1.

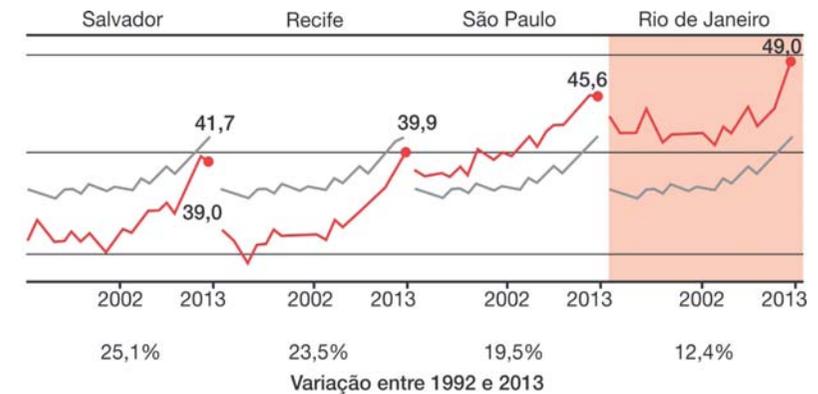
Um estudo realizado pela Firjan (2015) estima que os congestionamentos no Brasil imponham um custo de produção sacrificada superior a R\$ 111 bilhões ao ano, 4,5% do PIB nacional. Isto é, de acordo com o mesmo autor, o que deixa de ser produzido na econo-



www.antp.org.br

mia devido ao tempo perdido por um indivíduo, referente ao tempo de deslocamento pendular casa-trabalho-casa que exceda 30 minutos. Embora existam críticas quanto à metodologia utilizada para mensurar tais custos – conforme apontado por Eduardo Vasconcellos (Instituto Movimento), estimando impacto de 1 a 3% do PIB de São Paulo –, torna-se possível identificar uma “ordem de grandeza” dos custos impostos pelos congestionamentos, ressaltando a relevância deste problema.

Figura 1
Evolução do tempo médio de deslocamento nas regiões metropolitanas, em minutos



Legenda

Tempo médio na região

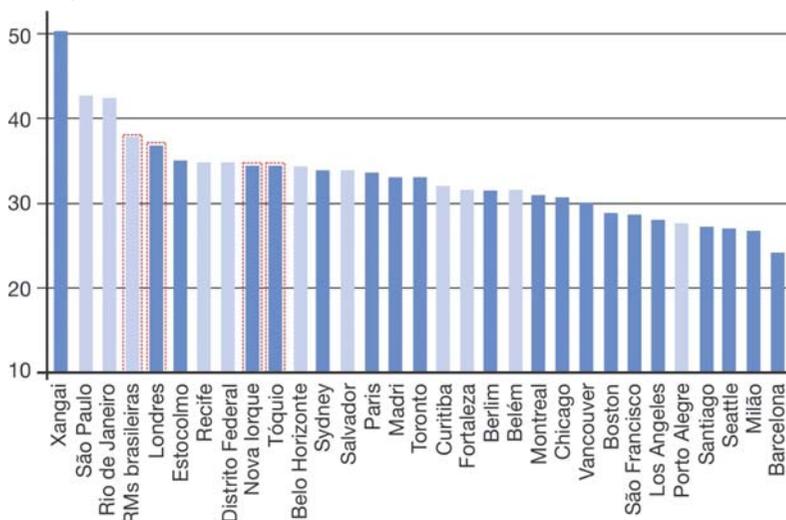
Tempo médio em todas as áreas metropolitanas

Fonte: Adaptado de Globo (2013).

Além do impacto financeiro, os recorrentes congestionamentos afetam também a qualidade de vida da população, expondo-a a elevados níveis de poluição sonora e atmosférica. Estudos na área de medicina correlacionam o aumento da incidência e gravidade de doenças respiratórias, assim como o aumento do nível de estresse, com a maior exposição à poluição oriunda dos congestionamentos (Health Effects Institute, 2010; Mcadam *et al.*, 2011).

Como pode ser visto na figura 2, diversas regiões metropolitanas do mundo sofrem com os elevados tempos médios de deslocamento (Pereira e Schwanen, 2013). Observa-se que a média das regiões metropolitanas brasileiras apresenta desempenho similar ao de regiões como Londres, Nova York e Tóquio.

Figura 2
Comparação do tempo médio de deslocamento entre regiões metropolitanas do mundo, em minutos



Fonte: Adaptado de Pereira e Schwanen (2013).

Reconhecendo a importância deste problema, os Estados Unidos da América, em 2006, estabeleceram uma política nacional de estratégias para mitigar os congestionamentos. Dentre as recomendações propostas, destacam-se: 1) o aprimoramento do sistema de transporte público e 2) a adoção de medidas de gerenciamento da demanda; ambas com o objetivo de influenciar na decisão de escolha modal, captando usuários do automóvel. E ainda, 3) a utilização de novas tecnologias para promover o aprimoramento operacional do tráfego, facilitando a disseminação de informação para os condutores e a capacidade de resposta a incidentes; com o objetivo de maximizar a eficiência da capacidade viária já existente (USDOT, 2006).

De forma similar, em 2012, o governo brasileiro estabeleceu a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), apresentando medidas e recomendações para combater os congestionamentos e melhorar a mobilidade nas cidades brasileiras. Além disso, com peso de lei, a PNMU adotou também uma abordagem preventiva ao problema, tornando obrigatória a elaboração de planos de mobilidade para cidades com mais de vinte mil habitantes. Ou seja, incentivando que as cidades começassem a pensar sobre seu planejamento de transportes antes de crescerem demais e de que os problemas de mobilidade começassem a surgir (Brasil, 2012).



www.antp.org.br

No entanto, o programa brasileiro concentra suas recomendações no estímulo ao transporte público, incentivo aos deslocamentos por transporte não motorizado (TNM) e desestímulo ao uso do automóvel. Sua referência aos semáforos se limita à segurança dos pedestres e ciclistas, recomendando a adoção de fases de vermelho total e visores de contagem regressiva (Brasil, 2015).

Ambos os programas apresentam estratégias similares, reconhecendo a importância da quebra do paradigma da dependência do automóvel e concentrando esforços para assegurar diferentes alternativas de transporte. Porém, o programa norte-americano – com maior enfoque no aprimoramento operacional na gestão do tráfego – reconhece o potencial dos sistemas inteligentes de transporte (do inglês, ITS) e recomenda a utilização de novas tecnologias para o monitoramento e automação, em tempo real, do controle semafórico.

Assim, com o objetivo de avaliar o potencial de alternativas tecnológicas que permitam maximizar a eficiência da capacidade viária existente, este artigo se desenvolve pela revisão bibliográfica da automação semafórica, identificando seus principais sistemas, características operacionais, benefícios, custos de implantação e dificuldades.

SISTEMAS ADAPTATIVOS DE CONTROLE SEMAFÓRICO

Os sistemas adaptativos de controle semafórico (da sigla em inglês, ATCS – *adaptive traffic control systems*) aprimoram a gestão operacional do tráfego de veículos, tornando possível que o controle semafórico possa se adaptar às variações das condições de circulação. Isto é, permitem alterar as fases e tempos de programação semafórica na medida em que ocorrem flutuações no fluxo de veículos. Tais flutuações ocorrem ao longo do ano (férias escolares etc.), ao longo da semana (final de semana, feriados etc.), e também ao longo do dia (diferentes horários de pico).

Este comportamento dinâmico é característica intrínseca da circulação de pessoas e mercadorias. Logo, o sistema de controle semafórico também deve ter essa característica. A automação semafórica faz uso de tecnologias para monitorar o volume e fluxo de veículos, permitindo coletar dados em tempo real para alimentar algoritmos de otimização que, por sua vez, alteram a programação semafórica. Este procedimento ocorre de forma cíclica, sendo o algoritmo de otimização constantemente retroalimentado pelo resultado das alterações realizadas. Assim, o sistema atua de forma dinâmica, buscando sempre se ajustar às condições do tráfego com o objetivo de melhorar o nível de serviço da circulação viária.

No entanto, a própria dinâmica das condições de circulação viária está sujeita a variações como, por exemplo, em casos de acidentes de trânsito, desastres naturais ou mesmo a realização de megaeventos. Embora obras ou acontecimentos de grande porte possam ser planejados com

antecedência, ainda assim não é possível prever com exatidão a extensão e intensidade dos impactos ocasionados na rede de transportes. A utilização de técnicas avançadas na construção dos algoritmos de otimização, como lógica Fuzzy e inteligência artificial, permite distinguir entre um comportamento típico e a ocorrência de eventos singulares (Abdulhai *et al.*, 2003; Benhamza e Seridi, 2015; Gayah *et al.*, 2014; Gündoğan *et al.*, 2014; Jacob e Abdulhai, 2010). É esta característica que diferencia os sistemas adaptativos da sincronização semafórica.

Embora o efeito de fluxo contínuo com redução das interrupções em vias específicas (conhecido como “onda verde”) também possa ser obtido, os sistemas adaptativos são capazes de reconhecer eventos especiais e tratá-los de forma diferenciada, sem comprometer a programação otimizada existente para condições usuais. Assim, uma vez que a condição normal de circulação tenha se reestabelecido, a programação semafórica volta a atuar de forma otimizada para o fluxo existente. Ao priorizar, por exemplo, o acesso de unidades especiais (ambulância, bombeiros e polícia) ao local do incidente, a automação semafórica contribui para aprimorar a capacidade de resposta a acidentes (Djahel *et al.*, 2015).

Além disso, a automação semafórica pode ser utilizada para priorizar a circulação de transporte público (Dion *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2009) e aumentar a segurança da travessia de pedestres e ciclistas (Singh *et al.*, 2011), configurando-se como uma ferramenta importante para o sistema de transportes como um todo.

O conceito dos sistemas adaptativos de controle semafórico (ATCS) não é recente. Sua primeira aplicação prática ocorreu na década de 1960, na Inglaterra, porém sem sucesso. Já na década seguinte, em 1970, dois sistemas foram aplicados com êxito, sendo os mais utilizados até hoje: Scats (*Sydney coordinated adaptive traffic system*), desenvolvido na Austrália; e Scoot (*split cycle offset optimization technique*), desenvolvido na Inglaterra. Com o avanço da tecnologia foi possível aprimorar os sensores de obtenção de dados e as redes de comunicação, além da capacidade de processamento. Dessa forma, com o objetivo de aprimorar seu desempenho e reduzir custos de implantação, novos sistemas são desenvolvidos, enquanto os tradicionais se atualizam.

Sumarizam-se nos subitens a seguir informações operacionais dos principais sistemas de fato utilizados no mundo, com suas vantagens e limitações, conforme amplos estudos de revisão realizados por Fehon e Peters (2010); Selinger e Schmidt (2009); Stevanovic (2010); TTI (2012); e Zhao e Tian (2012).

Principais sistemas

Os sistemas adaptativos de controle semafórico são basicamente compostos por três elementos fundamentais: 1) coleta de dados; 2) comunicação; e 3) processamento pelo algoritmo. Embora seu funcio-



namento seja similar, as diversas tecnologias disponíveis para cada elemento tornam as aplicações dos ATCS quase únicas, o que dificulta uma análise comparativa para identificar a melhor solução.

A maioria dos ATCS utilizam algoritmos de otimização que se baseiam na estrutura convencional de programação semafórica, restrito à duração do ciclo, tempos de fases e suas transições: Scats, Scoot. No entanto, alguns sistemas abandonam essa convenção e adotam abordagens de abstração matemática como: Opac (*optimization policies for adaptive control*); Prodyn (*programming dynamic*) e Utopia (*urban traffic optimization by integrated automation*). Porém, os dois primeiros foram desenvolvidos com foco na otimização de interseções individuais, enquanto o último se aplica ao nível de redes viárias com múltiplas interseções.

A figura 3 ilustra a quantidade de semáforos automatizados nos Estados Unidos por tipo de sistema e estado. Percebe-se que Scats (vermelho) e Scoot (azul), desenvolvidos há mais de 30 anos, são os sistemas dominantes, sendo as opções utilizadas em aplicações com mais de 50 semáforos. Pode-se inferir, então, que o nível de maturidade do sistema está relacionado com sua escala de implantação. Assim, os sistemas mais recentes, como Opac, Rhodes (*real-time hierarchical optimization distributed effective system*) e ACS-Lite (*adaptive control software* em sua versão simplificada) são adotados em menor escala, de caráter experimental.

Figura 3
Quantidade de semáforos automatizados por sistema e estado dos EUA



Fonte: Adaptado de Stevanovic (2010).

A presença de diversos casos utilizando sistemas recentes e em menor escala de aplicação pode ser justificada pelo programa de incentivo do governo americano, o qual facilita a aplicação de caráter experimental, oferecendo apoio técnico e financeiro.

Ainda, em destaque na figura 3, Oakland County, no Michigan, se configura como o caso de maior aplicação prática dos sistemas adaptativos de controle semafórico, com 650 sinais automatizados, utilizando o sistema Scats.

Scats

Desenvolvido na década de 1970 pela Autoridade de Trânsito Viário de Sydney, Austrália, é um dos sistemas adaptativos mais utilizados no mundo e apresenta elevado nível de maturidade. Seu sistema de detecção é composto por sensores que podem ser instalados nos seguintes locais: 1) exatamente na faixa de retenção, que permite obter dados sobre os veículos que cruzam a interseção; 2) de 10 a 60 metros da faixa de retenção, possibilitando medir formação de filas moderadas; e 3) no meio do quarteirão à montante, aplicado em casos que apresentem formação de filas longas.

Seu tipo de ação é considerado reativo, uma vez que as alterações propostas na programação são calculadas sobre os dados obtidos no intervalo anterior de medição; ou seja, o sistema opera de forma defasada. Sua lógica de otimização é ajustada com base em uma regra pré-definida, representada por uma simples relação entre os parâmetros variáveis e as condições medidas do tráfego. Seu intervalo de análise é baseado em ciclos semafóricos completos.

Por ser reativo, não utiliza nenhuma ferramenta de simulação para modelar e estimar variações na demanda. Assim, como outros sistemas que se aplicam a múltiplas interseções, sua execução requer que os semáforos a serem automatizados sejam subdivididos em grupos específicos. No entanto, o Scats é um dos poucos sistemas (além do Scoot) que suportam a reconfiguração das subdivisões de forma automática, possibilitando trabalhar sempre com a melhor distribuição das interseções a serem automatizadas. Sua atuação permite alterar a divisão das fases (*split*), o tempo de ciclo (*cycle length*) e sua variação ao longo do dia (*offset*), porém não é capaz de alterar o sequenciamento das fases como, por exemplo, incluir uma fase de vermelho total para comportar com maior segurança a travessia de elevada quantidade de pedestres e ciclistas.

Assim como a maioria dos ATCS, sua operação é compatível com acionamento em função da detecção de veículos, permitindo que controladores locais interfiram na programação semafórica, interrompendo uma



www.antp.org.br

fase de verde caso não haja demanda detectada em determinado movimento. Além disso, também pode ser programado para dar prioridade a veículos do transporte público, alterando a programação semafórica para minimizar suas interrupções.

Vale destacar que é o único sistema totalmente reativo, sem fazer uso de modelos de previsão da flutuação de demanda. Embora teoricamente espera-se que sistemas com resposta em tempo real apresentem melhor desempenho de otimização, o Scats é um dos sistemas mais utilizados no mundo e apresenta resultados positivos, sendo bem avaliado em diversas pesquisas realizadas (Fehon e Peters, 2010; Selinger e Schmidt, 2009; Stevanovic, 2010).

Embora tenha sido desenvolvido originalmente para aplicações em vias arteriais, este sistema também apresenta resultados positivos em malhas urbanas e aplicações de menor escala (Fehon e Peters, 2010).

Scoot

Similar ao anterior, este sistema foi desenvolvido na década de 1970 pela unidade de pesquisa da Siemens, na Inglaterra. Também apresenta elevado nível de maturidade, sendo utilizado em diversos lugares no mundo. Seus sensores de detecção podem ser localizados exatamente na faixa de retenção, ou completamente à montante, obtendo dados dos veículos que cruzam a interseção anterior.

Seu tipo de ação é misto, sendo proativo para determinar a divisão de fases (*split*) e variações (*offset*), mas reativo no cálculo da duração do ciclo (*cycle length*). Isto é, a determinação do tempo de ciclo é feita de forma defasada, enquanto os outros componentes são determinados com dados obtidos em tempo real, baseados na demanda projetada para cada interseção. Assim, no caso proativo, sua atuação exerce influência antes mesmo dos veículos observados chegarem ao semáforo automatizado.

Seu algoritmo de otimização apresenta ajuste por domínio, isto é, arbitrando-se um intervalo de busca muito restrito com o objetivo de evitar flutuações nas alterações da programação semafórica. Seu intervalo de análise pode ser baseado em ciclos completos ou intervalos de cinco minutos. Por ser proativo, faz uso de ferramenta de simulação para modelar e estimar variações na demanda. De fato, o Scoot é famoso por seu modelo que estima a extensão da fila a ser formada na próxima interseção com base no fluxo de veículos detectados à montante.

Conforme mencionado anteriormente, sua aplicação a múltiplas interseções requer que os semáforos controlados sejam subdividi-

dos em grupos específicos. Junto com o Scats, são os únicos sistemas que possuem algum mecanismo de reconfiguração automática da distribuição das subdivisões. Sua atuação é a mais completa, sendo capaz de alterar a divisão das fases (*split*), o tempo de ciclo (*cycle length*), suas variações (*offset*) e também o sequenciamento das fases.

Assim como a maioria dos ATCS, sua operação é compatível com acionamento em função da detecção de veículos, permitindo alterar a programação semafórica caso não seja detectada ou estimada demanda para determinado movimento. Também pode ser programado para dar prioridade a veículos do transporte público. Moreno *et al.* (2014) apresenta um trabalho interessante de aplicação do sistema Scoot.

Embora este sistema tenha sido desenvolvido para atuar no controle automatizado de malhas urbanas densas, também apresenta resultados positivos em aplicações de menor escala ou em vias arteriais, principalmente em locais sujeitos a constantes flutuações de demanda (Fehon e Peters, 2010).

Opac

Desenvolvido na década de 1990 por esforço de pesquisa em conjunto entre as universidades de Massachusetts e Lowell, nos EUA, este sistema é derivado do programa de incentivo do FHWA. Embora não seja tão recente, não apresenta elevado nível de maturidade, sendo ainda utilizado em aplicações de menor escala, de caráter experimental. Seus sensores de detecção podem ser localizados exatamente na faixa de retenção ou no meio do quarteirão à montante.

Seu tipo de ação é totalmente proativo, contando apenas com a utilização de ferramentas de simulação para modelar o tráfego observado e projetar a demanda para cada interseção, determinando a divisão de fases (*split*), tempo de ciclo (*cycle length*) e variações (*offset*) para minimizar determinada função objetivo, como por exemplo, o tempo de atraso ou quantidade de paradas dos veículos. Seu algoritmo de otimização, assim como no Rhodes, não se baseia na estrutura convencional semafórica e apresenta ajuste por limite de tempo, isto é, restrito pelo tempo máximo alocado para seu processo de busca. Diferente dos demais sistemas, seu intervalo de análise pode ser baseado em fases, além de ciclos completos ou intervalos de cinco minutos.

O Opac não possui mecanismo para a reconfiguração automática da distribuição dos grupos de semáforos controlados, nem é compatível com operação variável em função da presença de veículos, impedindo

que controladores locais possam interferir na programação semafórica. Também pode ser programado para dar prioridade a veículos do transporte público e continua sendo utilizado em aplicações experimentais apoiadas pelo governo norte-americano.

Rhodes

Também foi desenvolvido na década de 1990, nos EUA, porém por parceria entre a Universidade do Arizona e a Siemens ITS. Da mesma forma que o anterior, este sistema é derivado do programa de incentivo do FHWA e não apresenta elevado nível de maturidade, sendo utilizado em aplicações de caráter experimental, isoladamente ou em conjunto com o Opac. Seus sensores de detecção podem ser localizados exatamente na faixa de retenção ou no meio do quarteirão à montante.

Seu tipo de ação é totalmente proativo, contando apenas com a utilização de ferramentas de simulação para projetar a demanda de cada interseção controlada. No entanto, é o sistema com aplicação mais limitada, determinando apenas a divisão de fases (*split*). Conforme mencionado anteriormente, a lógica de seu algoritmo não se baseia na estrutura convencional semafórica, fazendo uso de abstração matemática para identificar valores ótimos. Seu ajuste também é feito por limite de tempo, que define um tempo máximo para seu processo de busca. Sua principal característica é justamente o reduzido intervalo de análise, sendo o único sistema a adotar processamento a cada segundo.

Assim como o Opac, o Rhodes não possui mecanismo de reconfiguração automática da distribuição dos semáforos controlados, nem é compatível com operação variável em função da presença de veículos. Pode ser programado para dar prioridade a veículos do transporte público e também continua sendo utilizado em aplicações experimentais apoiadas pelo governo norte-americano.

ACS-Lite

As aplicações práticas utilizando os sistemas Opac e Rhodes, apoiadas pelo governo norte-americano, permitiram identificar a infraestrutura de detecção e comunicação como umas das principais limitações à implantação dos sistemas adaptativos de controle semafórico. Assim, com o objetivo de disponibilizar uma alternativa mais simples com reduzida necessidade de sensores de detecção (e consequentemente, menor custo), o ACS-Lite foi desenvolvido entre 1990 e 2006, por meio de parceria entre o governo norte-americano (FHWA), a Universidade do Arizona e a Siemens ITS. Configurando-se como o sis-



tema mais recente, contava até 2012 com apenas três aplicações nos EUA, conforme pesquisa realizada por Zhao e Tian (2012).

Seus sensores de detecção podem ser localizados exatamente na faixa de retenção, no meio do quarteirão ou completamente à montante. Seu funcionamento necessita apenas de dois sensores por via monitorada e, diferentemente dos anteriores, não requer um sistema central de computadores, tendo em vista que seu software é instalado diretamente na unidade de processamento localizada em campo, tipicamente na cabine de controle semafórico de cada interseção a ser controlada.

Similar ao Scoot, seu tipo de ação é misto, porém a determinação das variações ao longo do dia (*offset*) é proativa, enquanto as divisões de fase (*split*) são reativas. Assim, sua atuação é moderadamente limitada, uma vez que não é capaz de interferir nos tempos de ciclo, nem no sequenciamento das fases. Seu algoritmo de otimização também apresenta ajuste por domínio, arbitrando um restrito intervalo de busca para minimizar os efeitos negativos de constantes transições. Seu intervalo de análise pode ser baseado em diferentes intervalos de tempo, entre cinco e 10 minutos.

Embora seja parcialmente proativo, não possui recurso próprio para estimar variações na demanda. Sua lógica de otimização se baseia em planos semafóricos previamente determinados, utilizando o monitoramento do fluxo de veículos apenas para identificar, de forma automatizada, a melhor programação existente a ser utilizada.

Não possui mecanismo de reconfiguração automática da subdivisão entre os semáforos controlados, mas é compatível com operação variável em função da detecção de veículos. Diferentemente dos demais, este é o único sistema que não permite ser programado para dar prioridade ao transporte público. Até 2012, existiam apenas quatro aplicações do ACS-Lite, todas de pequeno porte, porém acredita-se que esse número aumente em função de seu reduzido custo de implantação e compatibilidade simplificada com elementos de detecção em circuito fechado (Zhao e Tian, 2012). Também continua sendo apoiado por pacotes de incentivo do governo norte-americano.

BENEFÍCIOS

Diversos estudos e avaliações comparativas realizadas entre a operação de sistemas automatizados e convencionais de controle semafórico identificam desempenho superior dos ATCS. No entanto, é importante notar que os números positivos divulgados pelos fabricantes de



www.antp.org.br

cada sistema podem exercer influência negativa na avaliação qualitativa: como cada caso de aplicação está sujeito a características praticamente únicas, os resultados – embora até mesmo positivos – podem não atender às expectativas geradas.

Assim, a tabela 1 sumariza os resultados identificados por meio da revisão bibliográfica realizada, apresentando as principais medidas de desempenho utilizadas na gestão de tráfego e indicando sua devida fonte.

Tabela 1
Principais medidas de desempenho por sistema e desempenho médio geral

Sistema	Fonte	Tempo de viagem	Atrasos	Quantidade de paradas	Consumo de combustível	Velocidade média
ACS-Lite	Siemens, 2010	-23%	-28%	-27%	-6%	
	Zhao e Tian, 2012	-3%	-18%	-32%		
	Média	-13%	-23%	-29%	-6%	
Opac	Zhao e Tian, 2012	-8%		-28%		
	Rhodes	-2%	-9%			
Scats	Fehon e Peters, 2010	-19%		-50%		
	Samadi et al., 2012	-14%	-14%		-8%	
	Zhao e Tian, 2012	-10%	-8%	-10%		
	Scats, 2014	-22%	-58%	-41%		49%*
	Média	-18%	-21%	-36%	-8%	*
Scoot	Siemens, 2010	-20%	-25%	-20%	-6%	
	Zhao e Tian, 2012	-17%	-15%	-25%		
	Média	-18%	-20%	-22%	-6%	
Desempenho média geral		-15%	-20%	-26%	-7%	*

* Descartado do cálculo da média em função do reduzido número de dados.

Fonte: Adaptado de Fehon e Peters (2010); Samadi et al. (2012); Scats (2014); Siemens (2010); Zhao e Tian (2012).

De forma geral, a implantação de sistemas adaptativos de controle semafórico proporciona resultados positivos que afetam a qualidade de circulação dos usuários, aumentando indiretamente a segurança para veículos, pedestres e ciclistas, além de reduzir o impacto ambiental. Tais benefícios são: 1) redução dos tempos de atraso; 2) redução do tempo e quantidade de paradas; 3) decorrente redução da

formação de filas e aumento da velocidade média; 4) menor consumo de combustível; e 5) reduzida emissão de poluentes.

Além destes, pesquisas de satisfação realizadas junto às agências de trânsito apontam como vantagens dos sistemas adaptativos a possibilidade de priorizar veículos do transporte público e unidades de emergência, menor custo e tempo alocado para manutenção, além de maior regularidade da operação. Estas vantagens aprimoram tanto a capacidade de resposta a incidentes de trânsito como as condições de circulação perante eventos de grande porte e intervenções planejadas.

Custos estimados

Segundo Stevanovic (2010), o custo médio de instalação de um ATCS é de U\$ 65 mil dólares por interseção, compreendendo os custos de aquisição, instalação, calibração dos equipamentos e treinamento de pessoal. Vale notar que, embora algumas instalações sejam mais caras – em função do sistema adotado, quantidade de semáforos a serem controlados e infraestrutura existente –, a maior frequência dos custos de instalação está na faixa de U\$ 40 mil dólares por interseção.

Já outros trabalhos identificam os custos médios para cada sistema. A tabela 2 sumariza os custos de aquisição, instalação e treinamento de pessoal, para cada sistema, indicando ainda as fontes consultadas.

Tabela 2
Custo médio estimado por interseção para cada sistema

Fonte	Custo médio por interseção				
	ACS-Lite	Opac	Rhodes	Scats	Scoot
Selinger e Schmidt, 2009	\$ 33.700	\$ 68.067	\$ 40.000	\$ 58.863	\$ 49.429
FHWA, 2011	\$ 10.000	\$ 35.000	\$ 40.000	\$ 27.500	\$ 45.000
Zhao e Tian, 2012	\$ 8.000	\$ 35.000	–	\$ 25.000	\$ 45.000
Basic, Jesus e Rahman, 2012	\$ 10.000	–	–	\$ 27.500	–
Média corrigida*	\$ 12.814	\$ 49.171	\$ 40.000	\$ 45.064	\$ 47.818
Custo médio geral	\$ 40.716				

* Corrigida pela frequência de valores levantados.

Fonte: Adaptado de Basic et al. (2012); FHWA (2011); Selinger e Schmidt (2009); Zhao e Tian (2012).

Vale notar que, com base em estudos mais recentes, o custo médio de instalação de um ATCS é de cerca de U\$ 40 mil dólares,

inferior ao valor identificado por Stevanovic (2010). Pode-se inferir, então, que ao longo do tempo novas tecnologias são desenvolvidas, enquanto outras se consolidam e apresentam ganhos de escala, barateando seus custos. Dessa forma, acredita-se que a ampliação do uso de sistemas adaptativos de controle semafórico promova a formação de um ciclo virtuoso, no qual a existência de mais casos de aplicação disponibilizaria mais resultados e reduziria custos que, por sua vez, incentivariam a adoção de ATCS em novos casos.

Dificuldades e limitações

Uma significativa dificuldade referente à implantação de ATCS é a necessidade de uma boa infraestrutura, requerendo a instalação de diversos sensores e sua devida conexão com a rede de comunicação. De acordo com a pesquisa realizada por Stevanovic (2010), os ATCS demoram, em média, 18 meses desde o início da preparação da infraestrutura até serem colocados de fato em operação. O tempo necessário para o sistema ser colocado em operação está diretamente relacionado com a infraestrutura existente, sendo significativamente reduzido em locais que já possuem equipamentos de detecção ou ampliado em locais adensados e já desenvolvidos.

No entanto, uma vez que a infraestrutura tenha sido corretamente preparada e o sistema esteja operando, sua necessidade de manutenção é reduzida: os sensores permitem identificar, de forma automática, o tipo de problema e quais equipamentos apresentam falha. Assim, essa dificuldade pode ser interpretada como uma vantagem, tendo em vista que minimiza o tempo em que os semáforos permanecem em falha.

A menor necessidade de manutenção e elevada disponibilidade de dados sobre o fluxo de veículos, resultado da infraestrutura de detecção, se configura como uma realidade distinta dos sistemas tradicionais de controle semafórico. Essa nova realidade exerce impacto direto nos recursos humanos da gestão do trânsito: requer menos técnicos, em função da reduzida manutenção, porém mais especializados, pois os componentes de detecção e comunicação são mais sofisticados (tecnologias como Bluetooth, Wifi, RFID etc.); ao mesmo tempo em que necessita de mais engenheiros para realizar análises e tomadas de decisão com base na maior quantidade de dados coletados.

Ainda de acordo com a ampla consulta realizada por Stevanovic (2010), tal mudança no quadro operacional se configura como um



www.antp.org.br

importante item a ser observado por agências que desejam implantar um sistema de controle adaptativo, tendo em vista que a mudança no perfil dos recursos humanos pode comprometer o correto funcionamento do ACTS, além de limitar seus resultados.

Conforme apontado anteriormente, observa-se uma significativa quantidade de casos que implantaram ACTS em caráter experimental, facilitado pelo pacote de incentivo do governo dos EUA. No entanto, justamente estes casos apresentaram elevada taxa de insatisfação, tanto da sociedade como das agências de gestão de trânsito, levando à sua interrupção (Stevanovic, 2010). Assim, é importante aprender com a lição norte-americana: embora seja interessante que o governo federal atue de forma direta na promoção de políticas públicas, no caso, facilitando a implantação dos sistemas adaptativos de controle semafórico, é preciso que haja algum dispositivo que previna decisões meramente políticas, sem apoio técnico. Isto é, casos em que a implantação de um ATCS seja baseada meramente na disponibilidade de recursos ou com o objetivo de melhorar a imagem do gestor perante seus eleitores.

Por último, é importante notar que os benefícios proporcionados pelos sistemas adaptativos não são tão pronunciáveis em regiões que apresentam tráfego supersaturado (Stevanovic, 2010). Embora os usuários de ATCS nestas condições tenham relatado que o sistema contribui para retardar o início da formação dos congestionamentos e reduzir sua duração, não existem evidências nem estudos suficientes que comprovem o desempenho positivo em casos supersaturados. Assim, é importante destacar o papel complementar do sistema adaptativo para mitigar os congestionamentos, não devendo ser confundido como uma solução mágica para, sozinho, acabar com os congestionamentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a revisão bibliográfica realizada é possível identificar que o sistema adaptativo de controle semafórico se configura como uma importante ferramenta tecnológica de gestão do tráfego, capaz de maximizar a eficiência da capacidade viária instalada. Seus resultados são percebidos em curto prazo de tempo. Os benefícios contribuem para uma mobilidade mais sustentável, não só aprimorando o nível de serviço da circulação de pessoas e mercadorias, mas também reduzindo a emissão de poluentes e aumentando a segurança para veículos, pedestres e ciclistas.

Sua capacidade de priorizar veículos do transporte público e seu potencial de aprimorar a capacidade de resposta a incidentes são



www.antp.org.br

características ainda pouco exploradas, mas que podem contribuir significativamente para o melhor planejamento do sistema de transportes como um todo, melhorando a qualidade de vida em cidades grandes e densas. No entanto, não se pode perder de vista seu caráter complementar para mitigar os congestionamentos, devendo ser aplicado em conjunto com outras medidas, como estratégias de gerenciamento da demanda de viagens (GDV) e políticas públicas para reduzir a dependência do uso do automóvel.

Por outro lado, uma das maiores resistências à implantação de ATCS é o elevado custo resultante da preparação da infraestrutura de detecção e comunicação. Porém, o avanço de técnicas de processamento de *big data* e a popularização do conceito de cidades inteligentes acredita-se que venham a motivar uma quebra de paradigma ampliando a tendência de instalação de sensores pela cidade (como já se pode ver em Santander, na Espanha, Londres ou Cingapura). Tais sensores permitem monitorar não só o volume e velocidade de veículos, mas também a concentração de componentes químicos no ar e, até mesmo, o nível de lixeiras, contribuindo para a melhor gestão urbana.

Assim, destaca-se o potencial de utilização dos sistemas adaptativos nas cidades brasileiras, principalmente no Rio de Janeiro e São Paulo que já possuem central integrada de operação – que conta com ampla infraestrutura de monitoramento e comunicação instalada pela cidade – para apoiar a tomada de decisão.

No entanto, identificou-se a ausência de estudos comportamentais na avaliação de sistemas semaforizados, particularmente em relação a avanços de sinal fechado. Assim, configura-se como oportunidade de pesquisa futura a utilização de modelos comportamentais para avaliar a hipótese de que o motorista apresenta maior tendência de respeitar o sinal de trânsito e o limite de velocidade se for recompensando por isso, isto é, usufruindo dos benefícios proporcionados, por exemplo, pela sincronização semafórica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULHAI, B.; PRINGLE, R.; KARAKOULAS, G. J. Reinforcement learning for true adaptive traffic signal control. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 129, n. 3, 2003, p. 278-285.
- BASIC, E.; JESUS, Y. de; RAHMAN, A. *Adaptive signal control technology: current practice and comparison*. Intelligent Transportation Society of Connecticut (ITS- CT). 2012.
- BENHAMZA, K. & SERIDI, H. Adaptive traffic signal control in multiple intersections network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 28, n. 6, 2015, p. 2557-2567.
- BRASIL. Lei nº 12.587 de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana. 2012.

- BRASIL. PlanMob: Caderno de referência para a elaboração de Plano de Mobilidade Urbana. 2015.
- DION, F. *et al.* Evaluation of potential transit signal priority benefits along a fixed-time signalized arterial. Junho 2004, p. 294-304.
- DJAHEL, S. *et al.* Reducing emergency services response time in smart cities: an advanced adaptive and fuzzy approach. In: IEEE FIRST INTERNATIONAL SMART CITIES CONFERENCE. *Annals*. 2015.
- FEHON, K. & PETERS, J. *Adaptive traffic signals, comparison and case studies*. 2010.
- FHWA. Managing our congested streets and highways. Washington, D. C. 2001.
- _____. Adaptive signal control technology overview. 2011.
- FIRJAN. O custo dos deslocamentos nas principais áreas urbanas do Brasil. 2015.
- GAYAH, V. V.; GAO, X.; NAGLE, A. S. On the impacts of locally adaptive signal control on urban network stability and the macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 70, 2014, p. 255-268.
- Globo. Tempo de deslocamentos nas regiões metropolitanas. Infográfico disponível em: <<http://infograficos.oglobo.globo.com/economia/tempo-de-deslocamento-nas-regioes-metropolitanas.html>>.
- GÜNDOĞAN, F. *et al.* An evaluation of adaptive traffic control system in Istanbul, Turkey. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, vol. 2, n. 3, 2014, p. 198-201.
- HEALTH EFFECTS INSTITUTE. Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects. *HEI*, jan. 2010.
- JACOB, C. & ABDULHAI, B. Machine learning for multi-jurisdictional optimal traffic corridor control. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, vol. 44, n. 2, 2010, p. 53-64.
- MCADAM, K.; STEER, P.; PERROTTA, K. Using continuous sampling to examine the distribution of traffic related air pollution in proximity to a major road. *Atmospheric Environment*, vol. 45, n. 12, abr. 2011.
- MORENO, L. D.; MAMEDE, B. B.; PINA FILHO, A. C. de. Automação de semáforos para uma melhor dinâmica urbana. *Revista dos Transportes Públicos*, v. 138, ANTP, 2014, p. 11-25.
- PEREIRA, R. H. M. & SCHWANEN, T. Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992-2009): Diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo. *Publicação Ipea*, 2013.
- SAMADI, S. *et al.* Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems?: A case study. jul. 2012, p. 248-259.
- SCATS. Adaptive traffic control system: Scats proven results. 2014.
- SELINGER, M. & SCHMIDT, L. *Adaptive traffic control systems in the United States*. Set. 2009.
- SIEMENS. Features and benefits of Siemens Scoot and ACS Lite adaptive signal coordination software. 2010.
- SINGH, R. *et al.* Safety at traffic signals for cyclists and pedestrians. In: IPENZ TRANSPORTATION GROUP CONFERENCE. *Annals*. 2011, p. 1-14.
- SMITH, H. R.; HEMILY, B.; INC, M. I. G. F. Transit signal priority: a planning and implementation handbook. *Transportation Research*, vol. 4, mai. 2009, p. 212.

- STEVANOVIC, A. *Adaptive traffic control systems: domestic and foreign state of practice*. 2001.
- TTI. Synthesis study of Texas signal control systems. 2012.
- USDOT. Temporary losses of highway capacity and impacts on performance: phase 2. 2004.
- _____. National strategy to reduce congestion on America's transportation network. 2006.
- ZHAO, Y. & TIAN, Z. An overview of the usage of adaptive signal control system in the United States of America. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 178-181, 2012, p. 2591-2598.



www.antp.org.br