

Modelos Matemáticos para Otimização do Tráfego Urbano Semaforizado

Marcelo Lacortt,

Rosana Maria Luvezute Kripka

Universidade de Passo Fundo - Instituto de Ciências Exatas e Geociências

99001-970, Passo Fundo, RS

E-mail: lacortt@upf.br, rkripka@upf.br

Moacir Kripka

Universidade de Passo Fundo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia

99001-970, Passo Fundo, RS

E-mail: mkripka@upf.br

Resumo: *Apresentam-se dois modelos matemáticos de otimização os quais, considerando os dados do trânsito da região que se pretende otimizar, possibilitam fornecer tempos de verde que visam minimizar o tempo de percurso veicular. Também são apresentados os resultados computacionais obtidos com a investigação desses modelos em um estudo realizado na região central da cidade de Passo Fundo, RS. Os resultados obtidos com os modelos apontam para uma melhora significativa no fluxo veicular, dando respaldo a um possível emprego destes em situação real.*

1. INTRODUÇÃO

O transporte veicular é um artifício indispensável para a mobilidade humana, do qual a maioria da população mundial usufrui para se deslocar de forma rápida e segura. Segundo pesquisa divulgada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2011), a rapidez na locomoção é a característica mais importante para classificar um bom meio de transporte. No entanto, conforme a mesma fonte, a média brasileira de pessoas que enfrentam congestionamento mais de uma vez por dia no Brasil é de 20,5%, chegando na região Sudeste a 21,6% e na região Sul a 21,9%. As crescentes facilidades em adquirir um meio de transporte próprio, o desenvolvimento econômico, a má qualidade do transporte público e o aumento populacional constituem-se em fatores decisórios para o acúmulo de veículos nos centros urbanos.

Em razão do aumento contínuo da frota veicular, os sistemas de trânsito atuais da maioria das cidades acabam não comportando o grande número de veículos existente. Por consequência, surgem os inevitáveis congestionamentos e, com esses, vários problemas à sociedade, como alto nível de estresse, poluição, acidentes e prejuízos econômicos, sendo estes últimos decorrentes do alto consumo de combustível e desperdício de tempo.

Desse modo, o problema referente ao trânsito é uma das principais preocupações de governantes, dos profissionais da área de planejamento urbano e da população, de forma geral, tendo em vista que todos que usufruem de alguma maneira do sistema viário urbano passam a ser afetados por tal situação.

Atualmente, existem vários dispositivos eletrônicos desenvolvidos com a finalidade de organizar o trânsito para que este flua de forma rápida e segura, dentre os quais se destaca o semáforo, cujo desempenho está diretamente relacionado à sua programação. Visando minimizar os problemas de tráfego nas cidades de médio e grande porte, diversos softwares e algoritmos têm sido desenvolvidos, tais como o sistema Siri (VILANOVA, 2004), Atefi (PIAI e CERVANTES, 2009), Scoot e Transyt (ROBERTSON, 1986), sendo este último o mais citado na literatura. No entanto, esses *softwares* são de alto custo para aquisição e necessitam de treinamento para sua utilização. Dessa forma, diante da falta de recursos e de mão de obra especializada por parte da maioria das prefeituras brasileiras, os problemas referentes ao trânsito das cidades brasileiras não têm sido comumente estudados com o emprego dos sistemas citados.

Neste sentido, o presente trabalho teve com objetivo investigar e aplicar modelagens matemáticas de otimização para programação de semáforos que, automatizadas, forneçam tempos de verde que reduzam de forma considerável o tempo de percurso veicular, especialmente nas regiões centrais de cidades de médio e grande porte, cujo trânsito é intenso e controlado por semáforos.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO

A engenharia de tráfego consiste no ramo da ciência destinado ao estudo de conceitos pertinentes a elementos dos sistemas de tráfego em geral, contribuindo decisivamente para os planejamentos e tomadas de decisões relacionadas ao trânsito. É a área do conhecimento que tem como objetos de estudo o planejamento, projeto geométrico e operação de tráfego em vias, suas redes, terminais, lotes lindeiros e relações com outros modos de transporte. Tem como objetivo assegurar o movimento seguro, eficiente e conveniente de pessoas e bens. Neste ramo da engenharia, diversos conceitos são estudados e definidos, dos quais destacam-se (BRASIL, 1984):

- Aproximações: são os trechos de via que convergem para a interseção, ou seja, as regiões onde os veículos esperam pela concessão de passagem.

- Fase: é a aplicação completa de uma sequência de indicação de cores de um semáforo. O número de fases de uma interseção em geral é igual a três e depende, basicamente, do número de aproximações, dos volumes de conversão e dos conflitos entre os movimentos.

- Estágio ou intervalo: é o período de tempo dentro do ciclo dado a cada uma das cores da sequência.

- Ciclo: é o tempo total, em segundos, para a completa sequência de sinalização de uma interseção.

Para a regulação de semáforos, é necessário ter conhecimento das principais características do trânsito pertencentes às vias, as quais os semáforos estão instalados, assim como, conceitos, técnicas e expressões que quantificam tais características. A capacidade de uma aproximação sinalizada é definida como sendo o número máximo de veículos capazes de atravessar uma interseção num dado período de tempo. É determinada pelo fluxo de saturação e pelo tempo de verde do semáforo, sendo que, quando maior o tempo de verde, maior a quantidade de veículos liberados. O fluxo de saturação de uma interseção consiste no fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação e a ela fossem dados 100% de tempo de verde do cruzamento (escoamento ininterrupto), expresso em unidade de veículos por hora de tempo de verde (veículos/htv).

Também deve ser considerado o fato de que o tempo de verde de uma dada fase não é totalmente aproveitado. No início do tempo de verde há uma perda ou atraso inicial, em razão do tempo que o motorista leva para atingir a velocidade normal de operação. Nesta etapa a taxa de escoamento de veículos é baixa.

À medida que o tempo passa, essa taxa vai aumentando e, após alguns segundos, atinge um valor máximo, razoavelmente constante, que é o fluxo de saturação. Após isso, durante o término do fluxo de verde e início do amarelo, o fluxo ainda continua máximo por alguns segundos e, então, começa a decair, até atingir o valor zero.

Assim, Brasil (1984) define o tempo de verde efetivo como o período do tempo de verde no qual ocorre o fluxo máximo de veículos (fluxo de saturação). Esse é o tempo realmente aproveitado pela fase à qual foi alocado o tempo de verde na aproximação. Define ainda o tempo perdido ou tempo morto como o tempo que se perde em virtude das reações dos motoristas no início e no fim do tempo de verde de uma dada fase e durante o qual não há fluxo.

Para o cálculo dos parâmetros de trânsito descritos acima e de outros parâmetros de desempenho necessários para a regulação de semáforos isolados, foram utilizadas as informações e expressões constantes no *Manual de Semáforos* do Departamento Nacional de Trânsito.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram investigados e aplicados dois modelos matemáticos de otimização. Com estes modelos matemáticos objetivou-se otimizar, através das variáveis tempos de verde, o tempo de percurso veicular em vias com trânsito semaforizado.

No Modelo 1 foram consideradas as expressões de atraso uniforme e atraso aleatório de Webster, bem como a expressão para determinação do número de paradas sofrida por um veículo, exposta por Chile (2001), sendo que no modelo em questão, o tempo de verde considerado não é o efetivo e sim o tempo de verde de operação do semáforo (verde normal). Diante destas expressões, obteve-se uma função objetivo que representa o Índice de Desempenho de um veículo que trafegue em uma via semaforizada (ID). Com a obtenção dos tempos de verde para cada cruzamento da rede otimizada, as demais temporizações podem ser obtidas facilmente. Os tempos de ciclo, vermelho total e tempos de amarelo são definidos anteriormente à otimização e os demais tempos são obtidos por meio do diagrama de tempos.

De forma resumida, pode-se dizer que, no Modelo 1 de otimização proposto, busca-se calcular o tempo de verde ótimo da aproximação i (g_i) que possibilite minimizar o atraso e o número de paradas sofridas por um veículo em uma rede semaforizada.

Assim, de forma genérica, o Modelo 1 de otimização pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } ID = \sum_{i=1}^{n_c} (AU_i + AL_i + KP_i)$$

$$\text{Sujeito a } Tp \leq g_i \leq C, \quad i = 1, \dots, n$$

onde:

ID : Índice de desempenho de uma rede semaforizada.

n_c : Número de cruzamentos.

AU_i : Atraso médio uniforme do link i .

AL_i : Atraso médio aleatório do link i .

K : Fator de penalidade de parada.

P_i : Número de paradas sofridas por um veículo no link i .

Tp : Tempo perdido.

Assim como o Modelo 1, o Modelo 2 foi composto por uma expressão que indica o desempenho de uma via semaforizada, onde a composição da função objetivo tem como base a fórmula do tempo de deslocamento de Gobbo (2005, p. 13). A fórmula proposta diferencia-se por representar o tempo de deslocamento de um veículo, ao passo que a fórmula descrita por Gobbo representa o tempo de todo o fluxo veicular presente na via.

A função que compõe este modelo tem como objetivo quantificar o tempo total de deslocamento de um veículo em uma rede, composta por uma série de cruzamentos.

Resumidamente, o Modelo 2 pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } To = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{Vp} + A_v \right)$$

$$\text{Sujeito a } Tp \leq g_i \leq C, \quad i = 1, \dots, n$$

onde:

To : Tempo total de deslocamento de um veículo em uma rede semaforizada;

n : Número de cruzamentos;

d : Distância da via;

Vp : Velocidade esperada de deslocamento do fluxo na aproximação;

Os modelos foram implementados em linguagem Fortran, tendo como base um programa desenvolvido por Kripka (2004) para a otimização com o emprego da meta-heurística *Simulated Annealing*. Para a execução dos programas são necessários os seguintes dados de entrada:

- Modelo 1: fluxo de saturação e fluxo veicular de cada link em cada cruzamento, tempo perdido e tamanho de ciclo.
- Modelo 2: além dos dados citados, são necessários o fornecimento do comprimento de cada *link* e a velocidade esperada na via.

Uma vez definida uma rede, a função objetivo é minimizada para o somatório das n interseções dessa rede, tendo como variáveis os tempos de verde para programação dos semáforos. Um único tempo de verde de cada interseção é considerado como variável independente, visto que o tempo total do ciclo em cada cruzamento é predefinido. Em cada solução possível, os tempos de verde podem assumir apenas valores inteiros (múltiplos de segundo), o que caracteriza o problema como de otimização combinatória.

Os limites inferiores e superiores, que podem ser assumidos pelas variáveis de projeto, são determinados a partir dos valores de tamanho de ciclo e de tempo perdido fornecidos pelo usuário.

4. ESTUDO DE CASO: REGIÃO CENTRAL DA CIDADE DE PASSO FUNDO

Para validação dos modelos, diversas análises foram efetuadas. No presente item são apresentados alguns resultados obtidos. O estudo mais abrangente efetuado é descrito em Lacortt (2011). Na sequência é apresentado um estudo em uma região central da cidade de Passo Fundo, RS, onde, foram coletados dados reais referentes a esta região e, após, foram realizadas comparações entre os resultados das otimizações obtidos pelos modelos propostos e os dados reais praticados na região considerada. Além destas análises, também são apresentadas os resultados obtidos de um estudo para verificar as influências que variações nos tempos de ciclo, proporcionam aos índices desempenho: atraso uniforme e grau de saturação.

A cidade de Passo Fundo possui área aproximada de 758,27 km², população aproximada de 184.869 habitantes (censo 2010-IBGE) e frota veicular, incluindo motocicletas, de 77.370 (IBGE 2010). Tais características fazem de Passo Fundo uma cidade com alto fluxo veicular, onde nos últimos anos tornou-se rotineira a ocorrência de engarrafamentos, formações de filas e demais problemas consequentes dessa situação.

Para a definição da rede selecionada para a otimização foi considerado o alto fluxo de veículos na região, sendo esta rede composta por cruzamentos semaforizados, definida pelos seguintes cruzamentos e vias: cruzamento da av. Sete de Setembro com a av. Brasil, cruzamento da rua Cel. Chicuta com a av. Brasil, cruzamento da av. Bento Gonçalves com a av. Brasil e cruzamento da rua Fagundes dos Reis com a avenida Brasil.

Para melhor caracterização desta área pode ser observado o mapa apresentado na Figura 1.

Após a escolha da rede, a próxima etapa foi a obtenção dos dados de trânsito referentes à região escolhida, os quais serviram como parâmetros de entrada para resolução computacional do modelo, bem como os valores necessários para se determinarem as medidas de desempenho da rede.

Os comprimentos das vias pertencentes aos cruzamentos foram obtidos por meio de recursos do GOOGLE MAPS (2010).

g é o tempo de verde; C é o tempo de ciclo; av é a Avenida Brasil e $tran$, as demais vias transversais.

Tabela 1: Tempos semafórico, em segundos, atuais e otimizados.

Cruzamento		T_p	g_{av}	Ver_{av}	g_{tran}	Ver_{tran}	C
ATUAIS	1	19	40	28	25	43	84
	2	19	40	28	25	43	84
	3	19	40	28	25	43	84
	4	19	40	28	25	43	84
OTIMIZADOS	1	19	44	24	21	48	84
	2	19	37	31	28	41	84
	3	19	46	22	19	50	84
	4	19	45	23	20	49	84

Visando comparar se ocorreriam melhoras com a implementação dos tempos sugeridos pelos modelos em relação aos tempos atuais, também foi realizada uma análise dos indicativos de desempenho da região após a otimização, caso esses tempos fossem implementados. Os indicativos de desempenho definidos para esta análise foram o grau de saturação, o atraso uniforme e o número de veículos retidos após o tempo de verde.

O indicativo de desempenho grau de saturação antes e após a otimização estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Graus de saturação (X), com tempos semafóricos atuais e otimizados.

Cruzamentos	1		2		3		4	
Aproximações	Av. Brasil	Sete de Setembro	Av. Brasil	Cor. Chicuta	Av. Brasil	Bento Gonçalves	Av. Brasil	Fagundes dos Reis
ATUAIS	1,11	0,85	0,95	1,15	1,23	0,76	1,32	0,78
OTIMIZADOS	1,01	1,01	1,03	1,02	1,07	1,01	1,17	0,98

Diante dos resultados, observa-se que ocorreriam melhoras no grau de saturação nas vias, principalmente nos superiores a 1, tendo em vista que o ideal é o grau de saturação ser inferior a 1. Porém, para o tamanho de ciclo e de tempo perdido atuais, isso não foi possível.

Outra vantagem que pode ser observada nos valores do grau de saturação correspondentes à solução otimizada é que tendem a ficar equilibrados entre as fases de cada cruzamento, proporcionando, assim, igualdade de condições de trafegabilidade em ambos os sentidos.

Na busca de verificar as influências que as mudanças dos tempos de ciclo proporcionam nas temporizações semafóricas e nos índices de desempenho atraso uniforme e grau de saturação, a rede do exemplo do Estudo Teórico 2 foi otimizada pelo Modelo 1, com os tempos de ciclo em um intervalo de 84 a 114s, variando de 10 em 10s. Observou-se que o aumento do ciclo proporciona uma redução no grau de saturação, indicando, dessa forma, melhoras para este indicativo. Em contraposição, o aumento do tempo de ciclo acarreta um maior tempo de espera durante o tempo de vermelho, influenciando diretamente no aumento do atraso uniforme. Assim, na escolha pelo melhor tempo de ciclo neste caso, teria de ser levado em conta o que proporciona melhor qualidade de trafegabilidade ao usuário da via: o esvaziamento total da via (caixa) ao término do sinal verde (grau de saturação) ou a redução do tempo de espera no sinal vermelho (atraso uniforme).

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos com o estudo, se observa que os tempos otimizados pelos dois modelos foram os mesmos, sendo que estes, em comparação com os tempos atuais apresentaram melhoras significativas nos índices de desempenho das vias, reduzindo o número de veículos retidos após o término do tempo verde, o grau de saturação e o atraso uniforme.

Os resultados sugerem que a adoção da metodologia proposta no presente trabalho, em cidades de médio e grande porte, proporcionando melhoras no desempenho das vias e, no caso específico da região central da cidade de Passo Fundo, pode acarretar em uma melhora significativa nos índices de desempenho das vias estudadas, consistindo unicamente num melhor aproveitamento dos recursos já existentes e implantados.

Cabe enfatizar que o sucesso na aplicação dos modelos está diretamente relacionada à sincronização dos semáforos componentes da rede, a qual, neste estudo, não foi implementada.

Referências

- [1] Brasil, Departamento nacional de trânsito. *Manual de semáforos*. 2. Ed. Brasília: denatran, 1984.
- [2] Chile. *Manual de señalización de tránsito*. Santiago, 2001, capítulo iv. Disponível em: <<http://www.subtrans.cl/subtrans/documentos/senalizacion.html>>. Acesso em: 1 out. 2010.
- [3] Google maps. *Mapa da cidade de passo fundo*. Acesso em: 20 out. 2010.
- [4] IBGE - instituto brasileiro de geografia e estatística. Pesquisa ibge cidades@ – passo fundo, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=431410>> acesso em: 20 out. 2010.
- [5] Ipea. *Rapidez e custo influenciam na escolha do transporte*. Instituto de pesquisas econômicas aplicadas – 2011. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=8236>. Acesso em: 6 maio 2011.
- [6] M. Lacortt, “Modelagem matemática para otimização do tráfego urbano semaforizado”, Dissertação (Mestrado), Universidade de Passo Fundo, 2011.
- [7] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.
- [8] M. Kripka, Discrete optimization of trusses by simulated annealing. *Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering*, rio de janeiro, v. 26, n. 2, p. 01, 2004.
- [9] J.C. Piai, S.G. de Cervantes, Um modelo para tráfego urbano e suas otimizações. In: Congresso Brasileiro de Automática, XVIII. 12 a 16 set 2010, Bonito-MS. Anais...
- [10] D.I. Robertson, Research on Transyt and Scoot methods of signal coordination (CD ROM) ITE Digital Library: 1997 edition. *ITE Journal*, p. 36-40. Jan 1986.
- [11] L. Vilanova, SIRI - Um novo simulador para redes de semáforos, 2005. Disponível em: http://meusite.mackenzie.com.br/professor_cucci/texto29.pdf>. Acesso em: 10 mar 2011.