

SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

## Implantação de um modelo de simulação e alocação do tráfego em Porto Alegre

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

*E-mail: helenabc@ufrgs.br*

**Luis Antonio Lindau**

*E-mail: lindau@ufrgs.br*

**Davi Ribeiro Campos de Araujo**

*E-mail: davi@ppgep.ufrgs.br*

*LASTRAN - Laboratório de Sistemas de Transportes  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre, RS*

O baixo desempenho do tráfego nas concentrações urbanas de médio e grande porte evidencia a necessidade de investimentos no gerenciamento da circulação viária. Nas horas do dia de maior demanda, é notável o esgotamento da oferta viária onde são cada vez mais frequentes as filas, atrasos nas interseções, e baixas velocidades.

No Brasil, é tradição conduzir o planejamento do tráfego e a análise do impacto de pólos geradores de tráfego de forma limitada, com base no bom senso, na prática da tentativa e erro ou ainda com a utilização de métodos analíticos de abrangência restrita. Quanto maior a extensão da malha viária e a quantidade de veículos afetados por uma medida, mais complexas e maiores se tornam as exigências requeridas pela análise.

A eficiência do planejamento e do gerenciamento do tráfego reside no uso de ferramentas computacionais que possibilitem simular, de forma adequada e consistente, a viabilidade de medidas que provoquem impacto sobre o tráfego. Dessa forma, é possível aperfeiçoar soluções preservando a sociedade de custos indesejáveis decorrentes da implantação de medidas não testadas.

Os modelos de alocação e simulação de tráfego constituem ferramentas adequadas pois permitem estimar, em ambiente computacional, o provável comportamento do tráfego associado a alterações na rede viária ou na demanda por viagens. Assim, a abrangência da análise dos impactos de uma medida não fica mais restrita às vias próximas, mas passa a compreender a rede viária como um todo.

Com o objetivo de qualificar as atividades de gerenciamento e planejamento do tráfego em Porto Alegre, o Laboratório de Sistemas de Transportes da UFRGS, em convênio com a Empresa Pública de Transporte e Circulação, instituiu o Projeto SIMTRAF - Simulação de Tráfego em Porto Alegre. O Projeto, que contou com a participação da Universidade de Leeds, Inglaterra, contemplou a implantação do modelo SATURN (Van Vliet e Hall, 1998) na área urbana do Município. Esse artigo descreve as etapas desenvolvidas e apresenta um dos estudos de caso produzidos no âmbito do projeto.

## **MODELAGEM DE TRÁFEGO EM REDES**

Modelos de alocação de tráfego são amplamente utilizados em planejamento e gerenciamento de transportes para estimar o impacto no tráfego decorrente de modificações na rede viária ou na demanda. Objetivam reproduzir o processo de escolha de rotas dos indivíduos. Como dados de entrada, exigem informações sobre a demanda e sobre as características topológicas e operacionais da rede viária. As informações sobre viagens relativas ao período que se pretende modelar são normalmente dispostas em uma matriz origem-destino que quantifica os volumes de viagens entre as diversas zonas de tráfego.

Respeitadas as restrições de circulação e a capacidade viária, o modelo estima as rotas utilizadas nas viagens baseando-se no princípio que os usuários procuram rotas mais rápidas, mais curtas ou de menor custo generalizado entre cada par origem-destino. O custo generalizado representa o somatório dos recursos consumidos, percebido pelos indivíduos, ao se deslocarem por um segmento viário ou rota.

Os modelos tradicionais de alocação de tráfego costumam definir os atrasos na rede através de relações de velocidade-fluxo nos arcos, como função apenas do atrito lateral entre os veículos circulando ao longo do arco. Têm aplicabilidade limitada, e são mais adequados para estudos em redes viárias interurbanas ou em projetos com largo horizonte. Na representação do tráfego urbano, onde as interseções viárias são responsáveis por grande parte dos atrasos, são necessários recursos de modelagem que representem o comportamento das interseções viárias de forma mais detalhada.

## **O MODELO SATURN**

A partir do final da década de 70, iniciou-se o desenvolvimento de modelos de alocação de tráfego voltados para a representação de redes urbanas. Nos anos 80, a modelagem de redes para a avaliação de modificações nos sistemas viários urbanos tornou-se prática corrente em muitos países.

O modelo de alocação e simulação de tráfego SATURN - *Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks* (Van Vliet e Hall, 1998) foi originalmente concebido, nos meados da década de 70, para ser utilizado como ferramenta de avaliação de esquemas de gerenciamento de tráfego em redes locais. Os aperfeiçoamentos teóricos incorporados desde então permitem que o modelo seja hoje utilizado em várias outras aplicações. SATURN é formado por um modelo de alocação de tráfego associado a um módulo de simulação de interseções.

O modelo de simulação estima os atrasos nas interseções considerando a negociação de brechas, a programação semaforica - no caso das interseções semaforizadas, e a formação de filas. O modelo de simulação no SATURN incorpora os mesmos princípios de dispersão de pelotões do modelo TRANSYT (Vincent *et al.*, 1980).

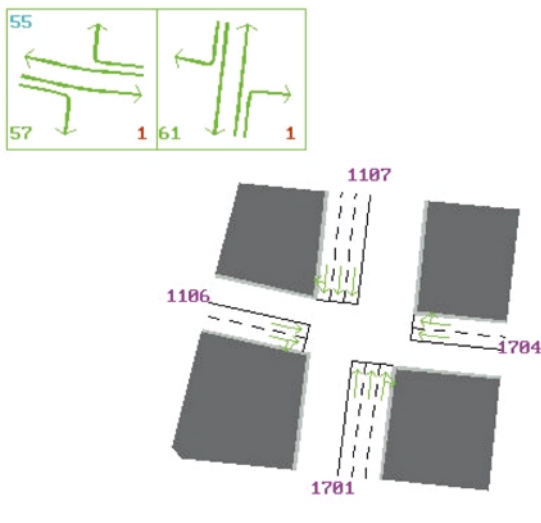
SATURN foi concebido para modelar o desempenho de veículos privados na rede, embora também possibilite a representação do transporte público. Exemplos de aplicações incluem: análise do efeito da implantação de viadutos, vias de mão única, alargamento de vias, introdução de faixas exclusivas para ônibus, alterações no controle semaforico e a avaliação das repercussões da implantação de pólos geradores de tráfego na circulação viária. O modelo tem centenas de usuários no mundo com aplicações nos 5 continentes. A literatura reporta experiências como, entre outras: Manchester (Matzoros *et al.*, 1987), Bangkok (May *et al.*, 1992) e Kuwait (McSheen e Hale, 1989).

SATURN faculta duas formas distintas de modelagem de rede: rede *buffer* e rede de simulação. Redes tipo *buffer* estimam os tempos de deslocamento nos arcos através de relações velocidade-fluxo. São mais adequadas para estudos estratégicos ou análises de redes rurais e interurbanas. Na rede simulação, a modelagem concentra-se no desempenho das interseções. Essa última, adotada no projeto SIM-TRAF, é a mais apropriada para reproduzir o tráfego urbano, onde as interseções semaforizadas e não-semaforizadas compõem os elementos determinantes do desempenho da rede.

### Dados exigidos pelo SATURN

Para a modelagem da rede simulação, os dados exigidos pelo modelo são: comprimento e sentido de circulação de cada arco, velocidade média de percurso efetivo no arco, número de faixas de cada aproximação da interseção, conversões facultadas e proibidas em cada faixa, fluxos de saturação das conversões permitidas, programação semaforica, e natureza dos conflitos entre correntes de tráfego concorrentes. A figura 1 ilustra uma interseção codificada através do SATURN.

**Figura 1**  
**Representação de interseção semaforizada no SATURN**



### **Elementos de análise fornecidos pelo SATURN**

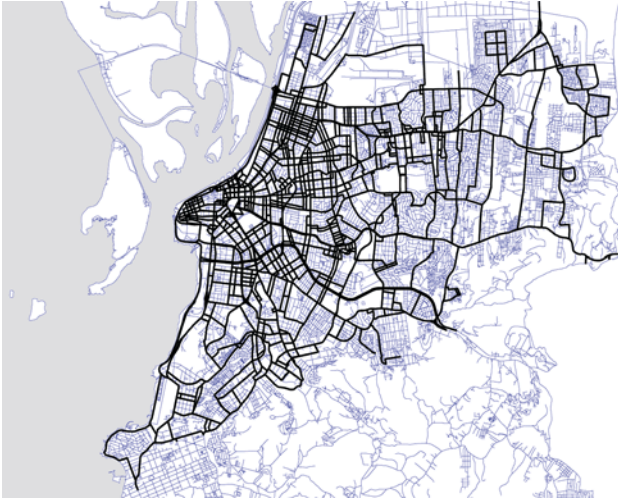
Os parâmetros estimados pelo modelo incluem: fluxos nos arcos, tempos mínimos de deslocamento entre pontos da rede, velocidades médias nos arcos ou em rotas escolhidas, atrasos nas interseções, quantificação de filas (transientes e filas acima da capacidade), grau de saturação (relação volume/capacidade) nos arcos, custos generalizados de viagem, rotas entre pares origem-destino, consumo total de combustível na rede, e emissão total de poluentes.

### **ETAPAS DO PROJETO SIMTRAF**

O projeto SIMTRAF contemplou a modelagem da totalidade da área urbana do município de Porto Alegre, representada na figura 2. A rede codificada no SATURN apresenta 675 km de arcos que representam 18 % da rede viária do município. A rede modelada totaliza 2800 arcos e 1850 nós. A figura 3 apresenta a extensão da rede codificada.

O projeto foi desenvolvido em diversas etapas. Embora essa classificação sugira implicitamente uma relação cronológica, essas etapas não necessariamente se efetuaram de forma seqüencial.

**Figura 2**  
**Área modelada no projeto SIMTRAF**



**Figura 3**  
**Rede de simulação codificada - representação através do SATURN**



Rede total - Porto Alegre, 21-6-1

## Levantamento dos dados da rede viária

A estrutura topológica da rede, consistindo de coordenadas das interseções (nós) e comprimento de trechos entre interseções (arcos), foi montada a partir de uma base geo-referenciada de Porto Alegre fornecida pela PROCEMPA (Companhia de Processamento de Dados de Porto Alegre). Pinto *et al.* (1998) descreve o uso de GIS - Sistemas de Informações Geográficas - no projeto SIMTRAF.

As velocidades de percurso nos arcos foram levantadas através de pesquisa com veículo-teste em amostras da rede modelada. Foram efetuadas no mínimo três medições por trecho, seguindo procedimentos estipulados em projeto desenvolvido pelo IPEA/ANTP (LASTRAN, 1997). A técnica consistiu em cronometrar os tempos totais e os tempos de parada entre pontos pré-determinados do itinerário. Os tempos de percurso foram obtidos pela diferença entre os tempos totais e os tempos de parada. A velocidade de percurso foi calculada pela razão entre o comprimento de cada trecho e o respectivo tempo de percurso.

As velocidades de trechos onde não houve medição foram estimadas a partir das velocidades de trechos com características similares. A similaridade entre arcos tomou por base: grau de saturação da via, tipo de pavimento, greide (aclive, declive ou plano), hierarquia da via, nível de perturbação e condições do entorno, sentido de circulação (bairro-centro ou centro-bairro), região da cidade (nível de inserção na concentração urbana central).

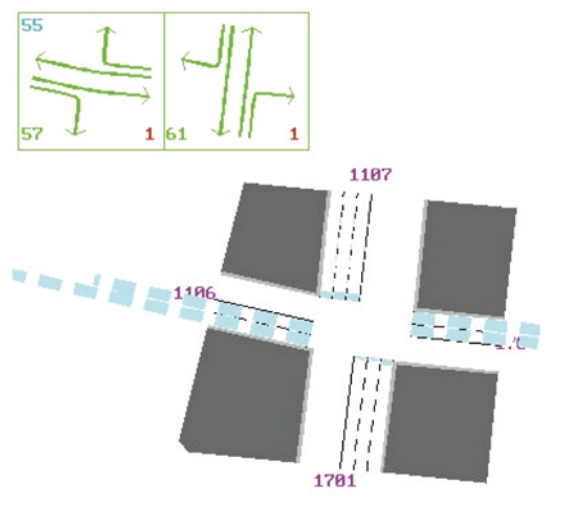
A duração dos estágios e as defasagens relativas foram extraídas diretamente das planilhas de programação semaforica fornecidas pela central de controle de tráfego da EPTC. Órgãos de gerenciamento do sistema de transporte coletivo municipal e metropolitano forneceram os itinerários das linhas de ônibus e micro-ônibus com as respectivas frequências. SATURN representa o sistema de transporte coletivo como fluxo adicional nos arcos por onde circula. Assim, a simulação representa simultaneamente o transporte público e o privado compartilhando o espaço viário em condições de tráfego misto, enquanto que a fase de alocação de tráfego só define as rotas dos automóveis particulares. Ainda, é importante salientar que SATURN também permite a codificação de arcos exclusivos para ônibus, recurso que pode ser utilizado na representação dos vários corredores de ônibus existentes nas cidades brasileiras.

## Calibração do modelo

A etapa de calibração propiciou a realização de procedimentos de correção e re-definição de parâmetros com vistas a obter uma melhor adequação do modelo à realidade. O processo de calibração, descrito detalhadamente em Cybis *et al.* (1999b), constou de três estágios.

No estágio preliminar, foram efetuadas as correções sugeridas pelo próprio modelo. Os diferentes módulos do SATURN fornecem relatórios com mensagens de erro ou alerta, orientando as correções devidas. O segundo estágio envolveu a investigação de dados cujos valores, embora aceitos pelo modelo, estejam inadequados, provavelmente em decorrência de falhas na codificação. Buscou-se identificar, por exemplo, elementos da rede com características de desempenho muito diferentes dos padrões normais, como filas e atrasos improváveis. No último estágio da calibração foi analisada a consistência de informações decorrentes do processo de alocação, como rotas utilizadas para deslocamentos entre pares origem-destino, velocidade média geral na rede, tempo de viagem ao longo de rotas específicas, etc. A comparação de filas reais com as estimadas, exemplificadas na figura 4, consistiu um recurso bastante utilizado na avaliação da consistência dos resultados da modelagem.

**Figura 4**  
Animação da filas nas aproximações de uma interseção



Ao longo do processo de calibração, além da correção de dados codificados de forma inadequada, duas ações resultaram importantes para aprimorar o desempenho do modelo. A redefinição dos conectores ligando as zonas de tráfego à rede viária foi importante para o ajuste da matriz atualizada. A redução dos tempos de aceitação de brechas, em relação aos valores *default* sugeridos pelo SATURN, levou a um desempenho mais adequado do modelo.

## Atualização da matriz de viagens

A matriz de viagens de automóveis foi obtida através do modelo de maximização de entropia ME2 (Willumsen, 1992). O ME2 estima matrizes de viagens utilizando contagens volumétricas recentes e uma matriz origem-destino inicial, denominada de matriz semente. A matriz semente foi construída a partir do último levantamento domiciliar disponível para Porto Alegre, realizado em 1986.

## ESTUDO DE CASO

Vários foram os estudos realizados com o SATURN em Porto Alegre. Entre eles, a avaliação da implantação de um Shopping Center na zona sul (Cybis *et al.*, 1999a) e o impacto decorrente da plena operação do Shopping Moinhos (Freitas *et al.*, 2001). O estudo aqui reportado contempla uma avaliação da proposta de adoção de sentido único de circulação no anel viário que compõe a Primeira Avenida Perimetral que circunda o centro da cidade de Porto Alegre. O cenário foi modelado exclusivamente com a finalidade de ilustrar o uso do SATURN.

O mapa constante da figura 5 ilustra o limite da rede modelada, caracterizado pela Av. Segunda Perimetral e Av. Ipiranga. Indica também o projeto de circulação com sentido anti-horário na Primeira Perimetral.

**Figura 5**  
Limite da área modelada e esquema de circulação proposto para o estudo de caso





## **Etapas do estudo**

O estudo de caso objetivou realizar uma comparação, através do SATURN, do desempenho da rede atual (cenário 0) com a proposta da adoção do sentido único de circulação no anel viário formado pela Primeira Perimetral (cenário 1). Foram as seguintes as etapas realizadas:

### *Concepção do modelo*

Consistiu da definição, entre outros, do nível de agregação da modelagem, da extensão da área de abrangência, das alterações na circulação viária, e dos horários a simular.

### *Construção do Cenário 0*

Realizado através da extração, da rede total SATURN de Porto Alegre, de uma sub-rede representativa da área de abrangência do projeto. Compreende as vias que devem sofrer impactos significativos a partir das alterações propostas.

### *Calibração da rede do Cenário 0*

Foi efetuada uma re-configuração da matriz de viagens, uma vez que zonas de tráfego externas à área de abrangência foram agregadas nos pontos de entrada e saída da sub-rede. Novas contagens volumétricas foram utilizadas nesse processo de calibração.

### *Construção do Cenário 1*

Consistiu na montagem do arquivo de dados contemplando as modificações requeridas pelo projeto. O Cenário 1 incorporou alterações nos sentidos de circulação de vias, nos itinerários de linhas de transporte público, em reprogramações semaforicas, e reformulação de relações de prioridades em interseções não-semaforizadas.

### *Análise dos resultados do Cenário 1*

Contemplou a análise do desempenho da rede viária submetida à operação do projeto em avaliação. Nessa fase, foram executadas algumas reformulações que conduziram ao aprimoramento do projeto original, a partir da identificação de trechos críticos.

### *Comparação dos resultados (Cenário 0 versus Cenário 1)*

Consistiu na comparação de parâmetros que caracterizam o desempenho operacional de ambas as redes.

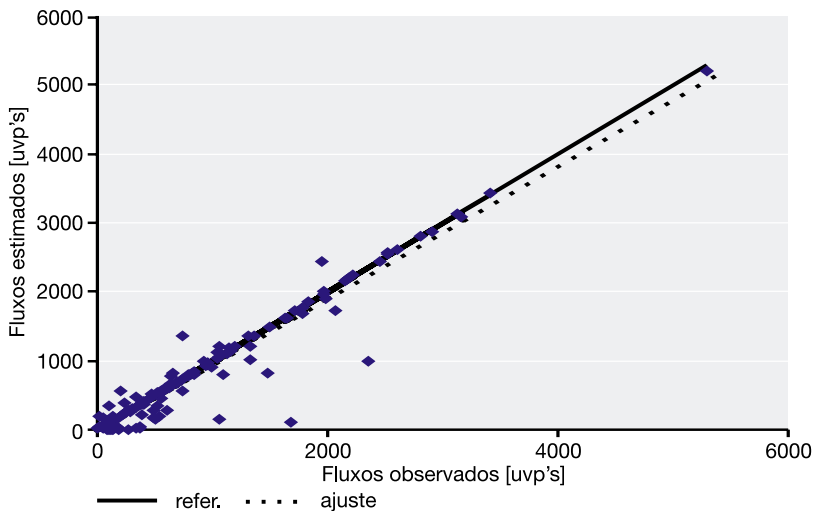
### Verificação da convergência e do ajuste do modelo

Diferentes práticas são adotadas quando da investigação do ajuste de modelos de alocação de tráfego. Existe uma natural tendência do usuário focar a atenção naqueles parâmetros sob seu controle. De uma forma geral, são recomendadas análises de resultados que contemplem, entre outros: fluxos nos arcos, tempos de viagem entre pontos distintos da rede, comprimento de filas em interseções críticas e rotas utilizadas nos deslocamentos.

O modelo construído apresentou uma boa adequação às condições observadas, tanto na análise agregada de desempenho quanto na avaliação desagregada. A velocidade média de percurso, obtida através de coleta de dados de campo na dimensão da rede modelada, alcançou 16,5 km/h; valores equivalentes estimados pelo modelo ficaram na ordem de 15,7 km/h.

Outro recurso, dentre os mais utilizados para determinar o ajuste de modelos de alocação, é a comparação entre fluxos modelados e observados. A figura 6 compara contagens volumétricas de campo com os fluxos estimados pelo modelo para os movimentos de conversão correspondentes. A 45° entre os eixos, a reta de referência indica o ajuste ideal. A correlação ( $R^2$ ) da reta de ajuste é 0,93 e o coeficiente angular 0,97. As recomendações do Department of Transport (1996) sugerem, para casos similares ao estudado,  $R^2$  em torno de 0,95 e coeficiente angular variando entre 0,90 e 1,10.

**Figura 6**  
Comparação entre fluxos modelados e observados



Ainda, as rotas definidas para os deslocamentos entre os pares origem-destino, bem como os comprimentos das filas apresentados pelo modelo, também demonstraram boa adequação aos padrões de tráfego observados.

### Comparação dos cenários

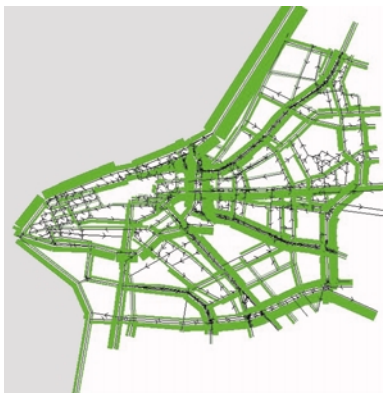
As figuras 7 e 8 apresentam exemplos de resultados alcançados pela execução do modelo SATURN para a rede atual e para a rede alternativa contemplada no estudo de caso, durante o período do pico da tarde. Na figura 7, as barras sobrepostas à rede viária indicam a intensidade do fluxo veicular. Nota-se que no cenário proposto (cenário 1), as viagens de retorno aos domicílios, que predominam na hora do pico da tarde, tendem a se concentrar mais na Via Perimetral que circunda o centro.

A figura 8 caracteriza esse fenômeno de alteração de rotas ao exemplificar as alternativas de circulação, entre um ponto de origem localizado no centro e um ponto de destino na periferia, em ambos os cenários modelados. As rotas estimadas apresentam, em média, distância de 4,6 km, tempo de 15 min, e velocidade de 17 km/h no cenário atual. No cenário com sentido único no anel viário, foram alcançados, em média, distância de 7,6 km, tempo de 18 min, e velocidade de 25 km/h. Nesse caso verificou-se que, apesar do aumento nas velocidades operacionais médias, o cenário proposto (cenário 1) implicou em incrementos nas extensões trafegadas e nos tempos de percurso.

Figura 7

Fluxos estimados para a rede atual (cenário 0) e para a rede do estudo de caso (cenário 1)

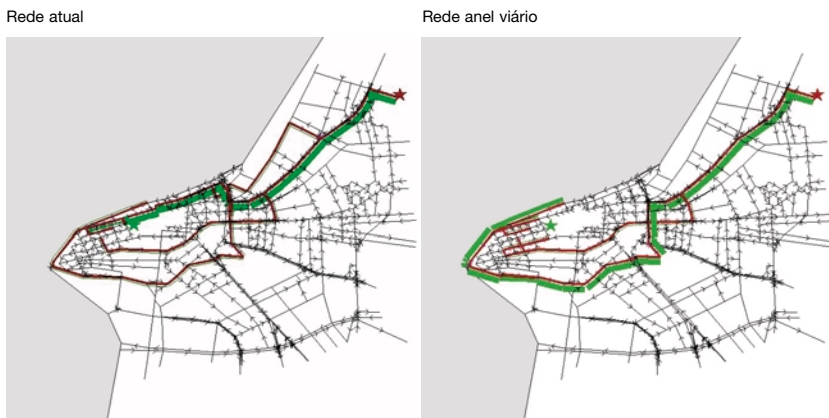
Rede atual



Rede anel viário



**Figura 8**  
**Escolha de rotas para um mesmo par origem-destino na rede atual**  
**(cenário 0) e na rede do estudo de caso (cenário 1)**



SATURN também possibilita a estimativa de parâmetros agregados referentes a toda a rede. Na tabela 1 constam os valores relativos aos cenários do presente estudo. Percebe-se que para o cenário proposto (cenário 1), o modelo estimou velocidade total menor e acréscimos tanto no tempo total de viagem quanto nas filas totais.

**Tabela 1**  
**Resultados**

Item	Cenário atual (0)	Cenário proposto (1)
Filas totais (uvp.h/h)	1670,7	1731,2
Tempo total de viagem (uvp.h/h)	7326,7	8061,9
Distância de viagem (uvp.km/h)	150484,4	147340,8
Velocidade total média (km/h)	20,5	18,3

*uvp= unidade veículo padrão.*

## CONCLUSÃO

Esse artigo apresenta a dimensão do projeto SIMTRAF e um exemplo de aplicação do modelo SATURN na cidade de Porto Alegre. Descreve, também, as etapas e as decisões tomadas durante o desenvolvimento de um estudo de caso que contemplou a aplicação do SATURN na área central da cidade. No Brasil, não existe, ainda, uma tradição pela

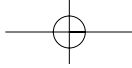
utilização de modelos de alocação de tráfego na análise de impactos gerados por modificações na circulação viária urbana. A proposta do artigo é apresentar o potencial de modelos de alocação e simulação no apoio à gestão da circulação em áreas urbanas.

A modelagem conjunta da alocação e simulação do tráfego amplia a dimensão da análise. Por exemplo, para o caso de um pólo gerador de tráfego, avaliações empíricas têm alcance limitado uma vez que restringem as análises às interseções próximas ao empreendimento. Já o SATURN possibilita ampliar a investigação de forma a incluir regiões mais abrangentes as quais também são afetadas. O modelo estima o desempenho agregado da rede e de diferentes arcos e interseções, além das características de deslocamentos entre pares origem-destino. Ainda, a ferramenta calcula vários parâmetros complementares de difícil apropriação empírica como velocidades de percurso, distâncias percorridas em deslocamentos completos, e tempos parados em filas.

O processo de alocação e simulação do tráfego permite uma melhor compreensão da operação proposta por um projeto. Assim, é possível identificar deficiências na concepção original de um projeto antes de sua implantação, de modo a viabilizar o seu aperfeiçoamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CYBIS, H. B. B.; LINDAU, L. A., E ARAÚJO, D. R. C. Avaliando o impacto atual e futuro de um pólo gerador de tráfego na dimensão de uma rede viária abrangente. *Revista Transportes - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 64-85 mai. 1999a.
- CYBIS, H. B. B.; LINDAU, L. A.; NODARI, C. T.; ARAÚJO, D. R. C. Calibração e verificação do ajuste do modelo de alocação SATURN à rede de Porto Alegre. In: CONGRESSO DA ANPET, XIII, 1999, São Carlos. *Anais ...* São Carlos: ANPET, 1999b. v. I, p. 325-332.
- DEPARTMENT OF TRANSPORT. *Traffic Appraisal in Urban Areas*, HMSO Books. England: 1996.
- FREITAS, S. L. O.; MOSCARELLI, F.; BRANCO, O. C.; CYBIS, H. B. B.; ARAÚJO, D. R. C., NODARI, C. T. Uso do modelo SATURN no estudo de impacto de um pólo gerador de viagens no tráfego. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TRANSPORTE E TRÂNSITO, XIII, 2001, Porto Alegre. *Anais ...* Porto Alegre: ANTP, 2001.
- LASTRAN. *Redução das deseconomias urbanas com melhoria do transporte público: cidade de Porto Alegre*. Relatório Técnico. Laboratório de Sistemas de Transportes. Porto Alegre: Convênio Trensurb, PMPA, UFRGS. 1997
- MAY, A. D.; PHIU-NUAL, K.; MONTGOMERY, F. O.; PAKSARSAWAN, S.; VAN VUREN, T. Applications of SATURN in Bangkok. *Traffic Engineering & Control*. London, v. 34, n. 1, p. 20-27, dec., 1992.
- MCSHEEN, J. R.; HALE R. C. (1989) Traffic Modelling in Kuwait: - 1. Development of a SATURN network database. *Traffic Engineering & Control*. London, v. 30, n. 10, p. 466-473, oct., 1989.



- PINTO, A. B., CYBIS, H. B. B., ARAÚJO, D. R. C., LINDAU, L. A. Utilização de um Sistema de Informação Geográfica como plataforma para aplicação do modelo SATURN. *In: CONGRESSO DA ANPET, XII, 1998, Fortaleza. Anais ... Fortaleza: ANPET, 1988. v. II, p. 18-23.*
- MATZOROS, T.; VAN VLIET, D.; RANDLE, J.; WESTON, B. A validation of the SATURN and ME2 models using before-and-after survey data from Manchester. *Traffic Engineering & Control*, London, v. 28, n. 12, p. 641-643, dec., 1987.
- VAN VLIET, D.; HALL, M. *SATURN 9.4 - User Manual*. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1988.
- VINCENT, R. A.; MITCHELL, A. I.; ROBERTSON, D. I. *User Guide to TRANSYT - version 8*, TRRL, LR 888. England: 1980.
- WILLUMSEN, L. G. Estimation of OD matrices and transport models from traffic counts. *In: SIMPLIFIED TRANSPORT DEMAND MODELLING. Proceedings...* London: PTRC, 1992. p. 33-43.

