

# ANÁLISE COMPARATIVA DE SIMULADORES DE TRÁFEGO PARA ESTIMATIVA DE CO EM ÁREAS URBANAS

## **Tsuneoyoshi Imasato**

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar, Porto Alegre, RS, Brasil; Tel: (051) 3308 3596; Fax: (051) 3308 4007  
tsuneima@gmail.com

## **Paula Ariotti**

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar, Porto Alegre, RS, Brasil; Tel: (051) 3308 3596; Fax: (051) 3308 4007  
paula@producao.ufrgs.br

## **Gabriel Jacondino**

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar, Porto Alegre, RS, Brasil; Tel: (051) 3308 3596; Fax: (051) 3308 4007  
gjacondino@terra.com.br

## **Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar, Porto Alegre, RS, Brasil; Tel: (051) 3308 3596; Fax: (051) 3308 4007  
helenabc@producao.ufrgs.br

## RESUMO

As emissões veiculares acarretam graves problemas ambientais. Tais emissões podem ser estimadas através da análise da atividade operacional dos veículos em uma rede viária. Modelos microscópicos de simulação descrevem o tráfego através da representação individual dos veículos, contemplando as interações dos veículos entre si e com a infra-estrutura viária. Esses modelos fornecem estimativas mais detalhadas do desempenho viário, porém, seu processo de calibração é complexo e exerce grande influência na qualidade dos resultados. Estimativas de emissões podem ser também obtidas através de modelos específicos de emissões associados aos modelos de tráfego microscópicos. A integração dos dados desses modelos pode possibilitar estimativas de emissões potencialmente mais corretas. No entanto, dependendo das regras que regem o comportamento de veículos nos modelos microscópicos, como os modelos *car-following* e *lane-changing*, os resultados gerados podem ser diferentes para a análise de uma mesma rede viária.

Este estudo apresenta uma análise comparativa da estimativa das emissões de monóxido de carbono (CO) obtidas a partir de dois simuladores de tráfego. A análise compara a atividade operacional dos veículos, estimada pelos modelos de simulação de tráfego DRACULA e INTEGRATION, e as estimativas das emissões de CO previstas pelo modelo de emissões CMEM.

Os modelos de simulação de tráfego e de emissões foram aplicados em um estudo de caso na cidade de Porto Alegre, Brasil. Os resultados do estudo mostraram que, embora os dois modelos de simulação de tráfego tenham passado por processos de calibração usuais e aceitáveis para usos correntes de gerenciamento de tráfego, eles apresentaram comportamento microscópico diferenciado, acarretando emissões totais bastante distintas.

PALAVRAS-CHAVE: emissões veiculares, micro-simulação de tráfego, modelos de emissões.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da frota de veículos aliado à escassez de investimentos na infraestrutura de transporte pode gerar um desequilíbrio na relação entre oferta e demanda no sistema viário. Este cenário proporciona a formação de grandes congestionamentos quando a demanda atinge a capacidade viária e, conseqüentemente, níveis de serviço insatisfatórios. Dentre os problemas causados pelo setor de transportes, a emissão de poluentes atmosféricos tem merecido especial atenção. Esses poluentes são responsáveis pela contaminação do ar, principalmente em centros urbanos, atingindo a saúde da população e gerando a degradação das estruturas urbanas.

Modelos computacionais de tráfego são utilizados como ferramentas de apoio à avaliação do desempenho viário urbano e para a estimativa das emissões veiculares. Esses modelos apresentam diversas abordagens de modelagem em relação ao nível de detalhes considerado. Modelos macroscópicos e mesoscópicos capturam as informações do tráfego através de variáveis agregadas, como volume ou velocidade. Modelos microscópicos representam a operação do tráfego de forma detalhada, descrevendo os veículos individualmente e considerando as interações dos veículos entre si e com a rede viária. Esses modelos fornecem estimativas mais detalhadas do desempenho viário, porém, seu processo de calibração é complexo e exerce grande influência na qualidade dos resultados.

Atualmente, a maioria dos modelos de tráfego apresenta módulos de estimativas de emissões veiculares. Eles apresentam, entretanto, grandes variações, tanto em sua abordagem teórica, como em relação aos fatores de emissões associados aos veículos. O esforço de desenvolvimento de pacotes computacionais de modelagem de tráfego raramente contempla uma preocupação com atualização de parâmetros de emissões veiculares. As estimativas de emissões veiculares provenientes dos módulos de emissões de modelos de tráfego devem ser consideradas com cuidado.

Estimativas de emissões podem ser também obtidas através de modelos específicos de emissões associados aos modelos de tráfego microscópicos (Ahn et al., 2002). A integração dos dados desses modelos pode possibilitar estimativas de emissões potencialmente mais corretas (Cappiello, 2002). No entanto, dependendo das regras que regem o comportamento de veículos nos modelos microscópicos, os resultados gerados podem ser diferentes para a análise de uma mesma rede viária. As características dos processos de *car-following* e *lane-changing* dos modelos microscópicos podem ser grandes responsáveis por variações nas estimativas de emissões. Modelos de *car-following* e *lane-changing* são responsáveis pelas estimativas dos valores de aceleração e velocidades instantâneas. Alguns modelos de *car-following* tendem a gerar acelerações instantâneas maiores que outros para um padrão agregado de tráfego semelhante. Como as emissões veiculares são altamente dependentes da combinação entre aceleração e velocidade, as estimativas resultantes podem ser significativamente diferentes.

O objetivo deste estudo é analisar, de forma comparativa, os efeitos na estimativa de monóxido de carbono (CO) em áreas urbanas através da utilização dos dois modelos de tráfego microscópicos com regras de *car-following* e *lane-changing* distintas. Os modelos de tráfego utilizados são o DRACULA e o INTEGRATION. Os resultados de desempenho viário desses modelos foram utilizados no modelo de emissões CMEM, que estima a quantidade de poluentes gerada em função do modo de operação dos veículos durante o período modelado.

## 2. MODELAGEM DE TRÁFEGO E ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES

O processo de estimativa de emissões veiculares é complexo porque é derivado da interação de diversos fatores, como características da infra-estrutura viária, do tipo de veículos e combustíveis e do padrão de viagens de determinado local. As estimativas de emissões podem ser realizadas com diferentes níveis de detalhamento, dependendo do nível de agregação das variáveis consideradas. Bai et al. (2007) compararam as estimativas de emissões através de dois métodos que utilizam, respectivamente, dados estimados para arcos, como velocidades e volumes, e dados relativos a viagens, como volumes em rotas. Os autores constataram que as estimativas baseadas em informações relativas aos arcos da rede viária resultaram em maiores emissões do que as estimativas baseadas em dados sobre viagens. Ainda, os autores identificaram que as emissões baseadas em arcos são mais sensíveis a mudanças operacionais do sistema viário, enquanto que as emissões baseadas em viagens são mais sensíveis às mudanças nos níveis de demanda.

A pesquisa de Bai et al. (2007) reforça a importância de analisar a fundamentação teórica dos modelos de transportes utilizados para a previsão de emissões. Divergências nas abordagens teóricas podem levar a grandes variabilidades das estimativas, e como consequência, na confiabilidade dos resultados.

As previsões de emissões de modelos baseados em estados de tráfego médios não captam adequadamente muitos dos efeitos das variações do tráfego, particularmente em áreas urbanas. Modelos de tráfego microscópicos fornecem uma representação detalhada do processo do tráfego em redes viárias e são frequentemente, utilizados para avaliações mais complexas envolvendo gerenciamento do tráfego, segurança viária e sistemas de informações.

Nos modelos microscópicos, o comportamento dos veículos na rede viária é representado por um conjunto de regras que determinam a velocidade instantânea e a posição dos veículos. Os modelos que regem tal comportamento podem ser divididos em modelos de *car-following*, que representam a movimentação longitudinal dos veículos na via e, modelos de *lane-changing*, que reproduzem a movimentação transversal dos veículos na pista, associada à mudança de faixas de tráfego.

Os modelos de *car-following* descrevem os padrões de aceleração e desaceleração que resultam da decisão do veículo diante da movimentação do veículo que está a sua frente e de outros fatores que influem em sua velocidade, como o limite máximo de velocidade da via, curvatura e inclinação da via, entre outros. Os modelos de troca de faixas, ou *lane-changing*, representam as decisões de mudança de faixa de tráfego baseada nas preferências do usuário e na situação de tráfego na faixa atual e em outras faixas, como velocidade do veículo da frente ou existência de uma brecha na corrente de tráfego da faixa adjacente.

Softwares de simulação de tráfego podem ser constituídos de distintos modelos de *car-following* e *lane-changing*. Este trabalho analisa, de forma comparativa, emissões veiculares através da utilização de dois modelos de simulação de tráfego com processos de *car-following* e *lane-changing* distintos. A título de exemplo, neste artigo são analisadas as estimativas de monóxido de carbono (CO). As diferenças nas estimativas de emissões são analisadas através da utilização de um modelo específico de previsão de emissões que utiliza as informações da atividade operacional dos veículos dada pelos modelos de tráfego.

A seção a seguir apresenta a descrição dos modelos de tráfego e do modelo de emissões utilizados neste estudo.

### 3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

Neste estudo foram utilizados dois modelos de micro-simulação de tráfego, DRACULA e INTEGRATION, e um modelo de estimativa de emissões veiculares, CMEN.

#### 3.1. Modelo de tráfego DRACULA

O modelo DRACULA – *Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation* – (Liu, 2002) é um simulador microscópico de redes de tráfego urbanas que representa a trajetória dos veículos ao longo de rotas pré-especificadas. O modelo foi desenvolvido para aplicações predominantemente urbanas, e a evolução dos veículos na rede é estimada através de modelos de *car-following* e *lane-changing*, considerando o comportamento desejado dos motoristas, a sinalização e o controle nas interseções e arcos.

O modelo de *car-following* do DRACULA representa as interações longitudinais dos veículos na rede, através do cálculo da velocidade corrente do veículo a partir da sua velocidade desejada, em resposta à velocidade e distância em relação ao veículo da frente. Esse modelo assume as características do modelo proposto por Gipps (1981).

Os veículos são individualmente caracterizados através de sua descrição física, como tipo de veículo, comprimento, máxima aceleração e desaceleração, e descrição comportamental do condutor, como tempo de reação, velocidade desejada, e distância mínima de afastamento em relação ao veículo à frente. Estas características são aleatoriamente escolhidas a partir de uma distribuição normal dos tipos de veículos, com médias e coeficientes de variação definidos pelo pesquisador.

Uma condição freqüente de uso do DRACULA envolve a associação com modelo de alocação de tráfego SATURN (Van Vliet; Hall, 2000), na qual parte das informações é exportada do modelo de alocação. Desta forma, parte das informações necessárias para a codificação da rede e especificação da demanda, volumes e rotas do modelo de micro-simulação, é obtida através de uma transferência de arquivos proveniente de um modelo SATURN.

#### 3.2. Modelo de tráfego INTEGRATION

O modelo INTEGRATION (Van Aerde, 2004) integra a alocação e simulação de tráfego. O modelo executa a simulação rastreando de forma explícita o movimento dos veículos ao longo da rede viária. O rastreamento dos veículos permite a análise dos movimentos de troca de faixa, aceitação de brechas e manobras em conversões. O modelo de *car-following* utilizado pelo INTERGRATION combina os modelos de Pipes (1966) e Greenshields (1935). Nesse modelo de *car-following*, são combinadas características de modelos microscópicos de *car-following* com aspectos dos modelos macroscópicos de fluxo.

O INTEGRATION apresenta lógicas distintas para representar eventos de aceleração e desaceleração enquanto simula a transição das velocidades dos veículos. A lógica de desaceleração, baseada na cinemática, reconhece a diferença de velocidade entre o veículo seguidor e o veículo à sua frente. O veículo seguidor estima o espaço excedente entre ele e o veículo à sua frente. Esse espaço excedente corresponde à diferença entre o espaçamento atual e o espaçamento mínimo. Isso garante que o veículo seguidor possa desenvolver uma taxa de desaceleração constante, mantendo o espaçamento mínimo em congestionamentos.

As taxas de aceleração são governadas por um modelo de dinâmica veicular, o qual estima a aceleração máxima dos veículos baseada na força resultante.

### **3.3. Modelo de emissões CMEM**

O modelo CMEM (Barth et al., 2000) é um modelo de emissões baseado na demanda por potência. Esse modelo estima as emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> segundo a segundo, além do consumo de combustíveis, em função do modo de operação para automóveis e veículos comerciais leves. O modelo CMEM é composto por 6 módulos e é capaz de estimar a emissão de 26 categorias de veículos, entre automóveis e veículos comerciais leves. O usuário tem a opção de especificar a categoria do veículo e a variação da sua velocidade segundo a segundo. Podem ser especificados, ainda, o tempo de inatividade dos veículos, a sua aceleração, a inclinação do greide e a presença de equipamentos no veículo, como ar-condicionado.

O modelo CMEM foi calibrado usando uma base de dados de testes em 300 veículos. A base de dados inclui medidas em dinamômetro de chassi segundo a segundo da velocidade, emissões do motor e emissões de descarga em três diferentes ciclos de condução. Os veículos utilizados para compor a base de dados do CMEM são representativos da frota de Riverside, Califórnia, no ano de 1997.

## **4. ESTUDO DE CASO**

Este artigo avalia, de forma comparativa, as emissões de monóxido de carbono (CO) estimadas a partir da atividade operacional dos veículos simulada através dos modelos DRACULA e INTEGRATION, em um estudo de caso. A atividade operacional dos veículos foi representada pelas acelerações e velocidades instantâneas. Essas informações provenientes dos dois modelos de tráfego foram utilizadas como dados de entrada para o modelo de emissões CMEM.

O estudo de caso corresponde a um trecho de uma via arterial da cidade de Porto Alegre, Brasil. A rede modelada contém oito interseções, onde duas são reguladas por regras de prioridade e seis são semaforizadas. O comprimento longitudinal do trecho totaliza 970 m. A programação semafórica é implementada através de tempos fixos em sincronismo. O horário modelado corresponde ao período de pico vespertino, entre 18:00h e 19:00h. Na hora modelada, as vias operam com níveis de demanda próximos da capacidade viária. A Figura 1 representa a rede viária modelada.

A análise investiga relações entre a atividade operacional dos veículos modelada pelos dois modelos e as estimativas de CO decorrentes das velocidades e acelerações instantâneas. Para a quantificação das emissões de CO e comparação dos resultados dos dois modelos de tráfego, considerou-se apenas os arcos que compõe o trecho longitudinal da rede viária apresentada na Figura 1.

A etapa de calibração de um modelo busca ajustar os parâmetros de entrada no modelo para que ocorra a melhor equivalência entre os resultados da simulação e o mundo real (Hourdakis et al., 2003). Os dois modelos de tráfego foram calibrados para representar as condições reais de desempenho do tráfego no local, buscando reproduzir parâmetros macroscópicos como volumes de veículos, tempos e velocidades de percurso nas rotas e comprimento médio de filas.

Em função da diversidade de parâmetros disponíveis para caracterizar o comportamento dos veículos no modelo DRACULA, seu processo de calibração é bastante complexo. Os parâmetros adotados para o modelo DRACULA foram obtidos a partir de um processo de calibração com a utilização de otimização multivariada (Araújo, 2003; Araújo et al., 2004). O modelo INTEGRATION, por outro lado, apresenta uma menor gama de parâmetros de calibração e foi calibrado a partir de um processo de tentativa e erro. A Tabela 1 apresenta os valores de velocidade média de alguns trechos da rede viária obtidos na calibração dos modelos. Os trechos apresentados na Tabela 1 representam aqueles onde foi realizada coleta de velocidades em campo (Araújo, 2003).

Os dados do desempenho operacional dos veículos ao longo da simulação foram registrados pelos modelos de tráfego a cada segundo. Para a quantificação das emissões de CO no modelo de emissões, considerou-se um tipo de veículo padrão leve, representando condições estabilizadas de temperatura de operação do motor. Assim, a estimativa do CO no modelo CMEM foi realizada considerando-se um veículo padrão com catalisador de três vias, injeção eletrônica e quilometragem acima de 80.000 km. Esta consideração foi feita com base na pesquisa de entrevistas domiciliares da cidade de Porto Alegre (EDOM, 2004) que indicou que 56% dos domicílios detinham um veículo fabricado entre 1995 e 2001, semelhante ao veículo padrão adotado neste estudo.

É importante ressaltar que, neste estudo, os valores de emissões estimados correspondem às taxas de emissões padrão da versão 2.02 do CMEN para combustível gasolina. Variações devem ocorrer, não somente em decorrência da variabilidade da frota como também da diversidade de combustíveis utilizados nas cidades brasileiras. O trabalho não tem por objetivo analisar os valores absolutos das emissões, mas a variabilidade nas estimativas que pode ocorrer em decorrência da diversidade dos processos de modelagem de tráfego.

## **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados globais da modelagem para estimativa de emissões de CO no trecho viário analisado são apresentados na Tabela 2. Observou-se que, considerando os modelos de tráfego calibrados e o número de veículos aproximado em cada modelo, a estimativa de CO decorrente da simulação de tráfego realizada através do modelo DRACULA foi aproximadamente 50% maior que a estimativa de CO resultante da simulação realizada com o INTEGRATION. As simulações dos modelos DRACULA e INTEGRATION foram replicadas com cinco sementes estocásticas diferentes. Os resultados apresentados correspondem à média das cinco replicações.

As diferenças entre as estimativas de CO produzidas pelos dois modelos podem estar relacionadas a três fatores principais:

1. O processo de calibração macroscópica, usualmente adotado para avaliação do desempenho do sistema viário decorrente de projetos de gerenciamento de tráfego não é adequado para estimativas mais complexas como emissões veiculares. As emissões são diretamente dependentes das velocidades e acelerações instantâneas desenvolvidas pelos veículos. Modelos de tráfego desenvolvidos com o objetivo de avaliar emissões deveriam passar por um processo de calibração microscópica.
2. As diferenças entre o comportamento cinemático dos veículos representados por modelos distintos pode ser intensificada devido às diferenças teóricas dos modelos de *car-following* e *lane-changing* que compõe os modelos de simulação. Em função de

sua natureza, alguns modelos tentem a gerar taxas de acelerações instantâneas maiores. Embora esta particularidade não interfira no comportamento macroscópico do modelo, apresenta uma grande influência nas taxas de emissões veiculares resultantes.

3. As particularidades da codificação dos modelos podem se refletir em diversos parâmetros da simulação. Para o caso em particular, o modelo DRACULA foi construído a partir de uma transferência de arquivos, com informações da rede viária e volumes nas rotas, proveniente do modelo de alocação SATURN. A utilização associada dos dois modelos repercutiu principalmente nos conceitos de velocidade informados para cada arco da rede. A velocidade codificada no SATURN refere-se à velocidade em fluxo livre dos veículos para cada arco, enquanto que no DRACULA, o mesmo valor indica a velocidade desejada dos veículos naquele arco. Além disso, ocorrem casos em que a diferença entre velocidades de arcos adjacentes é grande, forçando os veículos a desenvolverem picos de aceleração ou desaceleração para adequar-se à velocidade do arco seguinte, contribuindo para o aumento das emissões.

A análise comparativa dos dois modelos envolveu a construção de matrizes de frequência de estados operacionais. Estado operacional corresponde a um registro da velocidade e aceleração instantânea para cada veículo simulado na rota de interesse, a cada segundo. As matrizes de frequência de estados operacionais, apresentadas nas Tabelas 3 e 4, indicam uma concentração de observações na faixa de aceleração de -5 a 5 km/h/s em ambos os modelos. Observa-se que aproximadamente 95% dos estados operacionais registrados nos relatórios de simulação estão nessa faixa de aceleração.

A análise das matrizes permite observar que a simulação através do DRACULA gerou uma maior ocorrência de estados com altas velocidades e aceleração positiva do que a simulação através do INTEGRATION. As matrizes das emissões correspondentes aos estados operacionais são apresentadas nas Tabelas 5 e 6. Observa-se que as maiores emissões estão associadas a combinações de altas acelerações e velocidades. No DRACULA, as células correspondentes a acelerações positivas e velocidades acima de 40 km/h representam 8,14% de estados operacionais e são responsáveis por 54,07% de suas emissões de CO. É importante destacar que nesse intervalo três células, com aceleração acima de 5 km/h/s, representam 23,53% do total das emissões com apenas 0,33% das observações.

No INTEGRATION as células correspondentes a acelerações positivas e velocidades acima de 40 km/h apresentaram 23,83% de suas emissões de CO, correspondendo a 1,58% dos estados operacionais. Destaca-se que, nesse intervalo, duas células com aceleração acima de 5 km/h/s, que correspondem a apenas 0,07% dos estados operacionais, são responsáveis por 14,11% do total das emissões.

O estudo avaliou também os arcos que apresentaram as maiores concentrações de emissões na média das cinco simulações com sementes estocásticas diferentes. Foram analisados em particular nove arcos distintos ao longo do trecho longitudinal da rede viária. No DRACULA o arco de maior contribuição de emissões foi o arco situado entre a interseção em Y que antecede o semáforo 5 (marcada em verde na Figura 1) e o semáforo 5. Uma contribuição de poluentes de 29,8% foi apontada. No INTEGRATION, este mesmo arco apresentou baixo volume de poluentes e a maior concentração de CO foi estimada para o arco anterior, entre o semáforo 4 e a interseção em Y com 24% das emissões totais. Estas diferenças provavelmente estão relacionadas com as discrepâncias nos critérios de codificação dos modelos.

As velocidades dos arcos no modelo INTEGRATION são definidas como velocidades de fluxo livre e neste estudo foi codificada iguais para todos os arcos. Em função de conveniência de uso, as velocidades dos arcos definidas para o modelo DRACULA foram provenientes do processo de alocação de tráfego realizado no modelo SATURN e codificadas automaticamente a partir de uma transferência de arquivos. Como consequência deste processo os diversos arcos da rede DRACULA apresentavam velocidades de percursos variadas. Devido às diferenças de velocidades nos arcos ao longo do trecho ocorrem picos de aceleração decorrentes da adequação das velocidades no momento de transposição para o arco subsequente.

No processo de calibração dos dois modelos, o segmento entre as ruas Santo Antônio e João Telles apresentou a maior adequação entre as velocidades observadas em campo e as velocidades simuladas. Embora as particularidades de construção dos modelos não gerem impactos notáveis para uma avaliação do desempenho geral do tráfego, elas podem ter grande influência na estimativa das emissões veiculares.

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise comparativa de dois simuladores de tráfego para a estimativa de emissões de monóxido de carbono (CO) em áreas urbanas. A análise investigou relações entre a atividade operacional dos veículos modelada pelos modelos de simulação de tráfego DRACULA e INTEGRATION e as estimativas de CO baseadas previstas pelo modelo de emissões CMEM. A análise considerou apenas veículos leves com a utilização de gasolina como combustível. É importante ressaltar este trabalho não tem por objetivo analisar os valores absolutos das emissões, mas a possível variabilidade nas estimativas em decorrência da diversidade dos processos de modelagem de tráfego.

Os resultados indicaram que as estimativas de CO resultantes da simulação através dos dois modelos calibrados com padrões semelhantes, para uma mesma demanda, apresentaram valores significativamente diferentes. A estimativa de CO resultante da simulação através do DRACULA foi 50% maior que as resultantes da simulação através do INTEGRATION.

Embora os dois modelos tenham passado por processos de calibração tradicionais e aceitáveis para usos correntes, a análise das matrizes de frequência dos estados operacionais dos veículos indica que os dois modelos de simulação geram comportamentos microscópicos diferenciados, acarretando emissões totais bastante distintas.

As emissões veiculares são diretamente dependentes das variações das velocidades instantâneas e das taxas de aceleração dos veículos ao longo da rede viária. Características distintas dos processos *car-following* e *lane-changing* em diferentes modelos microscópicos podem ser responsáveis por variações nas acelerações e velocidades instantâneas dos veículos ao longo da rede viária. Como as emissões veiculares são altamente dependentes da combinação entre aceleração e velocidade, as estimativas resultantes de processos distintos podem ser significativamente diferentes.

Estudos desenvolvidos com o objetivo de estimar emissões a partir de modelos de simulação de tráfego devem buscar uma representação adequada do comportamento cinemático do tráfego. Os processos de calibração tradicionalmente utilizados para análises de tráfego em geral não são adequados para o desenvolvimento de análises mais complexas, como é o caso da estimativa de emissões de poluentes atmosféricos.



## REFERÊNCIAS

- Ahn, K.; Rakha, H.; Trani, A.; Van Aerde, M. (2002) Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 182-190.
- Araújo, D. R. C. (2003) Comparação da simulação de tráfego nos modelos SATURN e DRACULA. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Araújo, D.R.C.; G.B, Jacondino; C.S. Caten; H.B.B. Cybis (2004) Método de calibração de modelos de micro-simulação de tráfego através da otimização multivariada. *Transportes*, v. 2, n. 1, p. 5-12.
- Bai S, Chiu Y.C.E., Niemeier D.A. (2007) A comparative analysis of using trip-based versus link-based traffic data for regional mobile source emissions estimation. *Atmospheric Environment*, V. 41, Issue 35, pp. 7512-7523.
- Barth, M.; F. An; T. Younglove; G. Scora; C. Levine; M. Ross; T. Wenzel (2000) The development of a Comprehensive Modal Emissions Model. Final report to the National Cooperative Highway Research Program.
- Cappiello, A. (2002) Modeling traffic flow emissions. Thesis - Master of Science in Transportation – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA.
- EDOM – ENTREVISTA DOMICILIAR (2004) Pesquisa de Origem e Destino de Porto Alegre – Entrevista Domiciliar – EDOM 2003. Relatório Técnico. Porto Alegre: EPTC/Magna/TIS, 76 p.
- Greenshields, B. D. (1935) A Study of traffic capacity. *Proceedings of the Highway Research Board*, 14, 468.
- Hourdakis, J.; P. G. Michalopoulos; J. Kottommannil (2003) A practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. In: *Transportation Research Board Annual Meeting*, 82., Washington D.C., 2003. *Proceedings...* Washington: TRB.
- Liu, R. (2002) DRACULA traffic simulation model: a user guide. Institute for Transportation Studies, University of Leeds.
- Pipes, L. A. (1966) Car following models and the fundamental diagram of road traffic, *Transportation Research* 1 (1), pp. 21–29.
- Van Aerde, M. and Associates (2004) INTEGRATION release 2.30 for Windows User's Guide – Vol I and II: Fundamental Modal Features and Advanced Model Features. Ontario: Kingston.
- Van Vliet, D., Hall, M. (2000) SATURN 10.1 User Manual. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds.

## TABELAS

**Tabela 1. Valores de velocidades médias obtidas a partir dos modelos calibrados**

| Trecho da rede viária                 | Velocidades médias (km/h) |         |             |
|---------------------------------------|---------------------------|---------|-------------|
|                                       | CAMPO                     | DRACULA | INTEGRATION |
| Barros Cassal – Garibaldi             | 17,5                      | 19,0    | 17,0        |
| Garibaldi - Stº Antonio               | 17,2                      | 17,6    | 18,5        |
| Stº Antônio - João Telles             | 27,0                      | 27,0    | 27,4        |
| João Telles - Ramiro Barcelos (Norte) | 27,5                      | 25,7    | 29,3        |
| João Telles - Ramiro Barcelos (Sul)   | 34,9                      | 37,5    | 34,8        |
| TOTAL - REDE VIÁRIA                   | 24,3                      | 24,9    | 24,1        |

**Tabela 2. Resultados globais da modelagem**

| Modelo de Tráfego | Emissões totais de CO (kg) | Número de veículos |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| DRACULA           | 3,9                        | 1167               |
| INTEGRATION       | 2,5                        | 1166               |

**Tabela 3. Número de observações de estados operacionais – DRACULA**

|                   |                  | Aceleração (km/h/s)   |             |         |                 |                   |                    |                    |                    |                    | Número de Observações |
|-------------------|------------------|-----------------------|-------------|---------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
|                   |                  | $5 \leq a < 10$       | $0 < a < 5$ | $a = 0$ | $-5 \leq a < 0$ | $-10 \leq a < -5$ | $-15 \leq a < -10$ | $-20 \leq a < -15$ | $-25 \leq a < -20$ | $-30 \leq a < -25$ |                       |
| Velocidade (km/h) | $v = 0$          |                       |             | 10,12%  | 0,43%           | 0,01%             | 0,01%              | 0,03%              | 0,01%              |                    | 15080                 |
|                   | $0 < v < 5$      |                       | 0,88%       | 1,92%   | 3,32%           | 0,11%             | 0,03%              | 0,03%              |                    |                    | 8897                  |
|                   | $5 \leq v < 10$  | 0,12%                 | 1,30%       | 0,01%   | 2,30%           | 0,12%             | 0,02%              | 0,02%              |                    |                    | 5521                  |
|                   | $10 \leq v < 15$ | 0,11%                 | 1,44%       |         | 1,52%           | 0,14%             | 0,01%              | 0,02%              | 0,01%              |                    | 4620                  |
|                   | $15 \leq v < 20$ | 0,14%                 | 1,72%       | 0,84%   | 1,21%           | 0,20%             | 0,03%              | 0,03%              |                    |                    | 5921                  |
|                   | $20 \leq v < 25$ | 0,28%                 | 2,87%       | 0,26%   | 1,15%           | 0,24%             | 0,06%              | 0,02%              |                    |                    | 6912                  |
|                   | $25 \leq v < 30$ | 0,29%                 | 4,41%       | 5,19%   | 3,23%           | 0,33%             | 0,05%              | 0,05%              |                    |                    | 19207                 |
|                   | $30 \leq v < 35$ | 0,34%                 | 4,30%       | 2,63%   | 2,97%           | 0,28%             | 0,08%              | 0,02%              |                    |                    | 15058                 |
|                   | $35 \leq v < 40$ | 0,29%                 | 5,29%       | 5,34%   | 4,09%           | 0,30%             | 0,02%              |                    |                    |                    | 21754                 |
|                   | $40 \leq v < 45$ | 0,30%                 | 3,67%       | 4,05%   | 2,73%           | 0,24%             |                    | 0,01%              |                    |                    | 15580                 |
|                   | $45 \leq v < 50$ | 0,25%                 | 1,95%       | 5,50%   | 1,79%           | 0,05%             |                    |                    |                    |                    | 13531                 |
|                   | $50 \leq v < 55$ | 0,18%                 | 0,53%       | 0,78%   | 0,21%           | 0,05%             |                    |                    |                    |                    | 2484                  |
|                   | $55 \leq v < 60$ | 0,09%                 | 0,72%       | 1,51%   | 0,56%           | 0,03%             |                    |                    |                    |                    | 4118                  |
|                   | $60 \leq v < 65$ | 0,05%                 | 0,35%       | 1,20%   | 0,31%           |                   |                    |                    |                    |                    | 2710                  |
|                   | $65 \leq v < 70$ | 0,01%                 | 0,04%       | 0,16%   | 0,01%           |                   |                    |                    |                    |                    | 326                   |
|                   | $70 \leq v < 75$ |                       |             |         |                 |                   |                    |                    |                    |                    | 2                     |
|                   |                  |                       | 3482        | 41777   | 56025           | 36596             | 2997               | 455                | 307                | 37                 | 9                     |
|                   |                  | Número de Observações |             |         |                 |                   |                    |                    |                    |                    |                       |

**Quota (%)**

- $5 < N^{\circ}$  de Observações  $\leq 100$
- $1 < N^{\circ}$  de Observações  $\leq 5$
- $0 < N^{\circ}$  de Observações  $\leq 1$

**Tabela 4. Número de observações de estados operacionais– INTEGRATION**

|                   |             | Aceleração (km/h/s)   |           |       |            |              |               |               |               |   |               |
|-------------------|-------------|-----------------------|-----------|-------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---|---------------|
|                   |             | 5 ≤ a < 10            | 0 < a < 5 | a = 0 | -5 ≤ a < 0 | -10 ≤ a < -5 | -15 ≤ a < -10 | -20 ≤ a < -15 | -25 ≤ a < -20 |   | -30 ≤ a < -25 |
| Velocidade (km/h) | v = 0       |                       |           | 8,30% | 0,40%      |              |               |               |               |   | 14582         |
|                   | 0 < v < 5   |                       | 1,08%     | 0,20% | 2,72%      | 0,11%        |               |               |               |   | 6900          |
|                   | 5 ≤ v < 10  | 0,11%                 | 0,55%     |       | 0,46%      | 0,43%        | 0,09%         |               |               |   | 2771          |
|                   | 10 ≤ v < 15 | 0,38%                 | 0,90%     | 0,01% | 0,48%      | 0,43%        | 0,05%         | 0,01%         |               |   | 3763          |
|                   | 15 ≤ v < 20 | 0,26%                 | 7,05%     | 1,41% | 5,06%      | 0,24%        | 0,07%         |               |               |   | 23633         |
|                   | 20 ≤ v < 25 | 0,28%                 | 12,10%    | 1,78% | 8,13%      | 0,22%        | 0,08%         |               |               |   | 37887         |
|                   | 25 ≤ v < 30 | 0,25%                 | 10,28%    | 3,40% | 6,58%      | 0,22%        | 0,07%         |               |               |   | 34887         |
|                   | 30 ≤ v < 35 | 0,26%                 | 6,74%     | 2,43% | 4,52%      | 0,18%        | 0,07%         | 0,01%         |               |   | 23835         |
|                   | 35 ≤ v < 40 | 0,18%                 | 1,57%     | 1,08% | 3,00%      | 0,16%        | 0,07%         | 0,01%         |               |   | 10179         |
|                   | 40 ≤ v < 45 | 0,06%                 | 0,21%     | 0,18% | 1,05%      | 0,16%        | 0,06%         |               |               |   | 2900          |
|                   | 45 ≤ v < 50 | 0,03%                 | 0,53%     | 0,40% | 0,41%      | 0,16%        | 0,01%         |               |               |   | 2581          |
|                   | 50 ≤ v < 55 | 0,04%                 | 0,13%     | 0,06% | 0,19%      | 0,15%        |               |               |               |   | 957           |
|                   | 55 ≤ v < 60 | 0,03%                 | 0,11%     | 0,08% | 0,30%      | 0,02%        |               |               |               |   | 911           |
|                   | 60 ≤ v < 65 |                       | 0,43%     | 0,27% | 0,46%      |              |               |               |               |   | 1947          |
|                   | 65 ≤ v < 70 |                       |           |       |            |              |               |               |               |   | 4             |
|                   | 70 ≤ v < 75 |                       |           |       |            |              |               |               |               |   | 0             |
|                   |             | 3138                  | 69895     | 32883 | 56626      | 4147         | 970           | 61            | 10            | 4 | 167737        |
|                   |             | Número de Observações |           |       |            |              |               |               |               |   |               |

**Quota (%)**

- 5 < Nº de Observações ≤ 100
- 1 < Nº de Observações ≤ 5
- 0 < Nº de Observações ≤ 1

**Tabela 5. Emissão de CO – DRACULA**

|                   |             | Aceleração (km/h/s) |           |        |            |              |               |               |               |      |               |
|-------------------|-------------|---------------------|-----------|--------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|------|---------------|
|                   |             | 5 ≤ a < 10          | 0 < a < 5 | a = 0  | -5 ≤ a < 0 | -10 ≤ a < -5 | -15 ≤ a < -10 | -20 ≤ a < -15 | -25 ≤ a < -20 |      | -30 ≤ a < -25 |
| Velocidade (km/h) | v = 0       |                     |           | 1,50%  | 0,06%      |              |               |               |               |      | 61,69         |
|                   | 0 < v < 5   |                     | 0,50%     | 0,20%  | 0,37%      | 0,02%        |               |               |               |      | 42,93         |
|                   | 5 ≤ v < 10  | 0,20%               | 0,81%     |        | 0,33%      | 0,02%        |               |               |               |      | 53,62         |
|                   | 10 ≤ v < 15 | 0,21%               | 1,17%     |        | 0,22%      | 0,02%        |               |               |               |      | 63,95         |
|                   | 15 ≤ v < 20 | 0,32%               | 1,80%     | 0,21%  | 0,19%      | 0,03%        |               |               |               |      | 99,77         |
|                   | 20 ≤ v < 25 | 0,82%               | 3,59%     | 0,06%  | 0,19%      | 0,04%        | 0,01%         |               |               |      | 183,72        |
|                   | 25 ≤ v < 30 | 0,88%               | 3,81%     | 1,10%  | 0,50%      | 0,05%        | 0,01%         | 0,01%         |               |      | 248,27        |
|                   | 30 ≤ v < 35 | 1,16%               | 5,92%     | 0,81%  | 0,52%      | 0,04%        | 0,01%         |               |               |      | 330,77        |
|                   | 35 ≤ v < 40 | 1,15%               | 7,43%     | 2,11%  | 0,92%      | 0,04%        |               |               |               |      | 455,43        |
|                   | 40 ≤ v < 45 | 1,38%               | 6,25%     | 1,14%  | 0,48%      | 0,03%        |               |               |               |      | 363,45        |
|                   | 45 ≤ v < 50 | 2,55%               | 4,60%     | 1,88%  | 0,37%      | 0,01%        |               |               |               |      | 367,57        |
|                   | 50 ≤ v < 55 | 9,48%               | 2,41%     | 0,34%  | 0,05%      | 0,01%        |               |               |               |      | 480,12        |
|                   | 55 ≤ v < 60 | 8,50%               | 3,68%     | 0,88%  | 0,22%      |              |               |               |               |      | 518,81        |
|                   | 60 ≤ v < 65 | 5,55%               | 5,35%     | 0,83%  | 0,13%      |              |               |               |               |      | 463,63        |
|                   | 65 ≤ v < 70 | 1,95%               | 2,11%     | 0,14%  |            |              |               |               |               |      | 164,24        |
|                   | 70 ≤ v < 75 | 0,19%               | 0,06%     |        |            |              |               |               |               |      | 9,72          |
|                   |             | 1341,85             | 1934,72   | 437,40 | 178,01     | 12,26        | 1,86          | 1,26          | 0,15          | 0,04 | 3907,70       |
|                   |             | Emissão de Co (g)   |           |        |            |              |               |               |               |      |               |

**Quota (%)**

- 5 < Emissão de CO ≤ 100
- 1 < Emissão de CO ≤ 5
- 0 < Emissão de CO ≤ 1

**Tabela 6. Emissão de CO – INTEGRATION**

|                   |             | Aceleração (km/h/s) |           |         |            |              |               |               |               |      |               |
|-------------------|-------------|---------------------|-----------|---------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|------|---------------|
|                   |             | 5 ≤ a < 10          | 0 < a < 5 | a = 0   | -5 ≤ a < 0 | -10 ≤ a < -5 | -15 ≤ a < -10 | -20 ≤ a < -15 | -25 ≤ a < -20 |      | -30 ≤ a < -25 |
| Velocidade (km/h) | v = 0       |                     |           | 2,28%   | 0,11%      |              |               |               |               |      | 59,65         |
|                   | 0 < v < 5   |                     | 0,71%     | 0,03%   | 0,61%      | 0,03%        |               |               |               |      | 34,55         |
|                   | 5 ≤ v < 10  | 0,43%               | 0,80%     |         | 0,12%      | 0,12%        | 0,03%         |               |               |      | 37,32         |
|                   | 10 ≤ v < 15 | 1,79%               | 1,40%     |         | 0,13%      | 0,12%        | 0,01%         |               |               |      | 86,32         |
|                   | 15 ≤ v < 20 | 1,48%               | 5,86%     | 0,69%   | 1,64%      | 0,07%        | 0,02%         |               |               |      | 244,04        |
|                   | 20 ≤ v < 25 | 2,40%               | 11,68%    | 1,08%   | 3,05%      | 0,06%        | 0,02%         |               |               |      | 457,39        |
|                   | 25 ≤ v < 30 | 2,53%               | 8,08%     | 1,36%   | 1,90%      | 0,06%        | 0,02%         |               |               |      | 348,84        |
|                   | 30 ≤ v < 35 | 6,72%               | 6,01%     | 1,32%   | 1,69%      | 0,05%        | 0,02%         |               |               |      | 395,44        |
|                   | 35 ≤ v < 40 | 3,12%               | 2,28%     | 0,78%   | 1,47%      | 0,04%        | 0,02%         |               |               |      | 192,73        |
|                   | 40 ≤ v < 45 | 2,71%               | 0,42%     | 0,09%   | 0,34%      | 0,05%        | 0,02%         |               |               |      | 90,47         |
|                   | 45 ≤ v < 50 | 1,00%               | 1,09%     | 0,25%   | 0,12%      | 0,05%        |               |               |               |      | 62,48         |
|                   | 50 ≤ v < 55 | 6,06%               | 0,86%     | 0,05%   | 0,05%      | 0,04%        |               |               |               |      | 176,49        |
|                   | 55 ≤ v < 60 | 8,05%               | 0,99%     | 0,09%   | 0,09%      | 0,01%        |               |               |               |      | 230,62        |
|                   | 60 ≤ v < 65 | 0,75%               | 1,92%     | 0,36%   | 0,31%      |              |               |               |               |      | 83,46         |
|                   | 65 ≤ v < 70 |                     |           |         |            |              |               |               |               |      | 0,09          |
|                   | 70 ≤ v < 75 |                     |           |         |            |              |               |               |               |      | 0,00          |
|                   |             |                     | 925,88    | 1052,05 | 209,66     | 291,07       | 16,97         | 3,97          | 0,25          | 0,04 | 0,02          |
|                   |             | Emissão de Co (g)   |           |         |            |              |               |               |               |      |               |

| Quota (%) |                         |
|-----------|-------------------------|
|           | 5 < Emissão de CO ≤ 100 |
|           | 1 < Emissão de CO ≤ 5   |
|           | 0 < Emissão de CO ≤ 1   |

## FIGURAS

**Figura 1. Rede modelada**

