

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE EMISSÃO DE POLUENTES EM SIMULADORES DE TRÁFEGO

Gabriel Bittencourt Jacondino

Helena Beatriz Bettella Cybis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Modelos de emissão têm sido utilizados para determinar as quantidades de emissões do tráfego rodoviário pela grande dificuldade de quantificar estas emissões no mundo real. Diversas metodologias existem para estimar os níveis de poluição do tráfego rodoviário, mas aplicações adequadas dependem do grau de conhecimento dos modelos, dos dados disponíveis e do cenário a ser avaliado. Visando buscar subsídios para uma correta utilização destes modelos, este artigo apresenta uma avaliação e comparação de dois modelos de emissão distintos, associados a modelos de simulação de tráfego, o SATURN, com uma abordagem macroscópica e o simulador microscópico DRACULA. Os modelos foram testados em diversas configurações de rede e demanda. O trabalho analisa a influência de parâmetros como fluxo, regime de tráfego e velocidades nos resultados dos dois modelos.

ABSTRACT

Due to the great difficulty to quantify road traffic emissions in the real world, emission models have been frequently used to estimate the environment impact of the traffic. Different methodologies are available to quantify the levels of road traffic pollution, but proper applications depend on the knowledge of the models, on the available data and the scenario to be evaluated. In order to obtain subsidies for a correct use of these models, this article presents the assessment and comparison of two distinct emission models associate with traffic simulation models, SATURN, a macroscopic approach, and the microscopic simulator DRACULA. These models were tested for different network configurations and demands. This work analyzes the influence of parameters such as flow, traffic regime and speeds in the results of the two models.

1. INTRODUÇÃO

A atividade transporte, principalmente no setor rodoviário, é responsável por grande parte da degradação do meio ambiente em áreas urbanas, onde a maior parte da população reside. Um dos fatores que mais contribuem para este quadro é a produção de poluentes atmosféricos originados da combustão de combustíveis fósseis. No ano de 1998 o setor de transportes foi responsável por 32,6% de todo dióxido de carbono (CO₂) produzido nos Estados Unidos (US Department of Energy, 2000), e na região metropolitana de São Paulo o tráfego rodoviário, no ano de 2000, foi responsável por 98% do monóxido de carbono (CO) produzido (CETESB, 2001).

As emissões veiculares são categorizadas em dois tipos, as emissões de escapamento e as emissões evaporativas. As emissões de escapamento ocorrem quando há o lançamento na atmosfera dos gases provenientes da combustão completa (CO₂) e incompleta (Hidrocarbonetos (HC), CO, Óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado) dos combustíveis fósseis, na medida em que os veículos operam. Este tipo de emissão depende fortemente do modo de operação do veículo, pois veículos operando com motor frio (partida a frio) tendem a emitir muito mais poluentes do que veículos com motores em temperaturas mais altas (partida quente). As emissões evaporativas, constituídas de HC, ocorrem quando há a evaporação de combustível na operação do veículo, nas variações de temperatura, tanto do motor quanto do ambiente e no reabastecimento (Heywood, 1988).

Segundo Faiz (1997) são três, os principais fatores, que afetam a quantidade de poluentes emitidos pelo tráfego rodoviário: (i) as características dos veículos e dos combustíveis utilizados, principalmente o tipo e tecnologia dos motores e a presença de dispositivos de

controle de emissões (catalisadores); (ii) as características da frota utilizada, que consistem na sua diversidade (número e tipos de veículos) e seu perfil de idade; (iii) as características na operação, que se constituem nos padrões de utilização dos veículos (tempo, número de viagens, velocidade e comportamento do condutor) e do grau de congestionamento e controle de tráfego.

Diversas políticas podem ser aplicadas para a redução das emissões de poluentes. A maioria destas propostas está associada a novas tecnologias de veículos e combustíveis. Este tipo de medida, entretanto, apresenta resultados em um longo prazo. Estas políticas são relacionadas com os dois primeiros fatores mencionados no parágrafo anterior (veículos e frota). Em grande parte dos casos, a extensão dos prováveis impactos da aplicação destas políticas é evidente, isto é, possui uma fácil quantificação.

Contudo, medidas relacionadas ao planejamento do tráfego influenciam nas características de operação dos veículos e apresentam um bom resultado em um curto prazo (Ribeiro, 2001). A amplitude dos resultados da aplicação de medidas de planejamento do tráfego e o seu custo/benefício, entretanto, não podem ser avaliadas sem a utilização de modelos quantitativos para a estimativa de poluentes provenientes do tráfego rodoviário, ou simplesmente, modelos de emissão (Hasounah e Miller, 1994).

De uma forma geral, os modelos de emissão realizam a quantificação dos poluentes em duas etapas. A primeira consiste na determinação de um conjunto de fatores de emissão que especifiquem a taxa na qual as emissões são geradas. Já a segunda etapa envolve a estimativa das atividades dos veículos. O inventário de emissões é calculado multiplicando os resultados destas duas etapas.

Os modelos de emissão necessitam, portanto, de dados sobre a atividade e comportamento do tráfego. Geralmente, são utilizados para este fim, ciclos de condução desenvolvidos para representar a operação de um veículo de maneira similar ao mundo real (Joumard *et al.*, 2000). Entretanto, nem sempre estes ciclos conseguem representar o comportamento do tráfego de uma forma apurada (EPA, 1993). Atualmente observa-se a grande utilização de modelos de emissão agregados a modelos de tráfego. De acordo com Algers *et al.* (1997), dentre os 32 micro-simuladores de tráfego avaliados, 54% incorporam modelos de emissão. A utilização de modelos de tráfego para o cálculo das emissões veiculares torna-se interessante, na medida em que eles podem representar as dinâmicas e o comportamento do tráfego urbano de uma forma real em escala temporal e espacial.

Este artigo tem como objetivo analisar e comparar os modelos de emissão de poluentes existentes em dois simuladores de tráfego, o SATURN, um modelo macroscópico de simulação e alocação e o DRACULA, que apresenta uma abordagem microscópica. No que tange a sua avaliação, os modelos de emissão foram testados em uma ampla variedade de cenários, com o objetivo de verificar os fatores que mais influem na quantificação das emissões e a comparação está focada principalmente na diferença de metodologia dos modelos. A validação dos modelos, para acurácia dos resultados, comparados com dados de campo, está além do escopo deste trabalho.

2. MODELOS DE EMISSÃO DE POLUENTES

Existem várias metodologias disponíveis para realizar a quantificação das emissões de poluentes. De acordo com Sturm *et al.* (1997) a definição do tipo de modelo de emissão depende muito da necessidade específica e da exatidão requerida para descrever o comportamento das emissões provenientes do tráfego rodoviário.

Os modelos de emissão de uma maneira geral são utilizados para dois tipos de análise. Eles podem ser utilizados para prever os valores absolutos de poluição (inventários), como, por exemplo, identificar as ruas que excedem os padrões de qualidade do ar. Para este tipo de análise um alto grau de precisão nos fatores de emissão será requerido. Outra finalidade do modelo de emissão é a sua utilização em avaliações de impacto, como a comparação de diferentes estratégias de tráfego. Neste tipo de análise a precisão nos fatores de emissão pode não ser um fator tão importante.

Conforme Faiz (1997) os fatores de emissão utilizados para cada localidade deveriam ser baseados em medições das taxas de emissão realizadas pelos veículos na área de estudo. A obtenção de medições precisas de fatores de emissão, entretanto, é um processo complexo e de custo elevado. Em razão disto, poucos experimentos são realizados, geralmente testam uma pequena quantidade de veículos e sob condições limitadas (em termos das condições de condução dos veículos testados – em laboratório ou em condições reais de tráfego).

Tradicionalmente os modelos de emissão mais utilizados são os baseados na velocidade média, por exemplo, o MOBILE (EPA, 2002). Eles funcionam com base em fatores específicos de emissão para cada tipo e tecnologia de veículo/motor, fator de degradação e uma situação de tráfego médio. Geralmente eles formam a base para o cálculo das emissões de poluentes em escala local, mas também podem ser empregados para inventários regionais ou nacionais.

Os modelos de emissões instantâneos ou *modais* levam em conta o modo de operação do veículo através de detalhados parâmetros tais como, aceleração, velocidade e força utilizada pelo motor. Normalmente, são utilizados para a quantificação dos poluentes em escala local. A estimativa dos poluentes é feita através do emprego de matrizes de poluentes em função da velocidade e aceleração, ou velocidade e força do motor (Lehmuskoski *et al.*, 2000). Existem ainda os modelos baseados em regressões lineares (Rakha *et al.*, 2000) e modelos paramétricos (Barth *et al.*, 1996). Tradicionalmente, são os modelos de emissão associados a modelos de tráfego.

Os modelos agregados (ex: COPERT (Ntziachristos e Sâmaras, 2000)) consistem no terceiro tipo de ferramenta para a estimação de emissão. Eles tomam forma a partir estatísticas de uso dos veículos, como, por exemplo, a milhagem anual, a divisão dos tipos de vias, etc. Eles calculam as emissões médias, incluindo os efeitos das partidas a frio, evaporações, etc e são utilizados para inventários regionais e nacionais de emissões.

3. SATURN

3.1 Visão Geral

O SATURN - Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks – (Hall *et al.*, 1980) é um modelo de alocação e simulação de tráfego desenvolvido para a avaliação de esquemas alternativos de gerenciamento de tráfego em redes locais. Ele foi concebido

originalmente no início da década de 80 e desde então vem sofrendo vários aperfeiçoamentos teóricos e computacionais.

O modelo SATURN é formado por dois módulos que podem funcionar de maneira combinada ou de maneira distinta. O módulo de alocação realiza a escolha de rotas e determina a demanda nos arcos da rede viária. O módulo de simulação de tráfego, que incorpora os mesmos princípios teóricos do TRANSYT (Robertson, 1969), é responsável pela estimação dos tempos de viagem na rede.

3.2 Modelo de Emissão

O modelo de emissão existente no SATURN (Van Vliet e Hall, 1998) quantifica 5 tipos de poluentes. São eles CO, HC, NO_x, material particulado e CO₂. O modelo linear é função de variáveis explicativas de tempo, distância, número de paradas e volume. A equação básica para a quantificação da emissão de um poluente i em um arco por período modelado é:

$$E^i = (a_1^i \times d + a_2^i \times t_c + a_3^i \times t_q + a_4^i \times s_1 + a_5^i \times s_2) \times V \quad (1)$$

onde: E_i : quantidade do poluente i emitido / período modelado;
 d : é a distância do arco (apenas para a estimativa do CO₂);
 t_c : é o tempo médio de viagem em cruzeiro no arco / período modelado;
 t_q : é o tempo gasto em espera em filas nas interseções / período modelado;
 s_1 : é o número de paradas primárias por veículo / período modelado;
 s_2 : é o número de paradas secundárias por veículos / período modelado;
 V : é o fluxo de veículos / período modelado;
 a_1^i, a_2^i, \dots : são os fatores de emissão definidos pelo usuário.

Devido à incapacidade do modelo de simulação existente no SATURN de representar, a progressão de cada veículo ao longo dos arcos de uma forma explícita, ele estima o número de vezes em que os veículos executam paradas primárias e paradas secundárias. Paradas primárias são paradas obrigatórias originadas pelas regras de controle das interseções. Paradas secundárias visam representar o processo de aceleração e desaceleração (o movimento *anda e para*) que ocorrem durante o esgotamento das filas nas interseções saturadas.

A estimativa de paradas primárias e secundárias não é suficiente para representar todos os modos de operação (em cruzeiro, parado, acelerando e desacelerando) dos veículos em qualquer ponto da via. Elas são capazes de contabilizar mudanças nas dinâmicas veiculares apenas em interseções. Isto ocorre porque para cada parada efetuada por um veículo, está associada uma desaceleração e aceleração para a retomada do movimento. Além desta, outras hipóteses são assumidas pelo modelo. Todos os veículos possuem as mesmas taxas de aceleração e desaceleração. Existe apenas uma taxa de emissão para os veículos, independentemente da velocidade, temperatura do motor e tipo de veículo, inclinação do greide e tipo de combustível.

4. DRACULA

4.1 Visão Geral

O DRACULA - Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation – (Liu *et al.*, 1995) é um modelo microscópico de alocação do tráfego urbano. Ele associa um

modelo de demanda, que representa o aprendizado individual, bem como comportamento diário de escolha de rotas e tempo de partida do condutor, com um modelo de micro-simulação de tráfego que representa os movimentos individuais dos veículos através da rede de tráfego.

No modelo de tráfego (Liu, 1994) as velocidades e as posições dos veículos são atualizadas em incrementos fixos de tempo de 1 segundo. O modelo de tráfego é contínuo no espaço, o que significa que o veículo pode ser posicionado em qualquer ponto ao longo dos arcos. Os veículos são individualmente caracterizados, incluindo a sua descrição física (tipo de veículo, comprimento, máxima aceleração e desaceleração) e descrição comportamental do condutor (tempo de reação, velocidade desejada, e distância do veículo precedente). Estas características são aleatoriamente escolhidas a partir de uma distribuição normal dos tipos de veículos, com médias e coeficientes de variação escolhidos pelo usuário. O seu movimento é governado por modelos de car-following, regras de aceitação de brechas e regulamentações do tráfego em interseções.

4.2 Modelo de Emissão

O modelo de poluição no DRACULA (Liu, 1996) é ligado ao seu módulo de simulação de tráfego. Ele obtém detalhadas informações do tráfego, segundo a segundo, incluindo 4 modos de operação: aceleração, desaceleração, em cruzeiro e parado, sendo, desta forma, um modelo modal. Veículos com velocidades menores que 0,5 m/s são considerados parados. Acoplado com taxas desagregadas de emissão, por modo de operação, o modelo de emissão prevê tanto a distribuição espacial como distribuição temporal de poluentes para cada arco ou para toda rede. A Tabela 1 apresenta as taxas de emissão para os três tipos de emissão estimados.

Tabela 1: Taxas de emissão para veículos leves à gasolina operando em condições estabilizadas (partida quente)

Poluente (g/s)	Velocidade (km/h)							Modo de Operação		
	10	20	30	40	50	60	70	Parado	Acelerando	Desacelerando
CO	0,06	0,091	0,13	0,129	0,09	0,11	0,177	0,06	0,377	0,072
NOx	0,0006	0,0006	0,0017	0,0022	0,0042	0,0050	0,0058	0,0008	0,01	0,005
HC	0,0063	0,0078	0,0083	0,0128	0,0097	0,0117	0,0136	0,0067	0,02	0,0067

Fonte: QUARTET (1992)

O modelo assume que os fatores de emissão são constantes para veículos esperando em uma fila (parados), acelerando ou desacelerando. Com isto, o modelo despreza a influência da variação da aceleração na emissão de poluentes. Para veículos trafegando em uma velocidade constante, os fatores de emissão são assumidos em função da velocidade. Uma interpolação linear é utilizada para obter os fatores de emissão a uma velocidade entre duas das listadas na tabela de poluentes (Tabela 1).

O modelo consegue representar 7 diferentes tipos de veículos, mas não é capaz de distinguir o tipo de combustível utilizado, a presença ou não de dispositivos de controle de emissões (catalisadores), idade e conservação dos veículos e o número de viagens realizadas com partidas a frio. Diferenças nas taxas de emissão, decorrentes da variação da potência utilizada pelo motor, são desprezadas no modelo de emissão disponível no DRACULA. Com isso, a diferença na quantidade de poluente emitido em função da inclinação do greide não é contabilizada.

5. AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Com o intuito de avaliar os modelos de emissão, foi realizado um estudo comparativo de resultados dos 2 modelos. Foram testados diversos cenários com a finalidade de estabelecer os parâmetros que influenciam nos seus resultados e a sua importância. A avaliação está dividida em duas partes. Na primeira, os testes foram realizados em arcos com o fluxo ininterrupto com o objetivo de avaliar parâmetros tais como, variação da velocidade e do fluxo. Outras variáveis, como mudança no modo de operação dos veículos e variação da demanda, foram avaliadas em uma rede teste (fluxo interrompido). Devido à diferença nos tipos de poluentes quantificados por cada modelo, as comparações serão feitas apenas para veículos leves movidos à gasolina, operando em condições estabilizadas para os seguintes poluentes CO, HC e NOx.

5.1 Análise Inicial e Ajuste dos Modelos

Como primeiro teste, realizou-se a simulação de uma rede. Esta rede é constituída de 7 arcos unidirecionais e 8 nós (Figura 1). Destes, o nó 20 e o nó 30 representam interseções semaforizadas, com o tempo de ciclo igual a 100 segundos. Todos os arcos possuem velocidade de fluxo livre de 33 km/h e fluxo de saturação igual a 1900 uvp/hora/faixa. A rede apresenta 3 zonas de origem (nós 10, 50 e 80) e 3 zonas de destino (nós 40, 60 e 70) e nela foi alocada uma demanda de 3000 viagens/hora, gerando uma relação volume/capacidade nos arcos não superior a 50%.

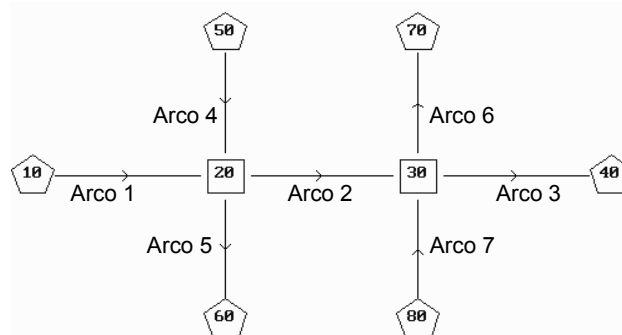


Figura 1: Rede modelada

Os resultados obtidos para as quantidades de poluentes estimados (CO, NOx e HC) a partir dos dois modelos são apresentados nas colunas 2 e 4 da Tabela 2. Ela também apresenta os valores referentes a outras medidas de desempenho da rede, tais como, velocidade média, tempos de viagem e distância viajada.

Conforme observado na Tabela 2, a diferença das estimativas de todos os poluentes entre os modelos foi elevada. O modelo SATURN superestimou as quantidades de NOx e HC em respectivamente 946% e 62% e subestima o CO emitido em 63%. As diferenças percentuais foram obtidas, tendo como base, os resultados do modelo DRACULA. Por outro lado, as diferenças entre as outras medidas de desempenho da rede não foram tão elevadas. O SATURN superestima a velocidade média da rede e os tempos em cruzamento, o modelo DRACULA superestima o tempo total de viagem.

Concluiu-se que para uma correta comparação entre os modelos, deveria ser realizada uma compatibilização entre os parâmetros dos dois modelos. As taxas de poluição *default* no modelo SATURN são provenientes de um estudo realizado em 1982 (Matzoros e Van Vliet, 1992). Os parâmetros utilizados no modelo DRACULA foram obtidos através de um estudo realizado na Comunidade Européia em 1992 (QUARTET, 1992).

Na tentativa de compatibilizar os parâmetros dos dois modelos constatou-se que os dados existentes no modelo DRACULA deveriam ser utilizados no SATURN. São duas as razões para esta escolha. Os fatores de emissão incorporados no DRACULA são mais atuais e provenientes de um estudo mais abrangente, o que implica em um grau de acurácia maior. Além disso, a base de dados do modelo DRACULA é maior que a do modelo SATURN, pois apresenta uma série de taxas de emissão em função da velocidade de operação.

Tabela 2: Diferenças entre as quantificações dos poluentes fornecidas pelos modelos SATURN e DRACULA antes e depois do ajuste

Parâmetro	SATURN (antes)	SATURN (depois)	DRACULA
Tempo em cruzeiro nos arcos (uvpxh)	112,5	112,5	111,33
Tempo de viagem total (uvpxh)	129,8	129,8	143,93
Distância viajada total (uvpxkm)	3605	3605	3642,73
Velocidade média geral (km/h)	27,8	27,8	25,31
CO	43,16	69,73	70,48
NOx	12,66	1,13	1,21
HC	7,94	4,52	4,91

Devido a incompatibilidades de unidades algumas adaptações foram necessárias, neste esforço de uniformizar as taxas de emissão mostradas na Tabela 1, e os coeficientes utilizados pela Equação 1 do modelo SATURN. O ajuste envolveu a redefinição dos coeficientes a_2 , a_3 , a_4 e a_5 da equação 1. Para o ajuste do coeficiente a_2 , referente ao modo de operação *cruzeiro*, algumas simplificações foram realizadas. Enquanto no modelo SATURN a taxa de emissão para o veículo em modo de cruzeiro é fixa, o DRACULA possui um valor para cada incremento de 10 km/h na velocidade. No processo de uniformização dos parâmetros foi necessário, portanto, definir uma velocidade comum de operação, fixada em 30 km/h. Optou-se por escolher a taxa de emissão relativa a velocidade 30 km/h, próxima a velocidade do ciclo de condução FTP75 (31,5 km/h) utilizado na certificação de veículos automotores no Brasil (EPA, 1993; Murgel e Szwarc, 1989). Para o ajuste do coeficiente a_3 , referente à taxa de emissão relativa ao modo de operação *parado*, apenas a conversão de unidades foi efetuada, de g/s para g/h.

Para os coeficientes referentes às paradas primárias (a_4) e paradas secundárias (a_5) uma série de hipóteses foram assumidas baseados em Van Vliet e Hall (1998) e Matzoros e Van Vliet (1992). Uma parada primária envolve uma desaceleração de 50 km/h até o repouso e sua aceleração contrária. O fator de emissão para uma parada primária foi, portanto, assumido como o produto da taxa de emissão de aceleração com o tempo para realizar a aceleração a $1,1\text{m/s}^2$ somado ao produto da taxa de emissão de desaceleração com o tempo para realizar a desaceleração a $2,8\text{m/s}^2$. O fator de emissão para a parada secundária é 5 vezes menor que o

da parada primária. A Tabela 3 mostra os coeficientes utilizados no modelo SATURN, antes e depois da modificação. Após o ajuste do modelo SATURN, a mesma rede teste foi simulada, gerando desta vez pequenas diferenças, na quantificação dos poluentes entre 1% e 8%, tendo como base os resultados do modelo DRACULA, conforme a Tabela 2.

Tabela 3: Coeficientes de poluição utilizados no modelo SATURN antes e após a modificação

Modo de Operação	Coeficiente	Antes			Depois		
		CO	NOx	HC	CO	NOx	HC
Cruzeiro	a_2 (g/h)	304,8	102,6	57,0	468	6,12	29,88
Parado	a_3 (g/h)	180	1,8	30	216	2,88	24,12
Parada Primária	a_4 (g/parada)	2,22	0,42	0,39	5,1172	0,1511	0,2858
Parada Secundária	a_5 (g/parada)	0,444	0,084	0,078	1,0234	0,0302	0,0572

5.2 Teste com Fluxos Contínuos

5.2.1 Teste da variação da velocidade de cruzeiro em um arco

Este teste verificou como os dois modelos representam as variações nas quantidades poluentes emitidos, decorrentes da variação da velocidade, em uma série de cenários com a velocidade constante. Estes cenários representam condições onde o fluxo é contínuo, sem paradas e não envolvendo aceleração ou desaceleração por parte dos veículos. Para este teste foi utilizado o modelo SATURN, com os seus parâmetros modificados, equivalentes ao modelo DRACULA.

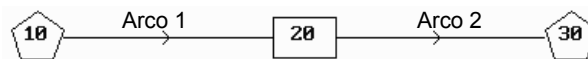


Figura 2: Rede modelada para testes com fluxo ininterrupto

A rede utilizada para este teste é constituída de 2 arcos com 500 metros de extensão cada (Figura 2), representando um segmento contínuo de 1 km. Dentro deste cenário de velocidade constante, apenas um veículo foi simulado em cada modelo, percorrendo a rede do nó 10 ao nó 30. As velocidades variaram de 10 km/h a 70 km/h com incrementos de 10 km/h. As Figuras 4 e 5 ilustram as quantidades dos poluentes emitidos por cada modelo em g/km.

Em geral o modelo SATURN superestima as quantidades de emissões de todos os poluentes para velocidades baixas (inferiores a 30 km/h) e subestima para velocidades maiores, conforme Figuras 3 e 4. Exceção a este comportamento foi verificada na emissão de CO para velocidades entre 50 km/h e 60 km/h. É possível que este fato esteja mais relacionado a erro nas taxas de emissão do que a diferença nos modelos. Enquanto em outros modelos de emissão (Yu, 1997), observam-se taxas de emissão crescentes em função da velocidade, as taxas do modelo DRACULA não apresentam este comportamento.

Outra diferença está na tendência da curva para a quantidade de emissão de NOx/km. No modelo SATURN decresce de acordo com a velocidade, ao passo que no modelo DRACULA o comportamento se inverte. Existe um acréscimo na quantidade de NOx na medida em que a velocidade aumenta. Neste caso o modelo DRACULA quantifica as emissões de NOx de uma forma mais realística, pois está de acordo com outros modelos de emissão de poluentes.

Há dois fatores que necessitam ser considerados nesta análise. No modelo SATURN a variação da quantidade de poluente por quilometro de acordo com a velocidade ocorre apenas em função do tempo em que o veículo opera, isto é, para velocidades maiores o tempo de operação será menor, conseqüentemente, menor quantidade de poluente. No modelo DRACULA esta mesma variação, além de ser função do tempo de operação, é função, também, da taxa de emissão existente para cada velocidade. O que significa que a quantificação das emissões será função do tempo de operação do veículo combinado com uma taxa de emissão que cresce com a velocidade.

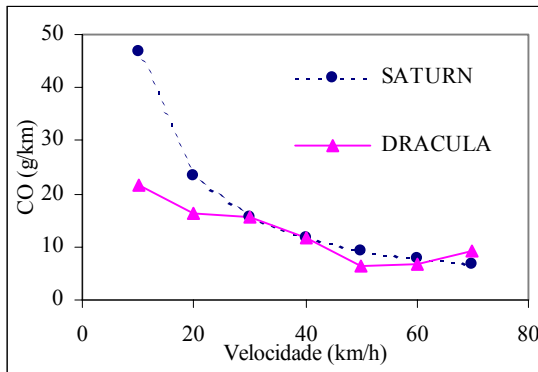


Figura 3: Variação da quantidade de CO emitido de acordo com a velocidade – 1 veículo

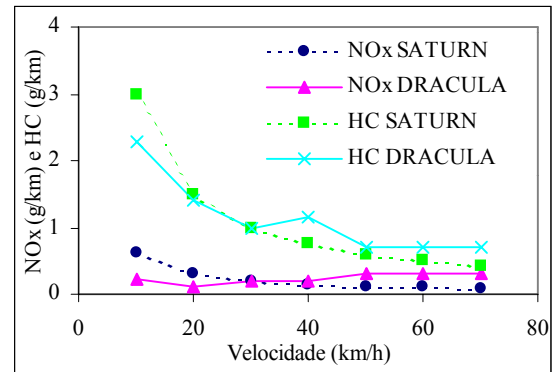


Figura 4: Variação da quantidade de NOx e HC emitido de acordo com a velocidade - 1 veículo

5.2.2 Teste da variação do fluxo nos arcos

Uma das principais variáveis que afetam a emissão de poluentes em um segmento de rodovia é o volume de tráfego. Para a avaliação deste parâmetro a rede da Figura 1 foi utilizada, sendo nesta alocado um fluxo variando de 500 unidades de veículo padrão (uvp) a 2500 uvp, com incrementos de 500 uvp. A velocidade de fluxo livre utilizada foi de 30 km/h e a capacidade do segmento definida para o modelo SATURN de 1900 uvp/h. Como no item anterior, foram utilizados no modelo SATURN os parâmetros de poluição modificados.

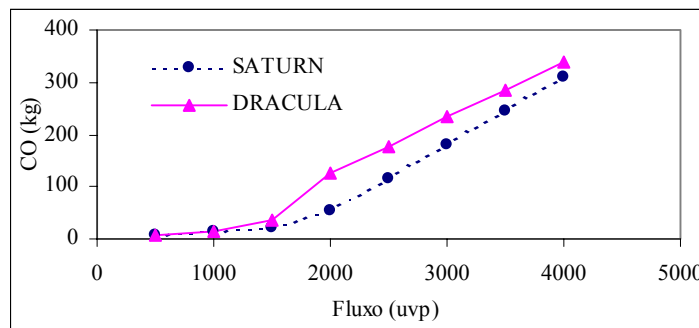


Figura 5: Efeitos da variação do fluxo na quantidade de CO emitido

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para a emissão de CO. Os resultados para a emissão de NOx e HC apresentaram a mesma tendência. Tanto o modelo DRACULA, quanto o modelo SATURN, apresentam a mesma tendência na variação de CO emitido em relação à

variação do fluxo. Em ambos, na medida em que o fluxo aumenta, a quantidade de CO emitido também aumenta, obedecendo a uma relação linear até que a capacidade seja atingida. Para fluxos maiores que a capacidade, a quantidade de CO emitido cresce em uma relação maior do que o fluxo.

5.3 Teste na Rede

O objetivo desta análise foi verificar as diferenças entre as quantidades de poluentes fornecidas pelos modelos SATURN e DRACULA para variações da demanda em uma rede. O interessante deste teste é a existência de semáforos na rede, o que implica em situações com fluxo interrompido, e a ocorrência de paradas por parte dos veículos. Para a realização deste teste, foi utilizada a rede descrita no item 5.1. A demanda alocada nesta rede variou de 1500 uvp/h até 6000 uvp/h com incrementos de 1500 uvp/h. O fenômeno da realocação do tráfego em função do aumento de fluxo de tráfego é desprezado nesta rede, uma vez que, existe apenas uma rota disponível para cada par origem/destino. Como no item anterior, apenas foi realizada a análise do poluente CO (Figura 6).

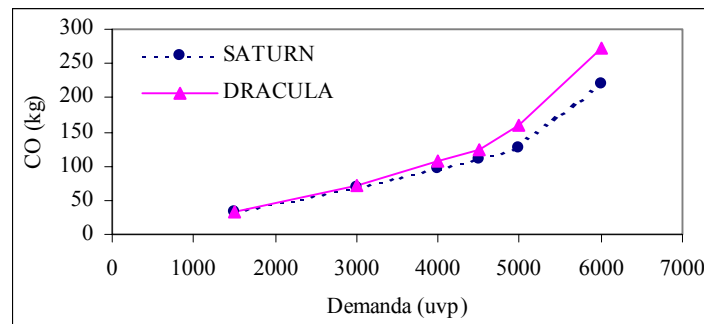


Figura 6: Efeitos da variação da demanda na quantidade de CO emitido

Para demandas situadas entre 1500 uvp/h e 4000 uvp/h os modelos DRACULA e SATURN não apresentam muitas diferenças entre seus resultados. Nestes casos, nenhum arco na rede apresenta fluxo superior a sua capacidade. Para demandas alocadas na rede superiores a 4000 uvp/h o modelo DRACULA superestima a quantidade de CO emitido em relação ao modelo SATURN. Nestas situações a rede já apresenta arcos com fluxos superiores a sua capacidade, principalmente nos arcos situados a montante de interseções (arcos 1, 4 e 7).

A diferença entre os resultados dos modelos ocorre basicamente pela existência de fluxo além da capacidade nos arcos, fenômeno estudado no item anterior. Possíveis variações nas estimativas de poluentes entre os dois modelos decorrentes da representação do modo de operação em fluxo interrompidos (paradas) não resultam em uma discrepância muito grande entre os seus resultados. Isto ocorre, provavelmente, porque grande parte das acelerações e desacelerações acontece em interseções, eventos modelados pelos dois modelos. O acréscimo nas emissões, função de acelerações que ocorrem ao longo dos arcos, modelado apenas pelo modelo DRACULA, tornou-se desprezível neste cenário avaliado de fluxo interrompido.

6. CONCLUSÃO

O presente artigo avaliou e comparou dois modelos de emissão de poluentes associados a simuladores de tráfego com abordagens distintas, o SATURN, um modelo macroscópico e o

modelo microscópico DRACULA. As estimativas de poluentes obtidas com a utilização das taxas de emissão *default* dos modelos foram bastante diferentes. As taxas originais incorporadas nos dois modelos proviam de bases de dados distintas e o primeiro passo do trabalho foi a compatibilização dos parâmetros de ambos, com o objetivo de melhor interpretar os seus resultados.

Foram analisadas várias configurações de rede e demandas, correspondentes a diferentes volumes de tráfego e regimes de fluxo. A diferença fundamental entre os dois modelos é representação espacial dos modos de operação dos veículos (aceleração, desaceleração, parado e em cruzeiro). O SATURN representa este fenômeno, de uma forma simplificada, e apenas em interseções, enquanto o DRACULA, em função de sua natureza microscópica, é capaz de modelar os modos de operação dos veículos em qualquer parte da rede. Mesmo com a diferença de metodologia empregada em seus modelos de emissão, não foram observadas grandes variações na quantificação de poluentes, quando o fluxo de tráfego esteve abaixo da capacidade da via.

Conclui-se, portanto, que dentre todas as variáveis que influenciam na quantificação das emissões veiculares, o fluxo é o fator mais importante. Em ambos os modelos os níveis de emissões aumentam linearmente com o fluxo, mas apresentam grande crescimento no momento em que o fluxo supera a capacidade.

No modelo SATURN as emissões veiculares nos arcos são função do tempo de percurso, não ocorrendo à variação dos níveis de emissão de acordo com a velocidade. Como consequência, o SATURN tende a superestimar, comparado ao modelo DRACULA, as quantidades de poluentes para velocidades baixas (menores que 30 km/h). Além disto, o modelo SATURN estima de forma inadequada as emissões de NOx. É necessário, portanto, cuidado muito grande na utilização do SATURN, para a quantificação de poluentes em redes congestionadas, que apresentem velocidades muito baixas e emissões de NOx.

A utilização de modelos de simulação para avaliar os níveis da atividade de tráfego, tem se tornado cada vez mais corriqueiro. Existem diversas metodologias para a quantificação das emissões veiculares bem como para a simulação de tráfego. A escolha do tipo de modelo vai depender do grau de precisão necessário para o problema e da quantidade de dados disponíveis para a sua solução.

Sem um estudo criterioso, a avaliação de um mesmo cenário pode resultar em estimativas de emissões veiculares muito diferentes a partir da utilização de modelos distintos. O uso de fatores de emissão atuais e realísticos é fator importante para a correta quantificação dos poluentes através dos modelos de emissão. No Brasil, atualmente, inexistem estudos para a produção de fatores de emissão próprios para a aplicação em modelos de emissão. Por isso, o emprego de modelos de emissão mais complexos, para cenários brasileiros, ainda depende da adaptação de fatores de emissão desenvolvidos no exterior. Neste contexto, o desenvolvimento de projetos que visem a definição de fatores de emissão condizentes com a realidade nacional é fundamental para a elaboração de inventários consistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Algers, S., E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox and J.F. Gabard (1997) Review of Micro-Simulation Models. *Report of the SMARTTEST Project - Deliverable 3*

- Barth, M.; F. An; J. Norbeck e M. Ross (1996) Modal Emissions Modeling: A Physical Approach. *Transportation Research Record*, 1520: 81-88
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001) *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2000*. CETESB. São Paulo
- Faiz, A.; C.S. Weaver e M.P. Walsh (1997) *Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions*. The World Bank, Washington, D.C, EUA.
- Hall, M. D.; D. Van Vliet e L.G. Willumsen (1980) SATURN – A Simulation Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes. *Traffic Engineering and Control*, 21(4): 168-176
- Hasounah, M. e E.J. Miller (1994) Modelling Air Pollution from Road Traffic: a Review. *Traffic Engineering and Control*, 35(9): 510 – 514
- Heywood, J.B. (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, EUA
- Joumard, R.; M. André; R. Vidon; P. Tassel e C. Pruvost (2000) Influence of Driving Cycles on Unit Emission from Passenger Cars. *Atmospheric Environment*, 34: 4621 – 4628
- Lehmuskoski, V.; J. Niittymäki e B. Silfverberg (2000) Microscopic Simulation on High-class Roads: Enhancement of Environmental Analyses and Driving Dynamics, Practical Applications. *Transportation Research Record*, 1706: 73 – 81
- Liu, R. (1994) DRACULA Microscopic Traffic Simulator. *ITS Working Paper* 431. Institute for Transportation Studies, University of Leeds
- Liu, R. (1996) Pollution Model in DRACULA. *ITS Technical Note Draft*. Institute for Transportation Studies, University of Leeds
- Matzoros A. and D. Van Vliet (1992) A Model of Air Pollution from Road Traffic, Based on the Characteristics of Interrupted Flow and Junction Control Part I & II, *Transportation Research Part A*, 26 (4): 315 – 355
- Murgel, Eduardo M e Alfred Szwarc (1989) Condições de Tráfego e a Emissão de Poluentes. *Ambiente: Revista CETESB de Tecnologia*, 03 (1): 059 – 064
- Ntziachristos L e Z. Samaras (2000) *COPERT III – Computer Program to Calculate Emissions From Road Transport – Methodology and Emission Factors*. European Environment Agency Technical Report 49
- QUARTET (1992) Assessment of Current Tools for Environmental Assessment. *Deliverable No. 2, DRIVE II Project V2018*
- Rakha, H.; M. Van Aerde; K. Ahn e A.A. Trani (2000) Requirements for Evaluating Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements. *Transportation Research Record*, 1706: 73 – 81
- Ribeiro, S.K. (2001) *Transporte Sustentável: Alternativas para Ônibus Urbanos*. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro
- Robertson (1969) TRANSYT – A Traffic Network Study Tool. Laboratory Report. 253. TRRL – Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Sturm P. J.; R. Almbauer, C. Sudy e K. Pucher (1997) Application of Computational Methods for the Determination of Traffic Emissions. *Journal of Air & Waste Management Association*, 47: 1204 - 1210
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1993) *Federal Test Procedure Review Project: Preliminary Technical Report*. EPA 420-R-93-007
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2002) *User's Guide to MOBILE 6.0 – Mobile Source Emission Factor Model*. EPA 420-R-02-001
- U.S. Department of Energy (2000) *Transportation Energy Data Book: Edition 20*
- Van Vliet, D. e M. Hall (1998) *SATURN Version 9,4: User's Manual*. Institute for Transport Studies. University of Leeds. England.
- Yu, L. (1998) Remote Vehicle Exhaust Emission Sensing for Traffic Simulation and Optimization Models. *Transportation Research Part D*, 3(5): 337 – 347