SIMULAÇÃO NA ESCALA MICROSCÓPICA PARA VISUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO VEICULAR

Sandro Rodrigues
PPGMNE - UFPR*
sandrorodrigues23@gmail.com

Liliana Madalena Gramani
Departamento de Matemática, UFPR*
l.gramani@gmail.com, gramani@ufpr.br

Eloy Kaviski
Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR*
eloy.dhs@ufpr.br

Fábio André Negri Balbo
PPGMNE - UFPR*
andrebalbo@gmail.com

*Centro Politécnico, Jardim das Américas, CEP 81531-990 - Curitiba - Paraná.

RESUMO

Este artigo aborda a criação de um simulador de tráfego na escala microscópica desenvolvido para representar um trecho de pista simples dotado de um semáforo e sem condições de ultrapassagem. O artigo inicia com uma breve revisão dos modelos de tráfego, com um maior enfoque para os modelos microscópicos. Como resultado obteve-se uma ferramenta capaz de representar e visualizar o tráfego de veículos de uma parte de uma rodovia, assim como determinar seu fluxo, densidade e velocidade, que foram comparados com resultados experimentais, onde uma boa aproximação foi alcançada.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação. Modelos de tráfego. Escala microscópica.
SIM - Simulação.

ABSTRACT

This article discusses the creation of a traffic simulator on a microscopic scale, developed to represent a single stretch of track equipped with a traffic light and unable to overtake. The article begins with a brief review of traffic models with a greater focus on the microscopic models. As a result we obtained a tool capable of representing and visualizing the traffic for a portion of the highway, as well as determine its flow, density and speed, which were compared with experimental results, where a good approximation was achieved.

KEY-WORDS: Simulation. Traffic models. Microscopic scale.
SIM - Simulation.

1 Introdução

No decorrer dos últimos anos pode se notar um significativo aumento no tráfego veicular nas rodovias, fazendo com isso, que se tenham vários estudos para o dimensionamento adequado da malha de trânsito, os quais são fundamentais para se garantir uma boa fluidez e coerência nas rodovias. Sendo assim a simulação computacional desempenha um papel importante, pois permite avaliar diferentes possibilidades para o gerenciamento e controle de tráfego. Atualmente, tem-se verificado um enorme crescimento da utilização de modelos de simulação microscópica de tráfego, pois constituem uma importante ferramenta de apoio no campo da engenharia de tráfego. Entre esses simuladores microscópicos, os quais também são utilizados para a modelagem de veículos comercias em vias rurais sobre diferentes características geométricas, pode-se citar: AUTOBAHM, NETSIM, TRANSIMS e INTEGRATION (Algers, 1998). Trabalhos aplicados em vias no Brasil são poucos, podendo destacar o trabalho de Lima (2007), que propôs um modelo microscópico baseado em autômatos celulares para simular o comportamento do tráfego de veículos em uma auto-estrada, onde foi criado um esquema multi-célula possibilitando a consideração tanto de diferentes incrementos da aceleração quanto diferentes tipos de veículos e um procedimento de mudança de faixa também é utilizado. Pecker (2001) apresenta o modelo microscópico STIRO (Simulador de Tráfego Ininterrupto Rodoviário), para avaliar o efeito de caminhões em rampas e faixas adicionais. Pode-se citar também Santos (2008) que propôs uma generalização de um modelo microscópico computacional existente, o Intelligent Driver Model (IDM), aplicando uma distribuição de velocidades desejadas, onde torna-se possível medir de forma bastante realista a capacidade veicular de rodovias com múltiplas faixas, em função de parâmetros de modelo, que podem ser ajustados às observações reais.

Entre as inúmeras vantagens do uso da simulação destaca-se a possibilidade de análise de vários cenários o que é muito difícil de ser realizado em condições reais. Esta vantagem permite aos técnicos a análise num ambiente controlado de um conjunto de configurações geométricas e de diversos níveis de tráfego, permitindo-lhes escolher as melhores soluções para cada caso concreto (Ferreira, 2010).

Nesse trabalho é apresentado o resultado da etapa inicial de um projeto que considera o desenvolvimento de um modelo microscópico voltado para a operação de uma rotatória dotada com mais de uma faixa de tráfego e semáforos. Esta rotatória, em particular, se localiza no trevo Cataratas (Cascavel, $24^0 57' 52'' S \;\; 53^0 24' 29'' W$) na rodovia BR-277, km 584, no estado do Paraná, Brasil. A importância deste estudo decorre do fato de esta rotatória interligar as cidades de Foz do Iguaçu, Curitiba, Toledo e Corbélia, apresentando um fluxo de tráfego intenso. Para essa etapa preliminar representa-se um trecho da rodovia BR-277 que passa por essa rotatória com uma faixa de tráfego, um semáforo e com veículos trafegando sem possibilidade de ultrapassagens. O código do modelo foi escrito em Microsoft® Visual Basic® que permite a criação de simulações animadas dentro do ambiente Windows.

A estrutura do trabalho está dividida em mais três partes envolvendo a teoria do fluxo de tráfego, a qual apresenta uma breve descrição dos modelos microscópicos, macroscópicos e mesoscópicos e logo em seguida uma melhor abordagem para os modelos microscópicos.

Na seção 2 será discutida a teoria do fluxo de tráfego ressaltando as escalas de observação e os modelos microscópicos *car following, collision avoidance* e de Gipps. Também apresenta-se o diagrama da velocidade resultante dos dados experimentais coletados em uma rodovia Italiana. Outro diagrama apresentado é o fundamental contendo a curva teórica experimental, representando as duas fases do fluxo de tráfego.

Na seção 3 discute-se os resultados obtidos com a simulação, comparando os dados com outros trabalhos.

2 Teoria do Fluxo de Tráfego

As teorias de fluxo de tráfego buscam descrever de maneira matemática as interações entre os veículos, vias e componentes de infra-instrutura, como semáforos, sinalizações, entre outros. O estudo da teoria do fluxo de tráfego teve inicio na década de trinta, na tentativa de relacionar as grandezas de fluxo, densidade e velocidade, pelo cientista Bruce Greenshields, (Lima, 2007).

2.1 Modelos de Tráfego

O fenômeno do fluxo de tráfego, como todos os sistemas reais no mundo, pode ser observado e representado por diferentes escalas, entre elas: microscópica, macroscópica, e mesoscópica. Cada uma destas escalas apresenta uma estrutura matemática própria, brevemente apresentadas a seguir:

- Escala Microscópica

  Para a modelagem microscópica todos os veículos são identificados individualmente. Neste caso a posição e a velocidade de cada veículo definem o estado do sistema como variáveis dependentes do tempo. Os modelos matemáticos referentes a esta escala, são representados pelas equações da mecânica newtoniana, ou seja equações diferenciais da dinâmica que descrevem sua evolução geralmente por sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDO). A solução do sistema de EDO providencia a descrição das condições de fluxo na estrada.

- Escala Macroscópica

  A modelagem macroscópica descarta a escala microscópica do tráfego em termos das velocidades individuais dos veículos ou as componentes individuais do sistema (tais como as ligações ou os cruzamentos), adotando uma visão macroscópica do tráfego em uma rede. Nesta escala o estado do sistema é descrito por quantidades médias localmente calculadas, nominalmente a densidade, o momento linear e a energia cinética dos veículos, consideradas como variáveis dependentes do tempo e do espaço. Os modelos matemáticos referentes a esta escala são baseados na teoria hidrodinâmica de fluidos e assumem um fluxo contínuo de veículos. As equações de conservação e modelos fenomenológicos são utilizadas, descrevendo a evolução das variáveis, densidade, momento linear e energia, por sistemas de equações diferenciais parciais. Os modelos são limitados geralmente às primeiras duas quantidades, a equação de evolução da densidade de veículos e velocidade como variáveis observáveis do fluxo de veículos, considerando a grande dificuldade em se modelar a energia por uma descrição macroscópica.

- Escala Mesoscópica

  Na modelagem mesoscópica o estado do sistema é ainda identificado pela posição e pela velocidade dos veículos, entretanto esta identificação não refere-se a cada veículo, mas a uma distribuição apropriada de probabilidade sobre o estado microscópico considerado como uma variável aleatória. Os modelos matemáticos referentes a esta escala descrevem

a evolução da função de distribuição por equações íntegro-diferenciais com a estrutura similar à equação de Boltzmann (Gramani, 2010). Os modelos matemáticos aplicados na teoria cinética foram desenvolvidos, a partir dos livros pioneiros de Prigogine e Herman (1971), para o modelo de fluxo de tráfego veicular sobre estradas e redes de estradas.

2.1.1 Modelos Microscópicos

Os elementos da escala microscópica são:

- $x(t)$ é a posição do veículo em função do tempo;
- $v(t) = \dfrac{dx}{dt}$ é a velocidade do veículo em função do tempo;
- $a(t) = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$ é a aceleração do veículo em função do tempo.

Para condições iniciais referentes ao tempo, a posição e a velocidade, denotadas respectivamente por t_0, x_0 e v_0, tem-se para o veículo a equação:

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^{t} v_0 dt + \int_{t_0}^{t}\int_{t_0}^{t} a(t) dt dt. \tag{1}$$

Considerando n veículos na estrada tem-se que a aceleração do i-ésimo veículo é equivalente a:

$$a_i(t) = \frac{dv_i}{dt} = \frac{d^2x_i}{dt^2} \quad \text{com} \quad i = 1, \ldots, n. \tag{2}$$

A solução do sistema de equações diferenciais ordinárias fornece a descrição do escoamento do sistema.

Dentre os modelos de simulação microscópica desta-se o modelo *car following*, o modelo *collision avoidance* e o modelo de Gipps, os quais são descritos a seguir:

- **Modelo *car following***

Um dos modelos de simulação microscópico mais estudado é o modelo de perseguição *car following*, tendo sido seu primeiro modelo proposto pelo físico Pipes (Rothery, 1998), buscando traduzir a variação da velocidade de um veículo, chamado seguidor, como resposta ao estímulo representado pela diferença de velocidade entre ele e o veículo que se desloca à sua frente, chamado veículo líder.

Segundo Rothery (1998) de forma geral os modelos *car following* se baseiam na seguinte relação:

$$[\text{Resposta}]_n \quad \times \quad [\text{Estimulos}]_n \tag{3}$$

para o n-ésimo veículo $n = 1, 2, \ldots$.

As equações dos modelos de perseguição levam em consideração a velocidade do n-ésimo veículo analisado v_n, a diferença de velocidade entre ele e o veículo líder Δv_n e a distância entre estes veículos d_n, dentre outras. Com isso tem-se (2) representada por:

$$\frac{d^2x_n}{dt^2} = f(v_n(t), d_n(t), \Delta v_n(t)). \tag{4}$$

A função f é chamada de função estímulo e assume diferentes interpretações para cada modelo *car following*. O modelo mais simples é o seguindo o líder *follow-the-leader* (Prado, 2010) que faz uso somente da diferença entre as velocidades entre o veículo perseguidor e o veículo líder, sendo representado pela seguinte equação:

$$\frac{d^2x_n}{dt^2} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{dx_{n+1}}{dt} - \frac{dx_n}{dt}\right), \tag{5}$$

onde τ é o parâmetro de configuração da escala de tempo. Pode-se interpretar $\frac{1}{\tau}$ como sendo a sensibilidade do veículo à variações de velocidade do veículo líder.

• **Modelo *collision avoidance***

O modelo *collision avoidance* difere-se da abordagem clássica devido ao fato de que a ênfase deixa de ser na reação do perseguidor ao comportamento do líder. No modelo de *collision avoidance* a ênfase está na restrição, sendo que o perseguidor deve manter uma distância de segurança em relação ao líder.

A aplicação desta abordagem mais conhecida é a do modelo de simulação de tráfego CARSIM (Benekohal, 1988), desenvolvido para estudar o comportamento dos veículos numa via de tráfego expresso congestionada. O fenômeno predominante neste caso não é caracterizado pela fluidez, mais pelo regime intermitente chamado "anda-pára".

Vários modelos posteriormente desenvolvidos usaram uma mesma abordagem, sendo também usado para o tráfego em redes com semáforos, levando em conta que o fenômeno da intermitência tem essencialmente as mesmas características nos dois casos.

• **Modelo de Gipps**

O modelo de Gipps Pecker (2001) foi desenvolvido com uma formulação multi-regime para a lei de sequência, que combina aspectos das duas abordagens anteriores. As equações do modelo de Gipps (1981) para a velocidade do perseguidor v_n são:

$$v_n(t+\tau) = v_n(t) + 2,5a_n\tau\left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right)\sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}} \tag{6}$$

e

$$v_n(t+\tau) = b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 + b_n\{2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b}\}} \tag{7}$$

onde:

- τ é o tempo de reação, assumido como constante para todos os veículos,
- a_n é a aceleração máxima que o motorista do n-ésimo veículo deseja usar,
- V_n é a velocidade com que o motorista do n-ésimo veículo deseja se deslocar,
- b_n é a taxa máxima de frenagem que o motorista do n-ésimo veículo deseja usar,
- $x_n(t)$ é a posição do n-ésimo veículo no instante t,
- s_n é o comprimento efetivo do n-ésimo veículo (incluindo o afastamento guardado pelo seu perseguidor quando ambos estão parados) e

- b é uma estimativa da frenagem mais intensa do veículo; esta estimativa é necessária porque em condições reais de tráfego o motorista do veículo n não consegue estimar b_{n-1} por observação direta.

2.2 Diagramas e Resultados Experimentais

Nesta seção, é apresentado um breve estudo das características mais importantes do tráfego na escala macroscópica, comparando os modelos matemáticos com os resultados experimentais e empíricos, utilizando, por exemplo o modelo de Bonzani *et al* (2005).

De acordo com a teoria clássica, o diagrama fundamental consiste de duas curvas distintas, uma com inclinação positiva iniciando na origem (quando a densidade é zero, o fluxo também é zero) para o fluxo livre, e outra com uma inclinação negativa a partir da densidade crítica (quando a densidade é máxima, o fluxo é zero) para o fluxo congestionado. No entanto, em condições de congestionamento, dados empíricos mostram que é impossível identificar uma curva de representação entre o fluxo e a densidade de veículos.

A figura 1 mostra este fenômeno de transição do fluxo livre para o fluxo congestionado, ou seja, a representação teórica (gráfico a esquerda) e empírica (gráfico a direita) do diagrama fundamental.

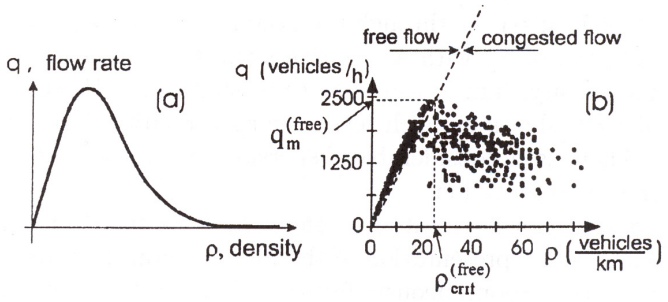

Figura 1: Diagrama fundamental teórico (a) e empírico (b) representado por Kerner (2004)

Experiências recentes de Kerner (2004) em auto-estradas da Alemanha, comprovam a figura 1(a) mostrando que:

(a) o fluxo dos veículos para valores baixos da densidade local se mantém linear enquanto o valor da densidade crítica não é atingida, ou seja, $\rho < \rho_{crit}$;

(b) o fluxo de veículos atinge o seu máximo quando a densidade local é igual a densidade critica, $\rho = \rho_{crit}$;

(c) o fluxo de veículos decai com o aumento da densidade local para $\rho \geq \rho_{crit}$ atingindo o seu valor mínimo quando a densidade é máxima.

É importante ressaltar, que a modelagem das condições de fluxo estável através de uma fórmula analítica deveria relacionar apenas um único parâmetro para cada fenômeno específico. Então, o mesmo evento poderá ser descrito por diferentes pares de parâmetros.

Entretanto, Bonzani *et al* (2005) propuseram um modelo fenomenológico que descreve a relação velocidade-densidade nas condições de fluxo uniforme estável caracterizada por um único parâmetro livre. Este modelo tem como base as medições experimentais na auto-estrada

Veneza-Mestre (Itália) em condições de fluxo estacionário uniforme, o qual pode ser visualizado na figura 2.

Considerando a densidade $\rho \in [0,1]$ e a velocidade $v \in [0,1]$, várias medidas indicam o seguinte intervalo para a densidade crítica:

$$\rho_{crit} \in [0;\, 0,15]\,.$$

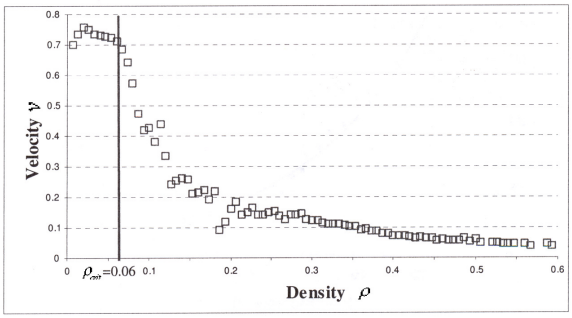

Figura 2: Medidas experimentais da velocidade média como função da densidade representada por Bonzani *et al* (2005)

Como foi mencionado anteriormente, Bonzani *et al* (2005) assumiram um modelo analítico no qual a velocidade para $\rho \leq \rho_{crit}$ permanece praticamente constante e decai para $\rho > \rho_{crit}$, tendendo ao valor $v = 0$ para $\rho = 1$ nas condições de fluxo uniforme estável. Assim, a relação exponencial considerada entre a velocidade e a densidade é:

$$v(\rho) = \exp\left[-\alpha\left(\frac{\rho}{1-\rho}\right)\right], \tag{8}$$

onde o parâmetro positivo α representa as condições específicas da estrada. Comparações com os resultados experimentais sugerem a seguinte escala deste parâmetro:

$$\alpha \in [1;\, 2,5]\,.$$

A figura 3 ilustra que este modelo fenomenológico oferece uma aproximação razoável para $\rho \leq 0,5$, quando comparado com resultados experimentais.

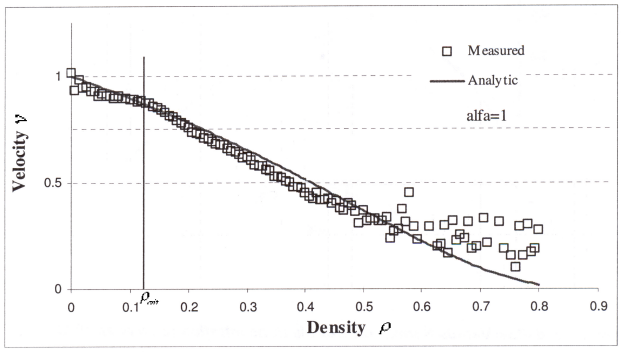

Figura 3: Representação do modelo fenomenológico e resultados experimentais de acordo com Bonzani *et al* (2005)

A relação (8) é um modelo bastante simples, caracterizado por um único parâmetro α que representa as condições ambientais, porém, capaz de captar os fenômenos descritos por Kerner em (a), (b) e (c).

3 Materiais e Métodos

3.1 Descrição do modelo preliminar

O modelo preliminar representa uma faixa de tráfego simples em um único sentido, sem ultrapassagem, sem rampas laterais de acesso ou saída e contendo um semáforo. O trecho de simulação tem extensão de 600 m, sendo a entrada de veículos gerada de forma aleatória, , onde 60% são veículos leves (carros), 35% veículos pesados (caminhões e ónibus) e 5% por veículos muito leves (motos).

O código do modelo foi escrito em Microsoft® Visual Basic® que permite a criação de simulações animadas dentro do ambiente *Windows*. A seguir, nas figuras 4 e 5 apresenta-se a interface do simulador.

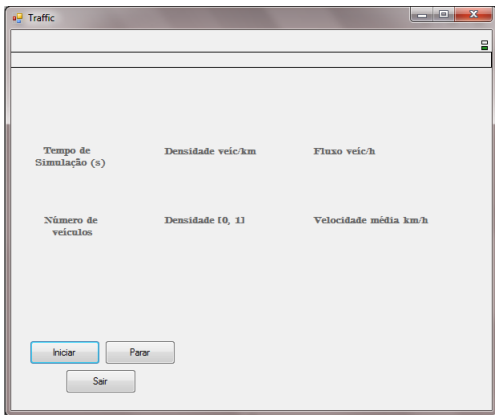

Figura 4: Interface do simulador de tráfego sem iniciar a simulação.

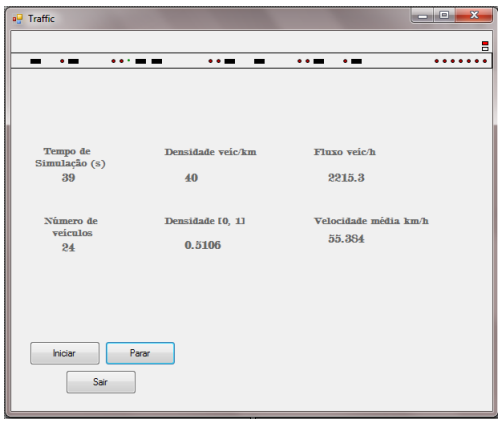

Figura 5: Interface do simulador de tráfego iniciada a simulação.

A cada incremento de tempo, na atualização da posição da cada veículo na rodovia, é utilizado o valor da velocidade e da posição verificando se a restrição do modelo *collision avoidance* é atendida. A simulação inicia sem veículos na rodovia como pode ser observado na figura 4. A interação dos veículos será descrita a seguir.

3.2 Interação microscópica - Tabela de jogos

Na literatura encontra-se vários modelos para definir uma regra de interação microscópica. Para esse modelo preliminar a regra de interação foi fixada por uma tabela de jogos. São consideradas duas situações para compor a tabela de jogos, onde as interações são apenas entre pares de veículos e em sua regra de interação o veículo perseguidor com velocidade v_s interage com o veículo líder com velocidade v_l. As regras são descritas a seguir:

1. A interação ocorre com um veículo mais rápido, onde a velocidade do veículo perseguidor é menor que a velocidade do veículo líder, $v_l \leq v_s$.

2. A interação ocorre com veículos com a mesma velocidade, onde a velocidade do veículo líder é igual que a velocidade do veículo perseguidor, $v_l = v_s$.

Desta forma, no item (1) o veículo perseguidor permanece com a mesma velocidade, v_s, até chegar a uma distância segura do veículo líder, onde assume-se que o veículo perseguidor não poderá ultrapassar, com isso o veículo perseguidor permanece com a mesma velocidade do veículo líder,$v_s = v_l$. No item (2), os veículos permanecem com a mesma velocidade, o veículo perseguidor com velocidade v_s e o veículo líder com velocidade v_l, com $v_l = v_s$ e se o veículo líder possui velocidade maior do que veículo perseguidor $v_l > v_s$, os veículos permanecem cada um com sua respectiva velocidade.

4 Resultados e Conclusões

A simulação efetuada possibilitou a obtenção do diagrama da velocidade e o diagrama fundamental. A figura 6 descreve a relação velocidade-densidade na transição do fluxo livre para o fluxo congestionado, podendo observar que a velocidade dos veículos decai com o aumento da densidade local, tendo atingido seu valor mínimo quando sua densidade é máxima. Também pode-se observar que a velocidade decresce rapidamente até a densidade chegar a 0,2 onde começa a decrescer de maneira mais lenta, esse fato ocorre devido ao trecho da rodovia simulada conter um semáforo que quando fecha, faz com que a densidade aumente com isso congestionando a rodovia até a densidade chegar a 1.

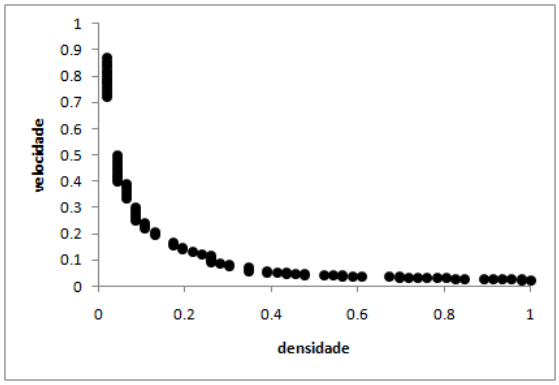

Figura 6: Dados da velocidade em função da densidade

Pode-se verificar que a figura 6 assemelha-se ao comportamento descrito por Bonzani *et al* (2005) (Figura 2), verifica-se também que a simulação foi capaz de captar os fenômenos descritos por Kerner em (a), (b) e (c) descritos na seção 2.2.

A figura 7 representa o diagrama fundamental, ou seja, relação fluxo-densidade na transição do fluxo livre para o fluxo congestionado. Pode-se notar um aumento no fluxo até chegar ao seu máximo, sendo que a partir desse ponto nota-se que com o aumento da densidade, o fluxo começa a decrescer. Quando a densidade é zero, o fluxo também é zero, mas na figura 7 não tem-se o ponto (0, 0). Isso ocorre devido ao fato de que a rotina para criar o diagrama inicia somente quando o primeiro veículo passa pelo semáforo, logo como já se tem veículos na pista a densidade e o fluxo não estão mais em zero.

Nota-se ainda a semelhança da figura 7 com o diagrama fundamental teórico (Figura 1(a)), representado por Kerner (2004), verificando que o modelo de simulação segue a teoria clássica para o fluxo congestionado.

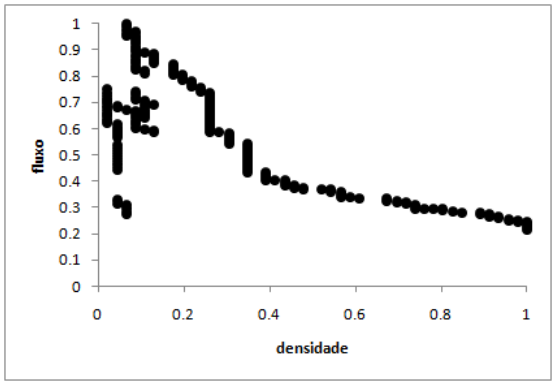

Figura 7: Dados do fluxo em função da densidade

Este é um primeiro trabalho voltado para o desenvolvimento de um simulador capaz de representar condições operacionais compostas em uma rotatória com múltiplas faixas de tráfego, semáforos e com a possibilidade de ultrapassagem, como é o caso do trevo Cataratas localizado na cidade de Cascavel-PR. Embora o simulador represente o fluxo de veículos em apenas uma faixa com semáforo é possível verificar uma grande semelhança entre os dados simulados e os observados experimentais.

Referências

Algers, S., et al, A Review of Micro-Simulation Models. *Institute for Transport Studies, University of Leeds*, 66, 1998.

Benekohal, R. F, Treiterer, J CARSIM: car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions. *Transportation Research Record*, 1194, 99-11, 1988.

Bonzani, I. Mussone, L. e Zucca, P. N., *From experiments to hydrodynamic traffic flow models: II-Sensitivity Analysis*, *Mathematical and Computer Modeling*, 42, 1145–1150, 2005.

Ferreira, G. B., et al O Desempenho de Rotundas analisado através da microsimulação - Um caso de estudo. *Pluris*, 8, 2010.

Gramani, L. M, Descrições microscópica, macroscópica e cinética do fluxo de tráfego veicular Notas em Matemática Aplicada, 89, SBMAC, 2010.

Gipps, P. G A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation. *Transportation Research*, 15B, 105-111, 1981.

Kerner, B. S, The Physics of Traffic *Springer*. New York, 2004.

Lima, E. B, Modelos Microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares. Dissertação de mestrado, UFF, 2007.

Pecker, C., Cybis, H. B. B. e Lindau, L. A Simulação Microscópica de Segmentos Rodoviários: Uma Avaliação Preliminar dos Comprimentos Críticos de Rampa. *Anais do XV Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET*, 11, 2001.

Prado, A. L, Modelagem Matemática do fluxo de tráfego veicular. Tese de doutorado, UFPR, 2010.

Prigogine, I. H Kinetic Theory of Vehicular Traffic. *American Elsevier*, caps. 1, 2 and 3, 1971.

Rothery, R., et al Traffic flow theory. *Transportation Research Board (TRB) Special Report*, v. 165, 1998.

Santos, L. J. R, Generalização do modelo computacional de tráfego veicular IDM (*Intelligent Driver Model*). Dissertação de mestrado, UFRPE, 2008.

Tavares, L. D, Um simulador de tráfego urbano baseado em autômatos celulares. Dissertação de mestrado, UFMG, 2010.