

Modelo Analítico de Contenção de Tráfego em VANET Usando Dados Reais de Mobilidade

Anna Izabel J. Tostes¹, Fátima de L. P. Duarte-Figueiredo²,
Jussara Almeida¹, Antonio A. F. Loureiro¹

¹Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Belo Horizonte, MG – Brasil

²Departamento de Ciência da Computação
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)
Belo Horizonte, MG – Brasil

annatostes@gmail.com, fatimafig@pucminas.br

{jussara, loureiro}@dcc.ufmg.br

Resumo. *O congestionamento de trânsito é um problema típico das grandes cidades. Este problema pode ser tratado pelos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que fazem parte de uma tecnologia com foco na comunicação cooperativa de veículos. Vários trabalhos na literatura modelam, através de simulações, cenários reais para avaliar algoritmos em redes veiculares. Contudo, o desempenho do tráfego não é avaliado de acordo com a mobilidade dos veículos. A ideia deste trabalho é propor um modelo analítico que permita analisar o impacto dos cruzamentos das rodovias como possíveis pontos de contenção de trânsito, a partir de um modelo real de mobilidade de veículos. O modelo proposto é baseado em teoria de filas. Cada cruzamento é representado por um centro de serviço e uma fila, e um conjunto de cruzamento é modelado por uma rede de filas. Com o uso de análise de valores médios para solucionar o modelo, avaliou-se o impacto do aumento da carga de veículos na taxa de processamento, no tempo de resposta médio e na utilização de recursos (i.e., cruzamento) da rede veicular. Os resultados mostram que o aumento da concorrência de um cruzamento implica no aumento linear do tempo que um veículo gasta para passar por ele.*

1. Introdução

A sociedade contemporânea apresenta um problema comum nos centros urbanos: o congestionamento de trânsito. Apesar dos avanços tecnológicos nos veículos automotores melhorarem a experiência do condutor e dos passageiros [Alves et al. 2009], o congestionamento resulta em importantes perdas econômicas, de produtividade e de impacto ambiental [Bauza et al. 2010]. Segundo pesquisa feita pelo IBOPE a pedido da Confederação Nacional da Indústria (CNI) [CNI-IBOPE 2011], os brasileiros perdem muito tempo no trânsito. Nas cidades com mais de 100 mil habitantes, a fração de pessoas que gastam mais de uma hora para chegar ao trabalho ou à escola é de 32%. A pesquisa mostra que aproximadamente 30–40% das pessoas demoram mais de uma hora no trânsito, independente da renda familiar. Além disso, 68% da população utiliza mais de um tipo

de transporte para se deslocar da residência até o trabalho, sendo que 61% depende do transporte coletivo: 34% das pessoas entrevistadas dependem do ônibus, 24% vão a pé, 16% de carro próprio e o restante utiliza táxi, moto e bicicleta.

Para reduzir os efeitos negativos do congestionamento foram propostos os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Eles operam em um ambiente formado por veículos em trânsito e utilizam os sensores de infraestrutura veicular para monitorar as condições de tráfego. São serviços de ITS: o monitoramento cooperativo do trânsito, o auxílio a cruzamentos sem sinalização e a prevenção de colisões. Os sistemas de comunicação cooperativa de veículos são uma das tecnologias de maior potencial para melhorar a segurança de tráfego e eficiência através da troca contínua de informações [Bauza et al. 2010].

Em uma rede veicular o controle de tráfego pode ser feito usando comunicação cooperativa entre veículos. Em geral, os veículos em trânsito são considerados nós em uma rede. A comunicação pode ser feita entre veículos ou de veículos com a infraestrutura existente, como radares e lombadas eletrônicas. A arquitetura dessas redes veiculares define a organização e a comunicação dos nós. Existem três arquiteturas básicas: ad hoc puro (*Vehicle Ad hoc Network* – VANET), infra-estruturada ou híbrida [Alves et al. 2008]. O foco deste trabalho está na arquitetura VANET, que utiliza tecnologia WLAN (*Wireless Local Area Network*) IEEE 802.11 nos nós móveis.

Diversos protocolos de roteamento – como o DSR (*Dynamic Source Routing*) – foram propostos e avaliados em VANETs [Li and Wang 2007]. As pesquisas mostram que essa avaliação depende da escolha do modelo de mobilidade dos nós na rede [Camp et al. 2002]. Existem modelos em que os veículos se movem com direção aleatória e com alta velocidade máxima dentro de uma área limitada de simulação [Li and Wang 2007]. Outros incluem a decisão de direção dos condutores [Chen et al. 2001]. Existem ainda modelos que utilizam mapas reais para produzir padrões de movimentação veicular [Naumov et al. 2006] e [Saha and Johnson 2004]. Essas duas propostas utilizam padrões reais de mobilidade veicular, sendo o primeiro referente à modelagem do trânsito em Zurique, a maior cidade da Suíça, e o segundo referente ao tráfego dos Estados Unidos disponibilizados pelo TIGER (*Topologically Integrated Geographic Encoding*). Contudo, a avaliação desses trabalhos foca no desempenho dos protocolos e não no comportamento do tráfego a partir da mobilidade veicular.

Este trabalho analisa o impacto dos cruzamentos das rodovias como possíveis pontos de contenção de trânsito, a partir de modelo de mobilidade real. Os objetivos são estimar a vazão (*throughput*) do cruzamento, isto é, o número de veículos que passam em um cruzamento por unidade de tempo, o impacto do aumento da carga de veículos no tempo de resposta médio dos veículos e a porcentagem de tempo que o cruzamento possui veículos em tráfego. Para atingir esses objetivos, foi desenvolvido um modelo analítico baseado na teoria de filas. Em particular, a Análise de Valores Médios [Menasce et al. 2004] foi utilizada para, a partir do mapa de cruzamentos e interconexões e de dados reais de mobilidade dos veículos, produzir estimativas das métricas desejadas. Foram feitas simulações com o modelo de [Naumov et al. 2006] a fim de obter os parâmetros de entrada do modelo analítico, em particular, as demandas (ou tempo de serviço) de um veículo em cada cruzamento modelado. Entende-se como demanda o tempo total médio que um veículo gasta para passar por um cruzamento. Para validar o modelo foram comparados os resultados das métricas obtidas nas simulações com os

resultados do modelo.

O modelo analítico representa o comportamento do desempenho do sistema. A vantagem do modelo é que ele é mais rápido que a simulação [Menasce et al. 2004]. Idealmente, ele deve ser preciso e simples, capturando aspectos gerais do funcionamento do sistema. Por outro lado, a simulação deve atingir o estado estacionário e ser executada várias vezes, o que pode ser difícil de se obter e saber quantas execuções são necessárias.

Este trabalho responde a três perguntas: (i) em média, qual é o ponto ótimo de operação de um cruzamento (*throughput*) em relação ao número de veículos que passam em um cruzamento por unidade de tempo? (ii) qual é o impacto do aumento de veículos passando por um cruzamento no tempo de resposta médio dos veículos? e (iii) como a utilização do cruzamento varia com o aumento da carga de veículos? Ao usar o modelo analítico proposto, avaliou-se o comportamento do tráfego, isto é, o impacto do aumento da carga de veículos na taxa de processamento (veículos por segundo), no tempo de resposta médio dos veículos e na utilização de um cruzamento em uma rede veicular.

Os resultados mostram que o aumento da concorrência de um cruzamento implica no aumento linear do tempo que um veículo gasta para passar por ele. Esse comportamento pode ser utilizado para prever um congestionamento/contenção no trânsito e para quantificar o nível da contenção (baixo, médio, alto) com lógica *fuzzy*. A previsão pode auxiliar um algoritmo de controle que utilize essa informação a seu favor e comece a processar em torno do valor ótimo de operação do cruzamento.

Este artigo está organizado em sete seções, sendo esta a primeira delas. A seção 2 descreve brevemente as redes veiculares e a seção 3 discute os trabalhos relacionados. A seção 4 apresenta o cenário de simulação utilizado neste trabalho. A seção 5 apresenta o modelo analítico. A seção 6 apresenta os resultados e a validação do modelo analítico. Finalmente, a seção 7 conclui o trabalho e discute possíveis extensões.

2. Redes Veiculares

As redes veiculares são formadas por veículos e equipamentos fixos, localizados às margens de estradas, ruas e avenidas. Essas redes se caracterizam pela alta mobilidade dos nós (veículos), enlaces intermitentes e requisitos estritos de latência. São esses atributos que dificultam a utilização de protocolos para redes ad hoc em redes veiculares, pois eles não apresentam desempenho satisfatório [Alves et al. 2009]. De modo geral, as redes veiculares não têm como problema o consumo de energia e a capacidade de processamento, mas o fato da topologia ser bastante dinâmica.

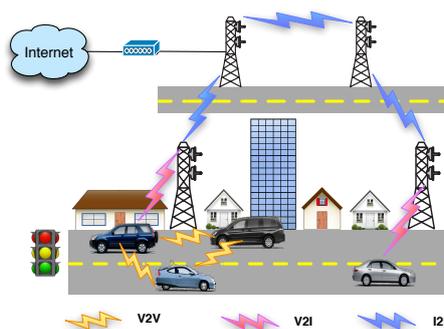


Figura 1. Tipos de arquitetura das redes veiculares.

A organização e a comunicação entre os nós são definidas pela arquitetura das redes veiculares. Existem três modelos principais, conforme ilustrado na figura 1: (i) ad hoc puro – V2V (veículo para veículo), (ii) infra-estruturada – V2I (veículo para infraestrutura) e (iii) híbrida, que é uma combinação dos modos (i) e (ii) [Alves et al. 2008]. Nesse cenário, os dados de cruzamentos podem ser utilizados para avaliar o desempenho do trânsito, a partir de informações de câmeras e contadores de veículos nos cruzamentos. Além disso, a velocidade média dos veículos poderia ser capturada por equipamentos ao longo da rodovia, auxiliando modelos de desempenho e previsão de fluxo.

Em [Alves et al. 2009], os autores mencionam que a possibilidade da comunicação com outras redes indica uma tendência para o uso das redes V2V. Apesar de a Internet ser uma vantagem para o modo V2I, a disseminação das redes 3G e o surgimento da rede 4G indicam uma verticalização das redes, isto é, o *handover* suave entre redes heterogêneas. Assim, o foco deste trabalho está na mobilidade dos veículos considerando redes V2V. Contudo, acredita-se na generalização para redes V2I.

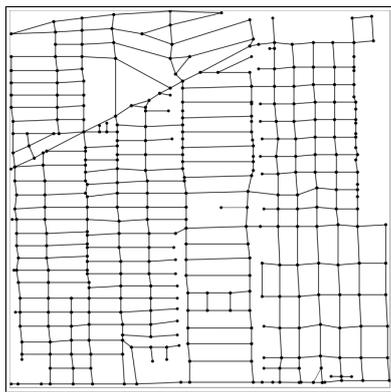
Fica claro que as redes veiculares possuem diversos desafios para sua adoção em larga escala, incluindo: a perda de conectividade durante a transmissão dos dados, o tempo reduzido em que dois nós permanecem em contato [Alves et al. 2009], o dinamismo da topologia da rede e a escalabilidade. O comportamento de redes veiculares e a validação dos protocolos, de acordo com o estado ótimo, são pontos fundamentais a serem tratados nessas redes, uma vez que podem indicar a viabilidade de um projeto real.

3. Trabalhos Relacionados

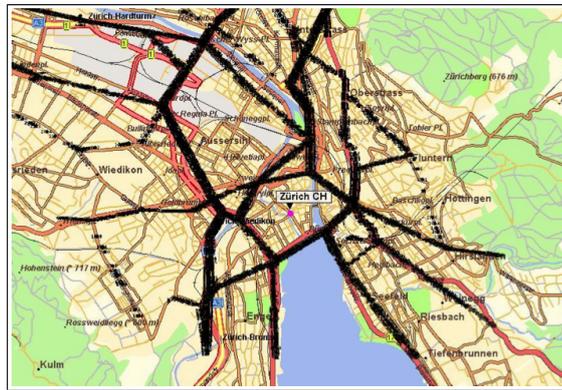
É necessário projetar novos protocolos para VANETs já que, conforme dito, protocolos tradicionais para redes ad hoc não são apropriados. Por outro lado, esses novos protocolos precisam ser devidamente avaliados. No entanto, a avaliação do desempenho de protocolos para VANETs depende da escolha do modelo de mobilidade dos nós na rede [Camp et al. 2002]. A literatura apresenta diversos modelos de mobilidade para as redes veiculares, incluindo modelos em que os veículos se movem aleatoriamente com velocidade máxima dentro de um cenário e mais detalhados, que incluem a decisão de direção dos motoristas [Chen et al. 2001]. Modelos atuais utilizam mapas de cidades para produzir padrões reais de movimentação veicular.

Os trabalhos [Saha and Johnson 2004] e [Naumov et al. 2006] utilizam padrões reais de mobilidade veicular. Saha e Johnson mapearam o tráfego dos Estados Unidos disponibilizados pelo TIGER (*Topologically Integrated Geographic Encoding*) – ver figura 2(a) – enquanto Naumov e colaboradores (2006) modelaram o tráfego de veículos automotores na cidade de Zurique, a maior cidade da Suíça – ver figura 2(b). A diferença entre esses trabalhos é que Naumov e colaboradores (2006) apresentam o limite de velocidade dos nós, cuja informação não está presente no trabalho de Saha e Johnson (2004).

Para avaliar protocolos de roteamento em uma VANET, Namov e colaboradores (2006) utilizaram o *Network Simulator* (NS-2) [Fall and Varadhan 2000]. Foram modelados cerca de 260.000 veículos, e mais de 25.000.000 mudanças de direções e velocidades de veículos em uma área de 250 km × 260 km. A figura 2(b) apresenta a mobilidade dos veículos no NS-2 (em preto) sobre o mapa do centro de Zurique. O NS-2 produz um *trace* da simulação, que mostra o que aconteceu, os padrões de movimentação dos usuários com suas velocidades e informações dos pacotes que trafegaram na rede. Con-



(a) Área de 2400 m × 2400 m conduzida em [Saha and Johnson 2004].



(b) Sobreposição da movimentação do NS-2 no mapa do centro de Zurique [Naumov et al. 2006].

Figura 2. Cenários simulados por Saha e Johnson (2004) e Naumov et al. (2006)

tudo, não foi analisado o comportamento do tráfego de acordo com a mobilidade veicular. Esse é exatamente o foco deste trabalho.

4. Simulação

Para criar o modelo analítico, o primeiro passo foi a reprodução da simulação de [Naumov et al. 2006]. Essa simulação foi utilizada para dois fins: (i) produzir as entradas do modelo analítico e (ii) validar o modelo analítico. A descrição das entradas do modelo analítico será apresentada na seção 5, enquanto a validação do modelo analítico será descrita na seção 6. Esta seção descreve o cenário da simulação conduzida.

Devido a limitações dos simuladores de redes orientados a eventos em processar mais de 10.000 nós, Naumov e colaboradores (2006) dividiram a cidade de Zurique em subregiões (vias de trânsito). Assim, se tivermos 30–40 veículos/km isto significa que a cada 1 km de rodovia, existem 30–40 veículos trafegando. Cada subregião possui três níveis de atividade de veículos: (i) baixa – menos de 15 veículos/km, (ii) média – de 30 a 40 veículos/km, e (iii) alta (hora do *rush*) – mais de 50 veículos/km. Cada período de tempo da simulação (300 s) corresponde a 30 minutos. As subregiões modeladas foram *enge oberstrass*, *unterstrass*, *zentrum bellevue* (centro de Zurique) e diversas vias expressas (*aarau oftingen*, *hurgen jona*, *effi winti* e outras).

Cada simulação gera como resultado um *trace* com a movimentação dos usuários e um arquivo NAM (*Network ANimator*), utilizado para visualizar os resultados das simulações no *NS-2 Network Animator*. A figura 3 mostra os resultados das simulações dos três níveis de densidade de veículos na região *enge oberstrass* pelo NAM.

O foco deste trabalho é avaliar, para o tráfego de alta densidade, uma das regiões estudadas em [Naumov et al. 2006]: a região de *enge oberstrass*, a qual é uma parte da cidade de Zurique. As simulações foram conduzidas com 520 veículos durante 300 s em uma área de 5 km × 7,5 km, os quais são os mesmos utilizados em [Naumov et al. 2006]. Tem-se que o canal de comunicação é sem fio e o modelo de propagação de rádio é o *FreeSpace*, com antenas omnidirecionais, interface de fila de prioridade *droptail* (do tipo FIFO). O protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) é o IEEE 802.11b.

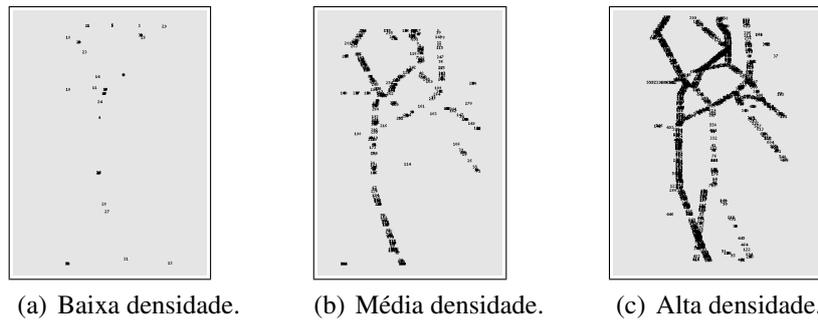


Figura 3. Saída do NAM: tráfego veicular simulado em diferentes níveis de densidade de trânsito

5. Modelo Analítico

A partir da simulação descrita na seção anterior, foram produzidas as entradas do modelo analítico, que são as demandas de cada cruzamento do cenário. A demanda indica o tempo total médio que um veículo gasta para passar por um cruzamento. Além disso, foi necessário definir a carga de trabalho do sistema, isso é, os veículos. Neste trabalho, foi utilizada uma carga de trabalho real, que foi simulada no NS-2 [Naumov et al. 2006], para validar o modelo. Nas simulações, um veículo entra na área simulada, começa a trafegar nas rodovias e sai do sistema quando termina sua viagem ou sai da área simulada. Como o número de veículos no sistema não é limitado, a carga de trabalho é aberta.

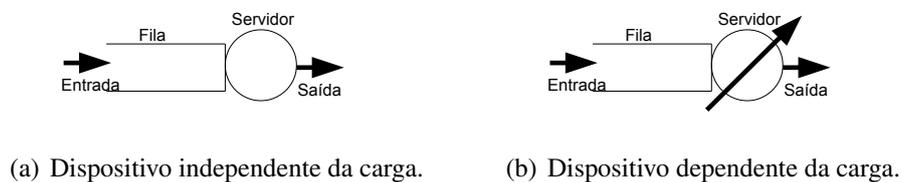


Figura 4. Sistema de fila mais simples

A rede de filas é representada por um conjunto de cruzamentos. Cada cruzamento é um centro de serviço. A figura 4 mostra os sistemas de fila mais simples [Menasce et al. 2004]. Eles são compostos por uma fila e um servidor, que pode ser dependente ou não da carga do sistema. Dois atributos estão presentes nessa arquitetura: o intervalo de tempo entre chegadas de veículos no cruzamento e a demanda média de serviço, que indica o tempo mínimo (na ausência de fila) que o veículo gasta para passar pelo cruzamento. Neste trabalho, os veículos chegam na fila e esperam para passar por um cruzamento, que é o servidor. O tempo total (tempo de resposta) que um veículo gasta para passar em um cruzamento depende se há ou não contenção de tráfego (medido pelo número de veículos no sistema). Como o tempo gasto para um veículo passar por um cruzamento depende de quantos veículos estão esperando na fila, o cruzamento (servidor) é um dispositivo dependente da carga (LD – *load dependent*) [Menasce et al. 2004]. LD é um centro de serviço cuja taxa de serviço depende do número de veículos esperando para passar por um cruzamento.

O modelo abstrai as várias possibilidades de saída em um cruzamento já que as características das vias estão encapsuladas. O importante é a carga de veículos no cruza-

mento. A quantidade de carros esperando para passar pelo cruzamento implica no tempo que o carro espera para passar pelo mesmo. Caso existam muitos carros no cruzamento, em qualquer lado, o veículo demora mais para continuar o seu percurso. A notação das variáveis utilizadas no modelo estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Notação das variáveis utilizadas no modelo analítico

Notação	Descrição da Variável
N	Número de veículos concorrentes na região.
N^*	Número ótimo de veículos concorrentes na região (limiar de saturação da região).
λ	Taxa de chegada de veículos na região.
D_k	Demanda no centro k .
$\mu_k(j)$	<i>Throughput</i> (vazão) com j veículos no centro k .
μ	<i>Throughput</i> (vazão) na região.
$\alpha_k(j)$	<i>Slowdown</i> da região com j veículos para o centro k .
R_k	Tempo de resposta no centro k .
R	Tempo de resposta na região.
Q_k	Tamanho da fila de espera no centro k .
Q	Tamanho da fila de espera na região.
U_k	Utilização do centro k .
$p_k(j n)$	Proporção do tempo em que centro k tem j veículos quando a população é igual a n .

A figura 5 apresenta o cenário simulado. Foram criados 21 centros, representados pelos pontos em preto. Ao lado de cada centro $C_1 \dots C_{21}$ foi colocada sua respectiva coordenada (x, y) na área simulada. Cada ponto em destaque representa um veículo no sistema. A velocidade dos nós variou de 10 a 35 km/h. A taxa de chegada de veículos no sistema (λ) foi calculada pela equação 1, que resultou em 1,73 veículos por segundo. A taxa de chegada nas filas foi dada por veículos apenas em um sentido do cruzamento.

$$\lambda = \frac{\text{Número de chegadas de veículos}}{\text{Tempo de simulação}} = \frac{520}{300} \approx 1,73 \text{ veiculos/s.} \quad (1)$$

A partir da simulação, foram calculadas as demandas de cada centro. Para estimar o tempo de ocupação de cada veículo atendido por um centro, foi calculado quantos veículos passaram por ali em média. Assim, foram obtidos as vazões do sistema quando o cruzamento possui $N = 1, 2, 3 \dots \gamma$ veículos (respectivamente os símbolos $\mu_k(1), \mu_k(2), \mu_k(3), \dots, \mu_k(\gamma)$), em que γ representa o número de carros simultâneos no sistema. A equação 2 mostra a demanda a partir de $\mu(1)$. É importante calcular a demanda de cada centro, pois ela é a entrada para a avaliação de desempenho.

$$D_k = \frac{1}{\mu_k(1)}. \quad (2)$$

Neste trabalho, foram realizadas duas análises: avaliação do desempenho de uma região e a identificação dos cruzamentos responsáveis pela contenção. Para a primeira parte, foi criado um modelo de análise de valores médios (MVA) [Menasce et al. 2004]. O modelo MVA representa a contenção em um cruzamento como tempo de espera. Nessa

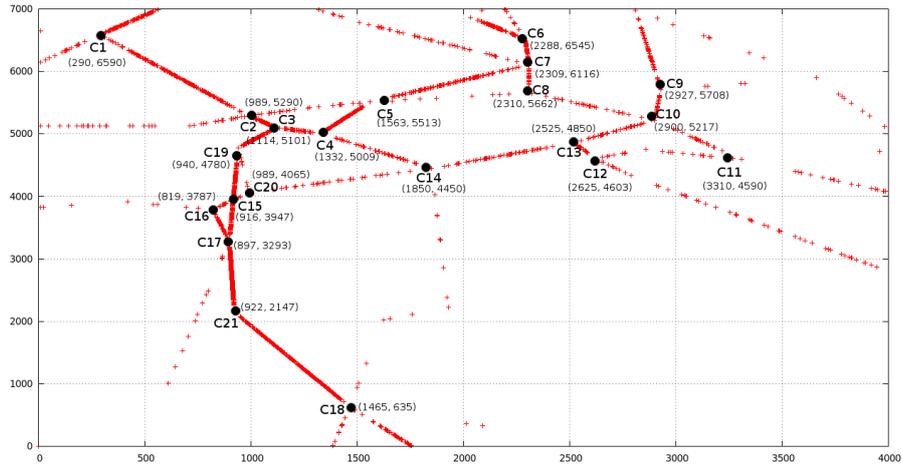


Figura 5. Cenário de simulação com os centros LD

parte, o centro foi considerado LI, já que foi analisado o desempenho de uma região sabendo o tempo de resposta, vazão e *slowdown* do sistema. O objetivo é gerar vazões de cada centro quando o mesmo possui $N = 1, 2, 3, \dots, \gamma$ veículos. Na segunda parte foi utilizado o algoritmo MVA para centros LD [Menasce et al. 2004]. É importante representar a contenção de trânsito pois o objetivo do trabalho é analisar quais cruzamentos levam à contenção. Logo, os centros foram considerados LD.

O algoritmo do modelo MVA (1) é descrito abaixo. Nesse caso, considera-se que cada centro é independente de carga (LI). O objetivo é gerar as vazões de cada centro quando o mesmo possui $N = 1, 2, 3, \dots, \gamma$ veículos. Para cada vazão, foram calculados o *slowdown* do sistema usando a equação 3, que representa a vazão quando o sistema possui j elementos em relação à vazão quando tem um veículo trafegando.

Algoritmo MVA:

```

begin  $Q_k = 0; n = 1;$ 
1. do {
2. for  $k \leftarrow 1$  to  $21$  do  $R_k \leftarrow D_k(1 + Q_k);$ 
3.  $R \leftarrow \sum R_k;$ 
4.  $X \leftarrow \frac{n}{R};$ 
5. for  $k \leftarrow 1$  to  $21$  do  $Q_k \leftarrow XR_k; U_k \leftarrow XD_k;$ 
6.  $Q \leftarrow \sum Q_k;$ 
7.  $n \leftarrow n + 1;$ 
8.} while ( $n \neq \gamma$ );

```

$$\alpha(j) = \frac{\mu(j)}{\mu(1)}. \quad (3)$$

O algoritmo MVA para centro LD é descrito a seguir. A entrada é a distribuição dos tamanhos da fila, ou seja, a proporção do tempo $p(j|n)$ em que cada tamanho possível de população existiu no centro. Pelo modelo, foi calculado o tempo de resposta do sistema (R), o tempo de residência em cada centro (R_k), a vazão do sistema (X), o tamanho da fila do sistema (Q) – incluindo quem está em serviço, e a utilização de cada centro (U_k).

Algoritmo MVA Para Centro LD:
<pre> begin $Q_k = 0; n = 1; p_k(0 0) = 1$ 1. do { 2. for $k \leftarrow 1$ to 21 do $R_k \leftarrow D_k \sum_{j=1}^n \frac{j}{\alpha(j)} p_k(j-1 n-1);$ 3. R $\leftarrow \sum R_k;$ 4. X $\leftarrow \frac{n}{R};$ 5. for $k \leftarrow 1$ to 21 do { 6. for $j \leftarrow 1$ to n do $p_k(j n) \leftarrow \frac{D_k X}{\alpha_k(j)} p_k(j-1 n-1)$ 7. p$_k(0 n) \leftarrow 1 - \sum_{j=1}^n p_k(j n);$ 8. U$_k \leftarrow 1 - p_k(0 n);$ 9. Q$_k \leftarrow \sum_{j=1}^n j p_k(j n);$ 10. }; 11. n $\leftarrow n + 1;$ 12.} while ($n \neq \gamma$); </pre>

Para calcular o tempo de resposta de cada centro, é necessário gerar as vazões para cada centro de serviço. Assim, é possível comprovar que cada cruzamento pode ser modelado como um centro LD (dependente de carga). Em seguida, foi executado o mesmo algoritmo LD-MVA com os valores de *slowdown* ($\alpha_k(j)$) para cada centro, os quais foram calculados a partir das entradas ($\mu_k(i)$).

6. Resultados e Validação

6.1. Resultados da Simulação

O resultado da simulação que mostra a movimentação dos nós (*trace*) no NS-2 é um arquivo em que cada linha representa um evento e cada coluna apresenta as informações dos eventos. Através desse *trace*, foram calculados a demanda de cada centro de serviço, o tempo de residência no cruzamento, o número de veículos na fila, o número de visitas ao cruzamento e o número de veículos em tráfego em uma período de simulação.

Esses resultados estão apresentados na tabela 2. Os centros obtiveram demandas bem diferentes, como ilustram os dados dos centros C_{11} e C_{17} , que tiveram as respectivas demandas de 8,30 s e 0,11 s. Apesar do centro C_{11} apresentar menor utilização do que o centro C_{17} , ele apresenta maior tempo de resposta, o que justifica a variação entre as demandas. Os centros de serviço com maior utilização foram os centros 9 e 13, com 99,67% de utilização. Em geral, todos os serviços estão saturados, exceto pelo centro 11 que possui 85% de utilização. A utilização foi calculada pelo algoritmo MVA, a partir do produto entre demanda e vazão, segundo a Lei de Little [Menasce et al. 2004].

O centro com maior tempo de resposta médio é o C_7 , com 27,39 s. Esse tempo de resposta foi calculado pela equação 4, sendo W_k o tempo acumulado dos veículos no centro e C_k o número de veículos que passaram pelo cruzamento k .

$$R_k = \frac{W_k}{C_k}. \quad (4)$$

Tabela 2. Resultados da simulação

Centro	Demanda	Tempo de Residência (R_k)	Utilização (U_k)
C_1	10,16 s	24,54 s	92,67%
C_2	5,52 s	18,07 s	98,34%
C_3	7,08 s	11,39 s	99,00%
C_4	8,63 s	15,01 s	99,01%
C_5	8,83 s	23,86 s	97,01%
C_6	9,38 s	17,41 s	95,00%
C_7	11,76 s	27,39 s	95,34%
C_8	9,39 s	14,57 s	98,67%
C_9	16,90 s	24,12 s	99,67%
C_{10}	11,82 s	25,91 s	92,67%
C_{11}	8,30 s	20,92 s	85,00%
C_{12}	9,65 s	13,34 s	97,67%
C_{13}	12,71 s	19,43 s	99,67%
C_{14}	11,95 s	25,30 s	99,67%
C_{15}	16,03 s	20,75 s	96,00%
C_{16}	10,39 s	16,25 s	97,01%
C_{17}	0,11 s	14,61 s	98,34%
C_{18}	12,76 s	20,61 s	94,67%
C_{19}	7,52 s	15,38 s	95,67%
C_{20}	17,26 s	23,04 s	98,67%
C_{21}	10,05 s	16,93 s	99,34%
Tempo de Resposta (R)	123,49]s		
Throughput (X)	1,73 veículos/s		
Tamanho da Fila (Q)	214 veículos		

6.2. Resultados da Modelagem Analítica e Validação

Para validar os resultados obtidos na seção anterior e verificar se os cruzamentos podem ser modelados como centros LD, foram executados os algoritmos MVA e LD-MVA. Neste trabalho foram realizadas duas análises: avaliação do desempenho de uma região sabendo o tempo de resposta, vazão e *slowdown* do sistema através do modelo MVA e análise de quais são os cruzamentos responsáveis pela contenção, através do modelo LD-MVA. A tabela 3(a) mostra os resultados obtidos para o algoritmo MVA (análise 1) e a tabela 3(b) mostra os resultados para o algoritmo LD-MVA (análise 2).

A tabela 3(a) apresenta a validação das utilizações de cada centro com o algoritmo MVA. Segundo Menasce et al. (2004), erros de até 30% são razoáveis para MVA. Neste trabalho, todos os erros foram inferiores a 10%, o que valida o modelo realizado. O tempo de resposta, a vazão e o tamanho da fila do sistema foram validados já que o erro obtido foi inferior a 5%. Essa tabela é validada pelos tempos obtidos na simulação do sistema.

A segunda parte do trabalho, o algoritmo LD-MVA, valida o tempo de resposta de cada centro – ver tabela 3(b). A taxa de erro no tempo de resposta obtida pelo modelo em relação à da simulação foi inferior a 30%, o que indica uma boa aproximação [Menasce et al. 2004]. Essa validação indica que qualquer cruzamento pode ser modelado como um centro LD.

Tabela 3. Resultados e validação da modelagem analítica

a. Validação dos resultados de desempenho do sistema

Variável	Simulação	MVA	Erro
U_1	92,67%	99,99%	7,90
U_2	98,34%	99,98%	1,67
U_3	99,01%	100,00%	1,00
U_4	99,01%	99,99%	0,99
U_5	97,01%	99,98%	3,07
U_6	95,01%	99,93%	5,18
U_7	95,34%	100,00%	4,89
U_8	98,67%	98,08%	0,60
U_9	99,67%	94,04%	5,65
U_{10}	92,67%	98,48%	6,27
U_{11}	85,01%	87,05%	2,40
U_{12}	98,76%	99,98%	1,23
U_{13}	99,67%	99,44%	0,23
U_{14}	96,00%	99,38%	3,52
U_{15}	93,73%	97,93%	4,48
U_{16}	98,34%	99,80%	1,49
U_{17}	94,67%	99,97%	5,59
U_{18}	95,67%	100,00%	4,52
U_{19}	98,67%	100,00%	1,34
U_{20}	97,01%	99,47%	2,54
U_{21}	99,34%	99,99%	0,65
R	125,92	122,81	2,47%
X	1,70	1,74	2,53%
Q	214,00	214,00	0,00%

b. Validação do tempo de resposta de cada centro de serviço

Centro	Rk		Erro
	Simulação	MVA	
R_1	24,54	20,99	14,46
R_2	18,07	13,04	27,84
R_3	11,39	12,54	10,08
R_4	15,01	12,55	16,35
R_5	23,86	17,49	26,72
R_6	17,41	18,00	3,37
R_7	27,39	19,35	29,34
R_8	14,57	16,79	15,24
R_9	24,12	28,51	18,20
R_{10}	25,91	29,23	12,81
R_{11}	20,92	25,86	23,62
R_{12}	13,34	15,02	12,66
R_{13}	19,43	21,09	8,54
R_{14}	25,30	26,70	5,50
R_{15}	20,75	26,27	26,61
R_{16}	16,25	18,78	15,56
R_{17}	14,61	14,65	0,29
R_{18}	20,61	23,57	14,36
R_{19}	15,38	11,44	25,66
R_{20}	23,04	26,87	16,64
R_{21}	16,93	19,22	13,50

Para analisar o impacto do aumento da carga no tempo de resposta e utilização do centro, foi calculado o limiar de saturação do sistema. O limiar de saturação é a região da curva após o ponto ótimo do sistema. Neste trabalho, este valor representa 12 veículos, com o centro já saturado. O ponto ótimo de operação pode ser calculado de acordo com a demanda do sistema e a demanda máxima. De acordo com os resultados da simulação, a demanda máxima foi a do centro 20 (17,26 s). A soma das demandas resultou em 216,18 s. Pela teoria do limite assintótico, o ponto ótimo pode ser calculado pela equação 5 [Menasce et al. 2004]. Logo, o tempo de resposta no ponto ótimo é 34,83 s.

$$N^* = \frac{D}{D_{max}} = \frac{216,18}{17,26} \approx 12 \text{ veículos simultâneos.} \quad (5)$$

O gráfico da figura 6(a) mostra o impacto do aumento no número de veículos no tempo de resposta para o centro 10. Para isso, é apresentado o tempo de resposta do centro de acordo com o aumento da carga (número de veículos). Quanto maior é o número de veículos no centro, maior é o tempo de resposta do centro.

O impacto do aumento do número de veículos concorrendo simultaneamente pelo

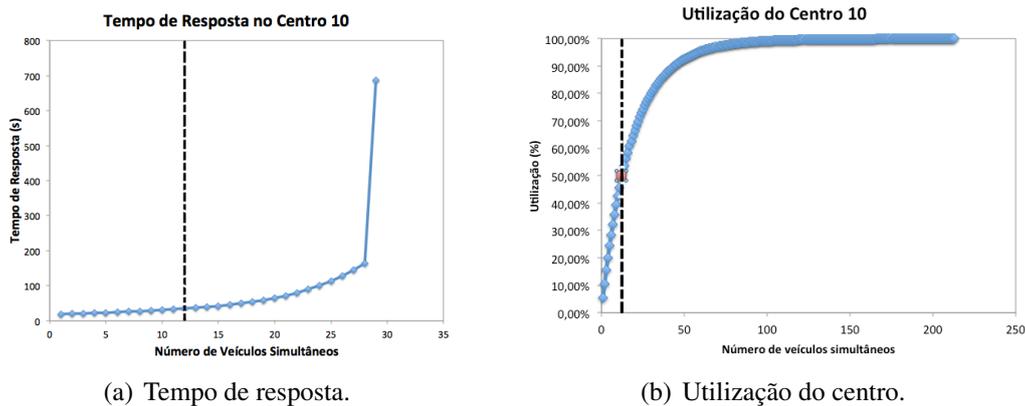


Figura 6. Tempo de resposta

centro 10 é mostrado no gráfico da figura 6(b). Conforme mostra a figura, a utilização do centro aumenta rapidamente, atingindo a saturação do sistema em 12 veículos. A linha pontilhada indica esse ponto ótimo do centro. A partir desse ponto, a inclinação de aumento da utilização do centro aumenta. Logo, esse é realmente o número ideal de veículos simultâneos em um cruzamento. Isso significa que 12 veículos é o nível de multiprogramação do centro de serviço. Isto é, o cruzamento deve possuir 12 veículos (em serviço e em espera) para ter a melhor relação de custo/benefício no tempo de resposta e utilização do centro. Um veículo estará em serviço, mas 11 estarão em espera. Se o cruzamento tiver 13 veículos (12 em espera), seu desempenho é afetado (centro saturado).

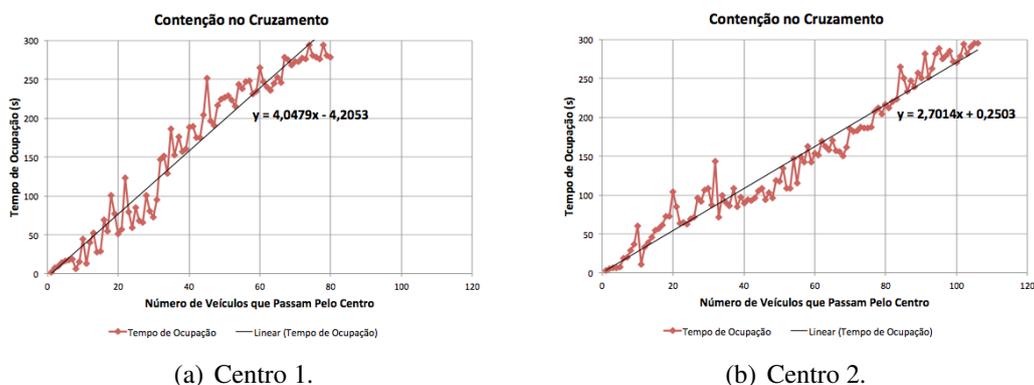


Figura 7. Contenção do centro de serviço

Também foi analisada a evolução da contenção no cruzamento a partir do aumento de veículos no centro. Essa análise considera o tempo de residência no centro. A figura 7 apresenta o gráfico da contenção dos centros 1 e 2. De acordo com o gráfico, se a concorrência por um cruzamento aumenta, o tempo que um veículo gasta, em média, para passar por ele também aumenta de acordo com o ângulo da reta. Quanto maior o ângulo, mais rápido aumenta o tempo de um veículo ser atendido. Por exemplo, 40 veículos passam pelo centro 1 com um tempo médio de 150 s, mas o mesmo número de veículos passam pelo centro 2 em aproximadamente 110 s. Isso mostra uma redução de 26,67%. Essa informação pode ser utilizada para prever uma contenção no trânsito, iniciar um protocolo de controle de congestionamento e quantificar o nível da contenção.

7. Conclusões

O congestionamento de trânsito é um dos problemas dos grandes centros urbanos que traz importantes perdas econômicas, de produtividade e de impacto ambiental. Trabalhar nesse aspecto é o intuito das redes veiculares. Diversos trabalhos na literatura propõem protocolos que tentam resolver esse problema. Mas a avaliação apenas do protocolo não é suficiente para uma boa análise de desempenho. Faz-se necessário um estudo analítico. Não é o foco deste trabalho avaliar os protocolos de VANET, mas analisar o desempenho da mobilidade dos veículos em geral.

Conforme dito, trabalhos da literatura modelam, através de simulações, cenários reais para avaliar algoritmos em redes veiculares, como em [Saha and Johnson 2004] e [Naumov et al. 2006]. Mas o comportamento do tráfego não é avaliado de acordo com a mobilidade dos veículos. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto dos cruzamentos das rodovias como possíveis pontos de contenção de trânsito, a partir de um modelo real de mobilidade de veículos. O cenário de [Naumov et al. 2006] foi escolhido por se tratar da modelagem de uma grande cidade (Zurique) com níveis de densidade do trânsito. Este trabalho propõe um modelo de filas, representando a contenção em cada cruzamento. O modelo leva em consideração dados de *trace* de movimentação de veículos e se baseia apenas nos dados dos veículos. Características das vias estão encapsuladas. Acredita-se que esse modelo possa ser aplicado a *traces* de movimentação de veículos em geral. A vantagem do modelo em relação à simulação é o fornecimento de resultados rápidos.

Através do modelo, avaliou-se o impacto do aumento da carga de veículos na taxa de processamento, no tempo de resposta e na utilização de recursos de uma rede veicular. Os resultados mostraram que existe um número ótimo de veículos disputando cruzamentos para que haja a melhor relação de custo/benefício no tempo de resposta e utilização do centro. O número ideal (ótimo) de veículos concorrendo simultaneamente para passar em um cruzamento é o nível de multiprogramação do sistema. Esse número impacta diretamente no tempo de resposta, ou seja, no tempo de um veículo em um congestionamento. Esse número ideal é o ponto de inflexão da função do tempo de resposta em relação aos veículos que desejam passar pelo cruzamento. Neste trabalho, esse número foi 12 veículos. Significa que se houver menos que 12 veículos, a relação custo/benefício no tempo de resposta e utilização é positiva e o sistema está disponível. Mas, se houver mais do que 12 veículos, então o sistema está saturado. Ou seja, a tentativa de um veículo passar por um cruzamento impacta drasticamente no tempo de resposta e na utilização.

Essas informações podem ser utilizadas para prever uma contenção no trânsito, iniciar um protocolo de controle de congestionamento e quantificar o nível da contenção. Este trabalho mostrou que o número de veículos simultâneos e o tempo de residência no centro afetam o desempenho do trânsito. O desempenho do trânsito muda de acordo com o número de veículos em um cruzamento. O impacto na contenção se deve ao aumento do tempo de residência médio de um veículo no cruzamento.

Em situações reais no Brasil, o modelo proposto poderia ser utilizado a partir de dados de cruzamentos, como câmeras, contadores de veículos. Existem artigos que estudam a predição do fluxo baseado nessas informações. Esse aspecto é um trabalho futuro dos autores. Este modelo não se aplica as variações instantâneas de desempenho do tráfego, uma vez que as análises de filas são voltados para valores médios. O objetivo do modelo é avaliar faixas de horários onde se tem um fluxo (taxa de chegadas) dentro da

faixa atendida pelo modelo de longa duração para um determinado local e horário. Além disso, será feito um estudo sobre a generalização do modelo, identificando e classificando as contenções de trânsito nas ruas. Ainda, será estudada a aplicação da teoria de interseção não sinalizada e sinalizada [Rouphail et al. 2000, Troutbeck and Brilon 1997].

Referências

- Alves, R. d. S., do V. Campbell, I., de S. Couto, R., Campista, M. E. M., Moraes, I. M., Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., Duarte, O. C. M. B., and Abdalla, M. (2009). *Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios*, chapter 5, pages 199–254. Mini-curso do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC’2009.
- Alves, R. S., Abdesslem, F. B., Cavalcanti, S. R., Campista, M. E., Costa, L. H. M. K., Rubinstein, M. G., Amorim, M. D., and Duarte, O. C. M. B. (2008). Uma análise experimental da capacidade de redes ad hoc veiculares. In *SBrT*.
- Bauza, R., Gozávez, J., and Sánchez-Soriano, J. (2010). Road traffic congestion detection through cooperative vehicle-to-vehicle communications. In *LCN*, pages 606–612.
- Camp, T., Boleng, J., and Davies, V. (2002). A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communications & Mobile Computing: Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2(5):483–502.
- Chen, Z. D., Kung, H., and Vlah, D. (2001). Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, MobiHoc ’01, pages 247–250, New York, NY, USA. ACM.
- CNI-IBOPE, P. (2011). Retratos da sociedade brasileira: locomoção urbana.
- Fall, K. and Varadhan, K. (2000). Ns notes and documentation. In *The VINIT Project*.
- Li, F. and Wang, Y. (2007). Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 2(2):12–22.
- Menasce, D. A., Almeida, V. A. F., and Dowdy, L. W. (2004). *Performance by Design: Computer Capacity Planning by Example*. Prentice Hall.
- Naumov, V., Baumann, R., and Gross, T. (2006). An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, MobiHoc ’06, pages 108–119, New York, NY, USA. ACM.
- Rouphail, N., Tarko, A., and Li, J. (2000). Traffic flow at signalized intersections. pages 9.1–9.28. Revised Monograph of Traffic Flow Theory, update and expansion of the Transportation Research Board (TRB) special report 165, “Traffic Flow Theory”, published in 1975.
- Saha, A. K. and Johnson, D. B. (2004). Modeling mobility for vehicular ad-hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, VANET ’04, pages 91–92, New York, NY, USA. ACM.
- Troutbeck, R. J. and Brilon, W. (1997). Unsignalised intersections theory. Available at: <http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/CHAP8.PDF>.