

Modelação e avaliação da performance de soluções de tráfego rodoviário com base na teoria das filas de espera

Paula Milheiro Oliveira, poliv@fe.up.pt

Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

Centro de Matemática da Universidade do Porto (CMUP), Universidade do Porto

António Pacheco, antonio.pacheco.pires@tecnico.ulisboa.pt

Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa

1. Introdução

O tráfego de veículos tem sido objeto de interesse da comunidade académica, assim como dos engenheiros de tráfego, pelas dificuldades que pode causar no ambiente construído, arrastando problemas que vão desde perdas de tempo e de qualidade de vida a perdas económicas pelas quantidades de combustível desperdiçado em situações de congestionamento e paragens forçadas seguidas de acelerações, com impacto igualmente na emissão de gases com efeito de estufa.

Uma parte considerável dos problemas do tráfego de veículos é originada pelo facto de diferentes correntes de tráfego, com diferentes origens, competirem pelo espaço a ocupar numa via que servirá de meio para atingirem o seu destino. A competição pode estar a acontecer num semáforo, numa interseção não semaforizada, numa rotunda ou mesmo numa portagem de auto-estrada. Apesar das iniciativas tomadas nos últimos tempos, visando flexibilizar horários de trabalho e organizar desfasamentos nos horários normais de diferentes atividades, as dificuldades de circulação e o congestionamento das vias, nomeadamente nas cidades, não têm vindo a ser resolvidos com o sucesso desejado. Resta-nos pois tentar conseguir uma boa formulação do problema, a sua análise e a obtenção de respostas que possam ser implementadas no terreno, visando o planeamento e a regulação das redes de tráfego.

Num artigo anterior publicado neste Boletim (Simões e Milheiro-Oliveira, 2017) descreveu-se detalhadamente a modelação do atraso de veículos em cruzamentos semaforizados, com base na teoria das filas de espera. Naturalmente os modelos do tráfego dependerão das características da situação que gera a competição entre veículos, pela passagem e pela ocupação do espaço na via, havendo necessariamente modelos adequados para cada um dos tipos de cenários: existência de semáforos (com controlo atuado total, parcial ou de tempos fixos), interseção não semaforizada, rotunda, portagem ou outra. Os cálculos do comprimento médio das filas de espera e dos tempos médios de espera nos nós ou pontos nevrálgicos de uma rede de tráfego são exemplos de medidas essenciais para avaliar a qualidade da circulação rodoviária, naquilo que muitas vezes se designa por Nível de Serviço (LOS; do inglês *Level Of Service*). Cálculos deste tipo são efetuados com base em diferentes teorias de tráfego, correspondendo-lhes diferentes modelos. Um dos utensílios de construção desses modelos e derivação dos cálculos subjacentes é a teoria das filas de espera.

Da mesma forma que num qualquer modelo de filas de espera, no tráfego, consideramos:

- Veículos (os quais atuam como “clientes” na terminologia de filas de espera) que requerem serviço - a passagem num ponto da rede rodoviária - e que são gerados, ao longo do tempo, por uma fonte, a qual origina um dado processo pontual de chegadas. Nos casos em que o nó rodoviário que estamos a considerar está afastado dos restantes nós da mesma rede, digamos “isolado”, é razoável considerar essa geração como aleatória e seguindo um processo de Poisson, isto é dizer que os tempos entre chegadas sucessivas de veículos são independentes e identicamente distribuídos com distribuição exponencial. O mesmo não será verdade quando consideramos uma rede em que o espaço entre nós é pequeno e

precisamos de ter em conta o que se passa no nó ou nós anteriores ao nó em estudo, que condicionam, portanto, a forma como os veículos são gerados na fonte;

- Os veículos entram no sistema e colocam-se em fila caso encontrem veículo(s) em frente aos mesmos, bem como se encontrarem o semáforo fechado (sinal vermelho), se existente;
- Em determinados instantes, o veículo no topo da fila é selecionado para ser atendido (a disciplina da fila é FIFO; do inglês, *First In First Out*); e
- O serviço requerido é então efetuado, ao veículo no topo da fila, pelo mecanismo de serviço (semáforo, rotunda, portagem), após o que o veículo deixa o sistema da fila de espera.

2. Medidas de desempenho

Na avaliação do desempenho de um sistema de tráfego, consideram-se usualmente as seguintes medidas de desempenho:

- Atraso médio de um veículo.
- Comprimento médio da fila.
- Tempo médio despendido no estado “parado.”
- Número médio de paragens por unidade de comprimento de um troço.

As duas primeiras medidas têm um uso mais tradicional. As duas últimas medidas têm vindo a ganhar importância na última década, devido à ligação que delas pode ser estabelecida com impactos negativos no ambiente, nomeadamente na contribuição para a poluição atmosférica e no uso racional da energia e dos combustíveis.

Ao uso destas medidas acresce a oportunidade, digamos mesmo a necessidade, de descrever a variabilidade das variáveis que descrevem o tráfego, sejam elas o atraso, o comprimento da fila, o tempo despendido no estado “parado” ou o número de paragens em cada troço. Naturalmente que a variância deverá ser usada para esses fins. Em algumas situações, o coeficiente de variação é também estudado.

O atraso é entendido como sendo a diferença entre o tempo que o veículo demora efetivamente a abandonar o sistema e o tempo que este demoraria a abandonar o sistema caso mantivesse constante a sua velocidade na respetiva *velocidade de cruzeiro*, ou seja, sem ter de competir com outros veículos presentes no sistema ou com sinalização, semaforização ou qualquer outro tipo de obstáculo ou regra que resulte numa alteração da sua velocidade.

3. Modelos de tráfego

Existem vários tipos de modelos de tráfego, começando pelos modelos microscópicos até aos macroscópicos. Nos modelos microscópicos, o mais usado é sem dúvida o modelo *car-following*, em que o movimento de cada veículo é simulado tendo em conta as suas características (dimensões, potência, velocidade, tipo de reação do condutor) e o comportamento do veículo à sua frente (Panwai e Dia, 2005; Saifuzzaman e Zheng, 2014; Sun et al, 2016). Os modelos de *car-following* têm vindo a tornar-se cada vez mais sofisticados, de forma a representarem de forma fidedigna a realidade que se observa no dia a dia do tráfego. São, no entanto, modelos que consomem muito tempo de computação e exigem elevados conhecimentos sobre os cenários em concreto que se pretende simular, requerendo a calibração de um conjunto de parâmetros descritores bastante exigente.

No extremo oposto estão o modelo proposto por Webster (Webster, 1958) e o denominado Modelo Generalizado do Atraso (GDM; do inglês, *Generalized Delay Model*) que consta do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2022). Ambos são modelos empíricos usados, em engenharia de tráfego, como meios simples de avaliação do desempenho de interseções reguladas com ciclos fixos.

Foram também propostos, na literatura, os modelos designados *Kinematic Wave Models* (KWM) para representar o fluxo de tráfego num segmento de via (Lighthill and Witham, 1955; Richards, 1956). Igualmente baseados em modelos usados na hidrodinâmica, os modelos que ficaram conhecidos com a denominação de *cell-transmission models* (CTM) começaram por representar troços de auto-estrada, permitindo descrever com realismo fenómenos transientes de aparecimento, propagação e dissipação de filas de tráfego (Daganzo, 1994). No entanto, tanto os KWM como os CTM foram apresentados como modelos determinísticos, permitindo apenas capturar comportamentos médios. Versões estocásticas dos CTM viriam a ser introduzidas posteriormente por Boel e Mihaylova (2006) e Sumalee et al. (2011).

A investigação de modelos baseados na teoria das filas de espera começou pelas filas M/M/n, M/D/n M/G/n e G/M/n, muitas vezes com um único servidor (Larson e Odoni, 1981). No entanto, estas filas não se adequam a todo o tipo de situações de tráfego. Por exemplo, no caso de interseções semaforizadas, temos apenas um servidor ($n = 1$) mas a desativação do servidor (semáforo) durante determinados períodos de tempo, sejam eles com duração pré-determinada ou não, isto é, seja qual for o tipo de controlo implementado no semáforo, inviabiliza a utilização dos modelos citados para descrever o funcionamento do sistema de espera.

Cada interseção numa rede de tráfego pode ser vista como um sistema de *polling* (Takagi, 2000), em que um único servidor é chamado a servir duas ou mais filas, cumprindo regras de serviço bem estabelecidas. O caso das portagens é um pouco diferente, uma vez que temos geralmente múltiplos servidores e, em princípio, não existem períodos de desativação do servidor.

O desafio dos modelos mais recentes é o de incluir a formação de pelotões e a forma como os veículos conectados se movem entre os nós da rede. Eles deverão responder à necessidade de uma abordagem probabilística das dependências espaço-temporais entre ligações viárias.

4. Filas de espera enquanto modelos de tráfego

Uma interseção semaforizada pode, teoricamente, ser vista como um sistema de filas de espera com pausas do servidor (Doshi, 1986). Nesse sistema, o servidor assume alternadamente um de dois estados, ativo (semáforo verde) ou em pausa (ou desativado, semáforo vermelho), face à fila de espera. Desta forma, cada uma das filas do sistema vê o servidor como indisponível durante determinados períodos de tempo e ativo nos restantes períodos de tempo. Os períodos de sinal verde ou vermelho podem ser de duração fixa (semáforos de ciclo fixo) ou variável (semáforos de controlo atuado). Geralmente, assume-se que o servidor é capaz de dar passagem a até 30 clientes (veículos) por minuto, o correspondente ao atravessamento do semáforo ao ritmo médio de um veículo a cada dois segundos, em situação de fluidez de tráfego.

A evolução deste sistema de filas de espera pode ser caracterizada aproximadamente por uma cadeia de Markov embebida em épocas igualmente espaçadas ao longo do eixo do tempo. Face ao atrás exposto, é comum considerar-se um espaçamento temporal de 2 segundos para o tempo entre épocas sucessivas da referida cadeia de Markov. A cadeia de Markov embebida é um processo bivariado de tipo Markov-modulado em que: a segunda componente (ou coordenada) do processo modela a fase do ciclo de semaforização (este ciclo é constituído por um período contínuo de semáforo verde, seguido de um período contínuo de semáforo vermelho) no instante (época) em questão; por seu turno, a primeira componente denota o número de veículos no sistema (isto é, veículos no sistema que ainda não atravessaram o semáforo) no mesmo instante. A matriz de transição desta cadeia de Markov é do tipo M/G/1 matricial, um tipo de matriz introduzido, e amplamente estudado, por M.F. Neuts (Neuts, 1989). Para o fim em vista, é essencial ser possível, recorrendo aos chamados métodos analítico-matriciais (Latouche e Ramaswami, 1999), estudar a ergodicidade e estacionaridade da cadeia de Markov embebida, e bem assim calcular a sua distribuição estacionária.

Tendo por base a distribuição estacionária da cadeia de Markov embebida referida, é então possível deduzir as distribuições estacionárias (e bem assim também a longo-prazo) do comprimento da fila e do tempo de espera dos veículos, bem como outras medidas de desempenho, de modo exato (ou seja, considerando as chegadas de veículos ao sistema a ocorrerem em tempo contínuo). O método de cálculo que permite fazer a transição da distribuição estacionária da cadeia de Markov embebida para medidas

estacionárias do desempenho do sistema em tempo contínuo recorre à teoria dos processos semi-regenerativos (Pacheco et al, 2008), permitindo relacionar - em particular - o comprimento médio a longo-prazo da fila, bem como o tempo médio de espera virtual a longo-prazo, com a distribuição estacionária da cadeia de Markov embebida.

O caso dos cruzamentos com controlo de ciclo fixo foi tratado em (Hu et al, 1997). A extensão ao caso de controlo semi-atuado, com possibilidade de prolongamento do período de sinal verde para além da sua duração mínima, foi efetuada em (Pacheco et al., 2017; Macedo et al, 2017). Estamos a trabalhar atualmente no caso em que é possível ocorrer também o prolongamento do período de sinal vermelho caso não haja veículos à espera para atravessamento do semáforo no final do período mínimo de sinal vermelho, a par da consideração de medidas adicionais de desempenho, como sejam as variâncias (a longo-prazo) dos tempos de sinal verde e de sinal vermelho e, bem assim, a variância dos ciclos semafóricos.

Alfa e Neuts (1995) propuseram uma extensão da fila de espera com pausas do servidor para incluir efeitos da formação de pelotões no processo de chegada. De facto, chegadas de veículos em pelotão a interseções equipadas com semáforos são um fenómeno comum nas redes rodoviárias, nomeadamente em ambientes urbanos, em virtude da proximidade de segmentos de via entre cruzamentos. O modelo BMAP (do inglês, *Batch Markovian Arrival Process*; ver Pacheco e Prabhu, 1995) para processo de chegadas de veículos permite incorporar precisamente a formação de pelotões. De salientar a investigação mais recente documentada em Yang e Fu (2024), em que foi proposto um modelo BMAP/D/1 e foram estudados, explicitamente, o efeito do tamanho do pelotão e das correlações dos espaçamentos entre os veículos de um pelotão. Foram estudados nesse trabalho, não só os valores médios habitualmente usados para avaliar o comportamento das filas de espera, tais como o comprimento médio da fila e o atraso médio, mas também algumas medidas que caracterizam a dinâmica de fila, como os comprimentos máximo e mínimo da fila e a evolução temporal do comprimento da fila ao longo de um ciclo do sinal.

5. Comentários finais

Um dos aspetos que se reveste de particular importância, e cuja investigação não está fechada, é o do uso da teoria das filas de espera para caracterizar os fenómenos de *spillback* que ocorrem no tráfego, nomeadamente em situações de congestionamento.

No futuro, também o movimento dos veículos conectados ou mesmo autónomos deverá ser tido em conta nos modelos a investigar. Num horizonte relativamente próximo, pensa-se que poderá haver vias dedicadas exclusivamente a veículos conectados, que dispensarão qualquer tipo de semáforos físicos. O controlo do tráfego nessas vias passará a ser feito pelo conjunto dos sistemas de condução com que os veículos estarão equipados que, no fundo, conterão semáforos virtuais responsáveis por colocar em prática restrições à circulação e prioridades, garantindo a segurança dos condutores e a fluidez do tráfego. Esse novo paradigma fará surgir novos problemas no âmbito das filas de espera, com características diferentes daquelas até aqui consideradas. Não tarda, ouviremos falar de auto-estradas inteligentes, entre outras novidades.

Referências

- Alfa, A.S. e M.F. Neuts (1995). Modelling vehicular traffic using the discrete time Markovian arrival process. *Transportation Science* 29:109-117.
- Boel, R. e L. Mihaylova (2006). A compositional stochastic model for real time freeway traffic simulation. *Transportation Research Part B* 40:319-334.
- Daganzo, C. (1994). The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B* 28(4):269-287.
- Doshi, B.T. (1986). Queueing systems with vacations - a survey. *Queueing Systems* 1:29-66.

- Hu X.N., Tang, L.C. e H.L. Ong (1997). A $M/D^X/1$ vacation queue model for a signalized intersection. *Computers and Industrial Engineering* 33(3-4):801-804.
- Larson, R.C. e A.R. Odoni (1981). Queueing Theory, Em: *Urban Operations Research*, Cap. 4, Prentice-Hall, NJ.
- Latouche G. e V. Ramaswami (1999). *Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling*. ASA-SIAM.
- Lighthill, M. e J. Witham (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society A* 229:317-345.
- Macedo, F., Milheiro-Oliveira, P., Pacheco, A. e M.L. Simões (2017). Application of a particular class of Markov chains in the assessment of semi-actuated signalized intersections. *Lecture Notes in Computer Science* 10378:138-151.
- Neuts, M.F. (1989). *Structured stochastic matrices of M/G/1 type and their applications*. Marcel Dekker, New York.
- Pacheco, A. e N.U. Prabhu (1995). Markov additive processes of arrivals, Em: *Frontiers in Queueing: Models, Methods and Problems*, J. Dshalalow e D. König (eds.), CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Pacheco A., Tang L.C. e N.U. Prabhu (2008). *Markov-modulated Processes & Semiregenerative Phenomena*. World Scientific, Singapore.
- Pacheco, A., Simões, M.L. e P. Milheiro-Oliveira (2017). Queues with server vacations as a model for pretimed signalized urban traffic. *Transportation Science* 51(3):841-851.
- Panwai, S. e H. Dia (2005). Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6(3):314-25.
- Richards, P. (1956). Shock waves on highways. *Operations Research* 4:42-51.
- Saifuzzaman, M. e Z. Zheng (2014). Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 48: 379-403.
- Simões, M.L. e Milheiro-Oliveira, P. (2017). Modelação do atraso dos veículos em cruzamentos semaforizados. *Boletim da SPE - Primavera*: 34-42.
- Sumalee, A., Zhong, R.X., Pan, T.L. e W.Y. Szeto (2011). Stochastic cell transmission model (SCTM): a stochastic dynamic traffic model for traffic state surveillance and assignment. *Transportation Research Part B* 45(3):507-533.
- Sun, B., Wu, N., Ge, Y.E., Kim, T. e H.M. Zhang (2016). A new car-following model considering acceleration of lead vehicle. *Transport* 31(1):1-10.
- Takagi, H. (2000). Analysis and Application of Polling Models. Em: Haring, G., Lindemann, C., Reiser, M. (eds) *Performance Evaluation: Origins and Directions*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1769. Springer, Berlin, Heidelberg.
- TRB - Transportation Research Board (2022). *Highway capacity manual: a guide for Multimodal Mobility Analysis*, 7th ed., The National Academies of Sciences - Engineering - Medicine, Washington DC.
- Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Settings. *Road Research Laboratory* 39, HMSO, London.
- Yang, Q. e X. Fu (2024). An extended queueing model for vehicles at signalized intersections considering the platoon correlated arrivals. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 635: 129483.

