

## CALIBRAÇÃO MULTIOBJETIVO DE MODELO DE FLUXO DE TRÁFEGO DE SEGUNDA ORDEM EM RODOVIAS

**Felipe Augusto de Souza**

Argonne National Laboratory

**Rodrigo Castelan Carlson**

Universidade Federal de Santa Catarina

### RESUMO

A utilização eficiente da capacidade instalada é essencial para reduzir congestionamento em rodovias. O fenômeno de queda de capacidade é uma fonte importante para o aumento do congestionamento em rodovias. Trata-se de uma queda de fluxo observado por um gargalo quando a seção a montante deste está congestionada. Ainda que existam diversos modelos capazes de reproduzir este fenômeno, ainda não existe completo entendimento do mecanismo específico e, portanto, dos parâmetros essenciais para que este fenômeno seja devidamente capturado em simulações de tráfego. Neste estudo, propomos uma abordagem multi-objetivo para calibração de modelos de segunda ordem. Dois modelos foram comparados: modelo METANET tradicional e METANET com modelagem por estreitamento de faixas, que não considerara um termo de queda de fluxo devido ao fluxo corrente na rampa de entrada. Os resultados sugerem que a rampa de entrada é um fator importante na queda de capacidade uma vez que os erros de calibração do modelo completo foi substancialmente inferiores à modelagem por estreitamento de faixas. A análise da calibração ainda mostra que há grande variabilidade nos valores do parâmetros nos dois modelos.

### ABSTRACT

The efficient utilization of deployed capacity is essential to reduce congestion on freeways. The congestion can be further worsened by the capacity drop phenomenon - a drop in the bottleneck outflow following the congestion onset in the section just upstream of that bottleneck. Although there are several models able to reproduce such phenomenon, there is a lack of systematic study on the key parameters to be adjusted so as to reproduce the capacity drop phenomenon. In this paper, we propose a multi-objective approach to calibrate second-order models that are able to reproduce such phenomenon in different ways. Two models are tested and compared: traditional METANET model and an alternative case modeling the bottleneck as a lane drop and thereby not considering the term to reduce speed downstream of an on-ramp proportion to the on-ramp flow. The calibration results suggest that the on-ramp is a key factor on the capacity drop phenomenon at merges as the traditional METANET model outperformed by a large margin the lane drop modeling as the latter does not consider the on-ramp impacts. The calibration analysis also shows significant variability in the model parameters.

### 1. INTRODUÇÃO

Devido a uma crescente demanda, especialmente nas últimas duas décadas, congestionamentos em rodovias têm se tornado cada vez mais extensos. Uma vez que a expansão de infraestrutura de rodovias para acompanhar o crescimento da demanda pode ser impraticável, é importante que as rodovias sejam controladas e gerenciadas de forma a utilizar de maneira eficiente a capacidade já instalada.

Em rodovias, uma fonte de ineficiência é o fenômeno da queda de capacidade. Trata-se de uma redução da capacidade de um gargalo congestionado em relação à sua capacidade nominal, sem que o fluxo esteja sendo influenciado por congestionamento a jusante na rodovia (Cassidy e Bertini, 1999; Banks, 1990; Hall e Agyemang-Duah, 1991). A magnitude da queda de capacidade varia caso a caso, mas tipicamente o fluxo observado no gargalo quando congestionado é cerca de 10% menor do que o fluxo observado antes do congestionamento (Chung *et al.*, 2007). Portanto, entender os mecanismos deste fenômeno é essencial para que se possa evitá-lo ou, ao

menos, mitigá-lo.

Ainda que as primeiras observações da queda de capacidade tenham ocorrido ainda na década de 1950 (Edie e Foote, 1959; Edie e Foote, 1960), o motivo pelo qual esse fenômeno ocorre ainda é uma questão aberta. Gazis e Foote (1969) quando reportaram um sistema de controle para regular o fluxo de entrada no tunel Lincoln em Nova York, afirmaram que a queda de capacidade ocorre “em grande parte pelo fato que a maioria dos carros não aceleram eficientemente depois de parar ou apenas reduzir de velocidade” (Gazis e Foote, 1969, p. 256). Em outras palavras, ao cruzar o gargalo os veículos movem de uma seção congestionada com velocidades relativamente baixas e após cruzar o gargalo podem alcançar velocidades próximas à velocidade crítica (para a qual o fluxo é máximo). Porém, como a aceleração é limitada, os veículos não conseguem cruzar o gargalo na velocidade crítica e portanto o fluxo observado é inferior ao da capacidade nominal, isto é, daquele observado quando o gargalo não está congestionado (Lebacque, 2003).

O processo de troca de faixas em torno do gargalo é outro mecanismo postulado para ocorrência da queda de capacidade (Laval e Daganzo, 2006). Por meio de dados empíricos, já foi mostrado que quanto maior o número de troca de faixas, menor o fluxo no gargalo (Jin, 2010). Especificamente para pontos de inserção de rampa de acesso, Leclercq, Laval *et al.* (2011) propuseram um modelo que combina o efeito da troca de faixas e da aceleração limitada. De acordo com esse modelo, para altas demandas os veículos da rampa se inserem na rodovia em baixas velocidades. Assim, causam uma redução de velocidade na área de inserção. Uma vez com velocidade reduzida, a capacidade não é atingida devido à aceleração limitada dos veículos. Outros estudos também já relacionaram a queda de capacidade com o comportamento heterogêneo dos motoristas (Leclercq, Knoop *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2014). Portanto, há ao menos três causas que poderiam explicar a redução de fluxo quando o gargalo se congestiona, aceleração limitada, comportamento de troca de faixas e heterogeneidade dos motoristas.

Essa falta de consenso com relação às causas deste fenômeno reflete-se em diferentes abordagens para reproduzir o fenômeno da queda de capacidade por modelos de simulação de tráfego. Restringindo-se a modelos macroscópicos de tráfego, há duas família de modelos que podem reproduzir tal fenômeno: (i) modelos de primeira ordem derivados do modelo de Lighthill-Whitham-Richards (LWR) (Lighthill e Whitham, 1955; Richards, 1956), e (ii) modelos de segunda ordem, notadamente aqueles baseados no modelo de Payne-Whitham (Payne, 1971). Quanto ao primeiro grupo, uma das deficiências conhecidas do modelo LWR é exatamente não conseguir capturar o fenômeno da queda de capacidade em sua formulação clássica. O modelo LWR apropriadamente reproduz o surgimento do congestionamento no gargalo, porém o fluxo de saída do gargalo permanece constante - a capacidade nominal - para qualquer nível de congestionamento (densidade acima da crítica no diagrama fundamental), portanto não modelando nenhuma redução no fluxo em função do congestionamento a montante. No entanto, várias extensões foram propostas para que modelos de primeira ordem (similares ao LWR) possam reproduzir a queda de fluxo observado em gargalos congestionados. Kontorinaki *et al.* (2017) fizeram uma revisão da literatura, calibraram, e validaram seis modelos de primeira ordem que incorporam modificações para reproduzir a queda de capacidade baseados em diferentes princípios. Por outro lado, modelos de segunda ordem, como por exemplo Payne-Whitham (Payne, 1971), podem reproduzir a queda de capacidade com um ajuste adequado dos parâmetros dos respectivos modelos. Por esse motivo, modelos de segunda ordem têm sido usados largamente

para validação de técnicas de controle de tráfego em rodovias, como controle de rampas de acesso (Papageorgiou e Kotsialos, 2002) e limite variável de velocidades (Carlson *et al.*, 2011). Kontorinaki *et al.* (2017) também compararam os modelos de primeira ordem com o modelo de segunda ordem METANET (Messmer e Papageorgiou, 1990). Este último teve desempenho superior a todos os modelos de primeira ordem avaliados.

É provável que o modelo METANET seja o mais utilizado para aplicações em que capturar o fenômeno de capacidade é essencial, como aplicações de controle de tráfego. No entanto, há pouca discussão na literatura sobre quais são os parâmetros chave do modelo METANET para que seja possível reproduzir este fenômeno adequadamente. Entender a influência e a relevância de cada parâmetro do modelo pode fornecer evidências sobre o mecanismo dominante na queda de capacidade. Em particular, o modelo METANET inclui termos que refletem dois dos mecanismos citados como possíveis causas da queda de capacidade: (i) a aceleração limitada é capturada pela dependência espacial de densidade e velocidade nas equações dinâmicas de velocidade; e (ii) o efeito do fluxo da rampa de acesso, de forma similar aos modelos de Leclercq, Laval *et al.* (2011), é capturado com uma redução na velocidade em função do fluxo proveniente da rampa de acesso.

Neste trabalho, propomos a calibração multiobjetivo (Deb, 2001) do modelo METANET para quantificar os impactos relativos dos dois mecanismos citados (aceleração limitada e efeito da rampa de acesso) da queda de capacidade em gargalos próximos à rampas de entrada. A abordagem multiobjetivo é utilizada quando não é trivial definir uma única métrica (função objetivo) que consiga capturar todos os aspectos do modelo a ser calibrado. No caso específico deste trabalho, as métricas definidas nesse tem por objetivo que o modelo calibrado reproduza dados de campo em dois pontos diferentes da rodovia: densidade (congestionamento) a montante do gargalo e o fluxo observado a jusante do gargalo. Ao contrário do caso de objetivo único, em que a saída do processo de calibração é um único conjunto de parâmetros que minimiza a função objetivo, a saída do processo de calibração no caso multiobjetivo é formada por múltiplos conjuntos de parâmetros. Isto permite uma comparação com maior nível de detalhe entre os modelos através dos conjuntos de Pareto ou curvas de compromisso. Além disso, o múltiplo conjunto de parâmetros permite analisar outros aspectos do modelo como a incerteza e a correlação entre parâmetros.

Este texto está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, o modelo METANET e o método de calibração empregado são apresentados. Na Seção 3 os resultados são apresentados e discutidos. As conclusões são apresentadas na Seção 4.

## **2. MODELO DE TRÁFEGO E MÉTODO DE CALIBRAÇÃO**

O desenvolvimento deste trabalho depende de dois componentes principais, um modelo de tráfego de segunda ordem e um método de calibração, detalhados a seguir.

### **2.1. Modelo de Tráfego**

Neste trabalho foi usado o modelo de fluxo de tráfego veicular de segunda ordem METANET (Messmer e Papageorgiou, 1990). Essencialmente, o METANET é uma discretização do modelo de Payne-Whitam (Payne, 1971) com uma série de adaptações para que o modelo se comporte de forma consistente em diversos cenários.

No METANET, a dimensão temporal  $t$  é discretizada em passos indexados por  $i$  de duração  $T$  tal que  $t = iT$ . Cada porção homogênea da rodovia é considerada um arco  $m$  com  $\lambda_m$  faixas de rolamento. Cada arco é dividido em segmentos de comprimento  $L_m$ . As variáveis de estado em cada segmento  $j$  do arco  $m$  são a densidade  $\rho_{m,j}(i)$  e a velocidade  $v_{m,j}(i)$ , enquanto  $q_{m,j}(i)$  é o fluxo do segmento  $j$  para o segmento  $j + 1$ . O equacionamento básico para cada segmento é o seguinte:

$$\rho_{m,j}(i+1) = \rho_{m,j}(i) + \frac{T}{L_m \lambda_m} [q_{m,j-1}(i) - q_{m,j}(i)] \quad (\text{Conservação de massa}), \quad (1a)$$

$$v_{m,j}(i+1) = v_{m,j}(i) + \frac{T}{\tau} [V_m(\rho_{m,j}(i)) - v_{m,j}(i)] + \frac{T}{L_m} v_{m,j}(i)(v_{m,j-1}(i) - v_{m,j}(i)) - \frac{\nu T (\rho_{m,j+1}(i) - \rho_{m,j}(i))}{\tau L_m [\rho_{m,j}(i) + \kappa]} \quad (\text{Equação de velocidade}), \quad (1b)$$

$$q_{m,j}(i) = \rho_{m,j}(i) v_{m,j}(i) \lambda_m \quad (\text{Continuidade}), \text{ e} \quad (1c)$$

$$V_m(\rho_{m,j}(i)) = v_{f,m} \exp \left[ - \frac{1}{a_m} \left( \frac{\rho_{m,j}(i)}{\rho_{cr,m}} \right)^{a_m} \right] \quad (\text{Diagrama Fundamental}), \quad (1d)$$

em que  $\tau$  (constante de tempo),  $\nu$  (constante de antecipação) e  $\kappa$  (dimensão de densidade) são parâmetros globais a serem determinados. O diagrama fundamental (especificado como velocidade-densidade) de cada arco,  $V_m$ , é especificado em função de três parâmetros:  $a_m$  (fator de escala do diagrama fundamental),  $v_{f,m}$  (velocidade de fluxo livre) e  $\rho_{cr,m}$  (densidade crítica). A combinação desses três parâmetros define a capacidade da via:

$$q_{cap,m} = v_{f,m} \rho_{cr,m} \exp \left( - \frac{1}{a_m} \right). \quad (2)$$

As Equações (1)–(2) determinam o modelo dinâmico dos arcos. Cada arco é uma conexão entre dois nós e, dependendo da configuração do nó, os fluxos no primeiro e último segmentos são determinados pelos modelos de nós que não são detalhados neste artigo (ver Messmer e Papageorgiou (1990)). Porém, nos arcos em que há a inserção de uma rampa de acesso, limitada sempre ao primeiro segmento de um arco, o efeito do fluxo da rampa,  $q_r(i)$ , leva a um decréscimo de velocidade desse segmento:

$$\Delta v_m^r(i) = \frac{\delta T}{L_m \lambda_m} \frac{q_r(i) v_{m,1}(i)}{\rho_{m,1}(i) + \kappa}, \quad (3)$$

onde  $\delta$  é um parâmetro que pesa a influência do fluxo da rampa na velocidade na rodovia. A velocidade obtida pela Equação 1b é subtraída de  $\Delta v_m^r(i)$  para o primeiro segmento. Ou seja, quanto maior o fluxo pela rampa, menor será a velocidade naquele segmento e, por consequência, o fluxo.

METANET possui tratamento similar à influência de rampa para o caso de estreitamento de

faixas. Neste caso, a redução de velocidade é proporcional à redução de número de faixas:

$$\Delta v_m^\lambda(i) = \frac{\phi T}{L_m} \frac{\Delta \lambda \rho_{m,1}(i)}{\rho_{cr,m}} (v_{m,1}(i))^2, \quad (4)$$

onde  $\Delta \lambda$  é o número de faixas reduzidas e  $\phi$  é um parâmetro que pondera a influência do estreitamento de faixas na velocidade da rodovia.

## 2.2. Método de Calibração

A calibração é o processo para obter-se os parâmetros de um modelo de forma a reproduzir os dados obtidos em campo. Especificamente para o caso estudado, o modelo deve reproduzir os dados coletados na área do gargalo e a jusante dele quando submetido às demandas observadas a montante e na rampa de acesso próxima ao gargalo.

Seja  $x_q$  uma medida particular observada em um local específico com  $q = 1, \dots, Q$  e  $Q$  o número de medidas. Assumidos que estas medidas estão disponíveis nos mesmos passos de simulação do modelo de tráfego  $i, i = 1, \dots, I$  com  $I$  o número total de amostras em cada medida. Uma amostra particular  $x_q(i)$  refere-se ao valor de  $x_q$  no passo  $i$ , enquanto  $\mathbf{x}_q$  é o vetor de todas as medidas em  $q$  do passo 1 ao passo  $I$ . Por outro lado, o modelo tem  $J$  parâmetros a serem estimados, com  $p_j$  o  $j$ -ésimo parâmetro,  $j = 1, \dots, J$ . Assume-se que os parâmetros devem estar no intervalo  $p_j^{\min}$  e  $p_j^{\max}$ .

Com base em uma parametrização específica (isto é, valores  $p_j$  para  $j = 1, \dots, J$ ) pode-se obter a predição da variável  $\hat{x}_q(i)$  ( $\hat{\mathbf{x}}_q(i)$  o vetor dos valores de  $\hat{x}_q(i)$  para todo  $i$ ) assumindo um modelo de tráfego específico. Assumindo uma função  $f(p_1, \dots, p_J)$  que implementa um modelo de tráfego (no caso específico deste trabalho,  $f$  está relacionado ao modelo METANET apresentado na seção anterior) para os valores de parâmetros  $p_j$ , a medida de desempenho do modelo de tráfego é dada por  $J_m(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_Q, \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_Q)$ ,  $m = 1, \dots, M$  com  $M$  o número de saídas do modelo. Tradicionalmente em aplicações de simulações de tráfego,  $J_m$  está relacionado com a diferença entre o valor obtido pela predição e o valor observado de fluxo e densidade no gargalo. No entanto, outras métricas podem ser definidas.

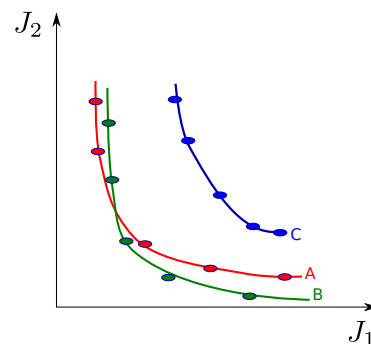
Formalmente, o processo de calibração procura resolver o seguinte problema de otimização multiobjetivo:

$$\begin{aligned} & \min_{p_1, \dots, p_J} J_m(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_Q, \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_Q), \quad m = 1, \dots, M \\ & s.a. \\ & \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_Q = f(p_1, \dots, p_J) \\ & p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max}, \quad j = 1, \dots, J. \end{aligned} \quad (5)$$

Portanto, o problema de calibração procura minimizar múltiplas métricas de desempenho  $J_m$  ajustando os valores  $p_j$  em seus respectivos intervalos. A abordagem multi-objetivo é apropriada quando as métricas de desempenho  $J_m$  são conflitantes: o ajuste dos parâmetros  $p_j$  pode levar à redução de uma métrica de desempenho em detrimento de outras. A solução deste problema de otimização não é um ponto de dimensão  $J$  como na abordagem de objetivo único. A solução é

um hiperplano (uma reta no caso de dois objetivos, uma superfície no caso de três objetivos, etc) no espaço das funções objetivo comumente chamado de conjunto de Pareto. No caso de métodos numéricos, a saída da calibração é um conjunto de pontos que aproxima esse hiperplano.

A Figura 1 exemplifica o resultado de calibração de três modelos (A,B e C) para o caso  $M = 2$ . As linhas contínuas representam hipoteticamente a fronteira de Pareto do problema. Os pontos em cada reta representam os pontos resultantes da solução do problema de calibração multi-objetivo. Observe que em cada uma das curvas a redução da função objetivo em um eixo sempre ocorre em detrimento de um aumento da função objetivo no outro eixo. Um modelo é melhor quanto mais próximo ele estiver da origem. Veja que neste caso não pode-se atestar que o modelo A é melhor que B ou o contrário, já que as linhas se interceptam. Isto quer dizer que caso a abordagem de objetivo único fosse aplicada como uma combinação dos objetivos, por exemplo,  $J = w_1 J_1 + w_2 J_2$ , para avaliar o desempenho de cada modelo, os resultados poderiam ser contraditórios dependendo da escolha de  $w_1$  e  $w_2$ . No entanto, isso não ocorreria caso qualquer um dos modelos A ou B fosse comparado ao modelo C. Assim, por mostrar o desempenho do modelo sob diferentes aspectos, a abordagem multiobjetivo é mais apropriada para comparação de modelos.



**Figura 1:** Fronteira de Pareto para  $M = 2$ ; as linhas representam o conjunto enquanto os pontos são pontos específicos desta curva.

Vários algoritmos podem ser aplicados para obter a solução do Problema 5. Neste estudo utiliza-se o algoritmo *Differential Evolution* (Storn e Price, 1997) com a extensão para múltiplos objetivos (Robi e Filipi, 2005). Detalhes específicos da implementação utilizada podem ser obtidos de Souza (2019a).

### 3. CONFIGURAÇÃO E RESULTADOS

O modelo de tráfego METANET é calibrado usando o método multiobjetivo com dados de campo de um trecho de uma rodovia em que o fenômeno de queda de capacidade ocorre rotineiramente. Nas subseções seguintes são apresentados respectivamente a infraestrutura viária e a preparação dos dados, os cenários de calibração e os resultados obtidos.

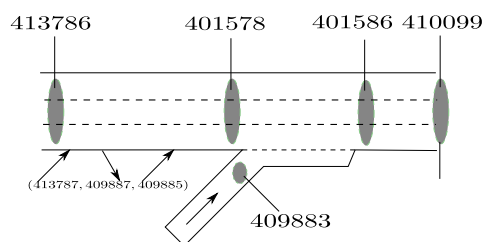
#### 3.1. Infraestrutura viária e preparação dos dados

Dados de um trecho de rodovia extraídos do banco de dados PeMS (Choe *et al.*, 2002), mantido pela agência de transportes do estado da Califórnia nos Estados Unidos, foram utilizados neste estudo. Um esquemático do trecho com a localização dos pontos de medição está ilustrado na Figura 2 com os respectivos identificadores no sistema PeMS. A contagem líquida (somatório das contagens da rampas de acesso subtraído das contagens das rampas de saída em cada passo)

dos detectores a montante do gargalo (isto é, com exceção do detector 409883) foram adicionados à demanda a montante (detector 413786 na Figura 2).

Observe que a demanda na rodovia é introduzidas em um ponto a montante do gargalo. As demandas, pela rodovia e rampa, são estimadas com base no fluxo observado nos respectivos detectores. No entanto, observe que quando o detector a montante do gargalo está congestionado, há um considerável número de veículos a montante do detector que não são observados ("contados") até que atravessem este detector - mas que teriam atravessado o gargalo caso as condições permitissem. Portanto, as contagens do detector 401578 não reflete o padrão de demanda daquele ponto. Desta forma, introduzindo a demanda a montante do gargalo garantimos que o padrão de demanda não tenha interferência da capacidade do gargalo.

Os dados contêm contagem e ocupação por faixa em passos de 30 segundos. Para calibração, as amostras foram agregadas em passos de 3 minutos. Além disso, os dados foram pré-processados para consistência entre os quatro detectores da rodovia aplicando o método proposto por Souza (2019b). Os dados utilizados são do pico da manhã dos dias 1º e 13 de março de 2017.



**Figura 2:** Esquemático do trecho estudado.

Os parâmetros calibrados e os respectivos valores mínimos e máximos estipulados são:  $\tau \in [10, 30]$  s,  $\kappa \in [10, 50]$  veh/km,  $v_{\min} \in [2, 10]$  km/h,  $v \in [14, 80]$  km<sup>2</sup>/h,  $q_{\text{cap}} \in [1700, 2500]$  veh/h/lane,  $\rho_{\text{cr}} \in [25, 40]$  veh/km.

### 3.2. Cenários de Calibração

Duas métricas de desempenho são consideradas:

$$J_d = \sum_{\forall i} (\rho_1(i) - \hat{\rho}_1(i))^2, \quad (\text{Erro de densidade})$$

$$J_c = \sum_{\forall i} (N_2(i) - \hat{N}_2(i))^2 \quad (\text{Erro de fluxo cumulativo}), \quad (6)$$

em que  $N_2$  se refere à contagem cumulativa do segmento a jusante, calculada como  $N_2(i) = \sum_{u=1}^{i-1} q_2(u)$  com  $q_2$  a contagem do segmento 2, obtido através do detector 401586; e  $\rho_1$  se refere à densidade no segmento a montante e que é estimada baseada na ocupação do detector 401578 baseado na seguinte relação:

$$\rho_1 = \frac{o_1}{G}, \quad (7)$$

onde  $o_1$  é a ocupação observada e  $G$  é o comprimento efetivo dos veículos (inclui o comprimento do detector e do veículo). O valor  $G = 5.8m$  foi assumido com base nas estimativas do sistema

PeMS para o pico da manhã naquele detector.

Os fluxos e densidades simulados na Eq. (6) são obtidos do segmento correspondente no modelo de simulação. Duas modelagens são testadas:

- modelagem do gargalo como estreitamento de faixas (METANET-RF): a área do gargalo é modelada como um segmento contendo número de faixas  $3 \leq \lambda_1 \leq 4$  e portanto considerando o termo de influência de estreitamento de faixa (Eq. (4)). O termo de influência do estreitamento de faixas  $\phi$  é estipulado no intervalo  $\phi \in [0, 2]$ . Nesse caso não consideramos a influência da rampa (isto é,  $\delta = 0$ ).
- modelagem tradicional (METANET): neste caso o segmento conectando a rampa possui 3 faixas (isto é  $\lambda_1 = 3$ ) e portanto a influência de estreitamento de faixa (Eq.(4)) não é considerada uma vez que  $\Delta\lambda = 0$ . Por outro lado, o termo de influência da rampa (3) é considerado e o parâmetro  $\delta$  é estipulado no intervalo  $\delta \in [0, 60]$ .

A questão que tentamos responder comparando ambos os casos é a significância do efeito de rampa (Eq. 3) no fenômeno de queda de capacidade. Em um estudo recente, atribuiu-se a vantagem do METANET sobre modelos de primeira ordem ao comportamento de antecipação, aceleração e tempo de reação dos motoristas (Kontorinaki *et al.*, 2017)[Página 66]. No entanto, a parametrização sugerida naquele estudo contém valor de  $\delta$  (veja Eq. (3)) diferente de zero porém a influência deste parâmetro nos resultados não foram discutidos. Observe que a modelagem como estreitamento de faixas também leva em consideração os três aspectos apontados por (Kontorinaki *et al.*, 2017).

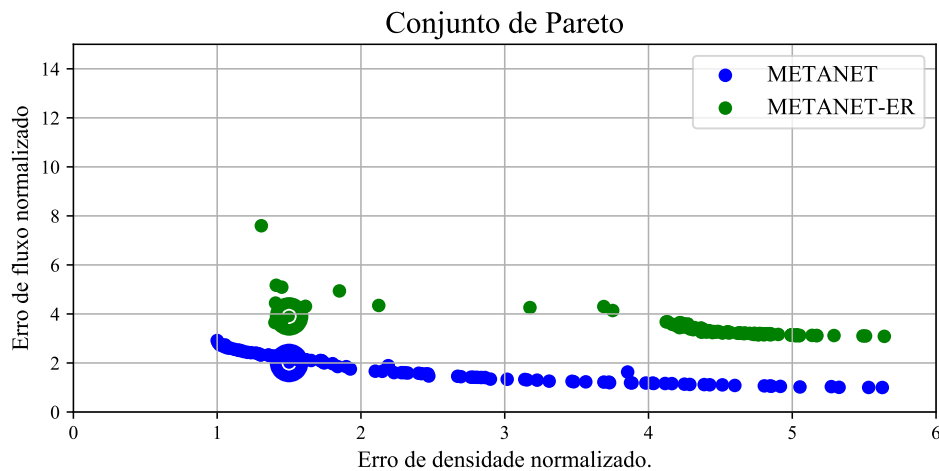
São utilizados dados entre 6h e 11h da manhã de dois dias diferentes. Considerando 20 amostras por hora (após a agregação dos dados em passos de 3 minutos), o problema de calibração tem  $I = 200$ ,  $J = 9$  (10 para a modelagem por estreitamento de faixas),  $M = 2$ ,  $Q = 2$  (contagem a jusante e densidade a montante).

### 3.3. Resultados

A Figura 3 mostra o conjunto de Pareto para os dois casos. Os pontos em verde são associados ao caso de modelagem por estreitamento de faixa e os pontos em azul são associados com o modelo tradicional. Cada ponto nesse gráfico representa uma parametrização candidata, isto é, um conjunto de parâmetros  $p_1, \dots, p_J$  que induz ao respectivo erro de densidade (eixo x) e de fluxo cumulativo (eixo y). Observe que a modelagem tradicional consegue atingir erros de fluxo cumulativo substancialmente menores que a modelagem por estreitamento de faixas para valores similares de erros de densidade.

O melhor desempenho da modelagem tradicional também é claro quando analisamos as séries temporais para cada caso. Como a saída do algoritmo contém múltiplas parametrizações devemos avaliar uma ou múltiplas parametrizações candidatas. Em geral busca-se parametrizações fora da região de compromisso do conjunto de Pareto. A região de compromisso seria onde há significativa variações nos objetivos ao longo dos dois eixos enquanto fora desta região há significativa redução de um objetivo sem comprometer significativamente o outro objetivo. Por exemplo, na Figura 3 a pontos verdes (modelo METANET-ER) com erro de densidade normalizado em torno de 6 e erro de fluxo normalizado em torno de 3.5. Porém, observe que há soluções com erros de densidade significativamente menores (em torno de 1.5) sem que o erro



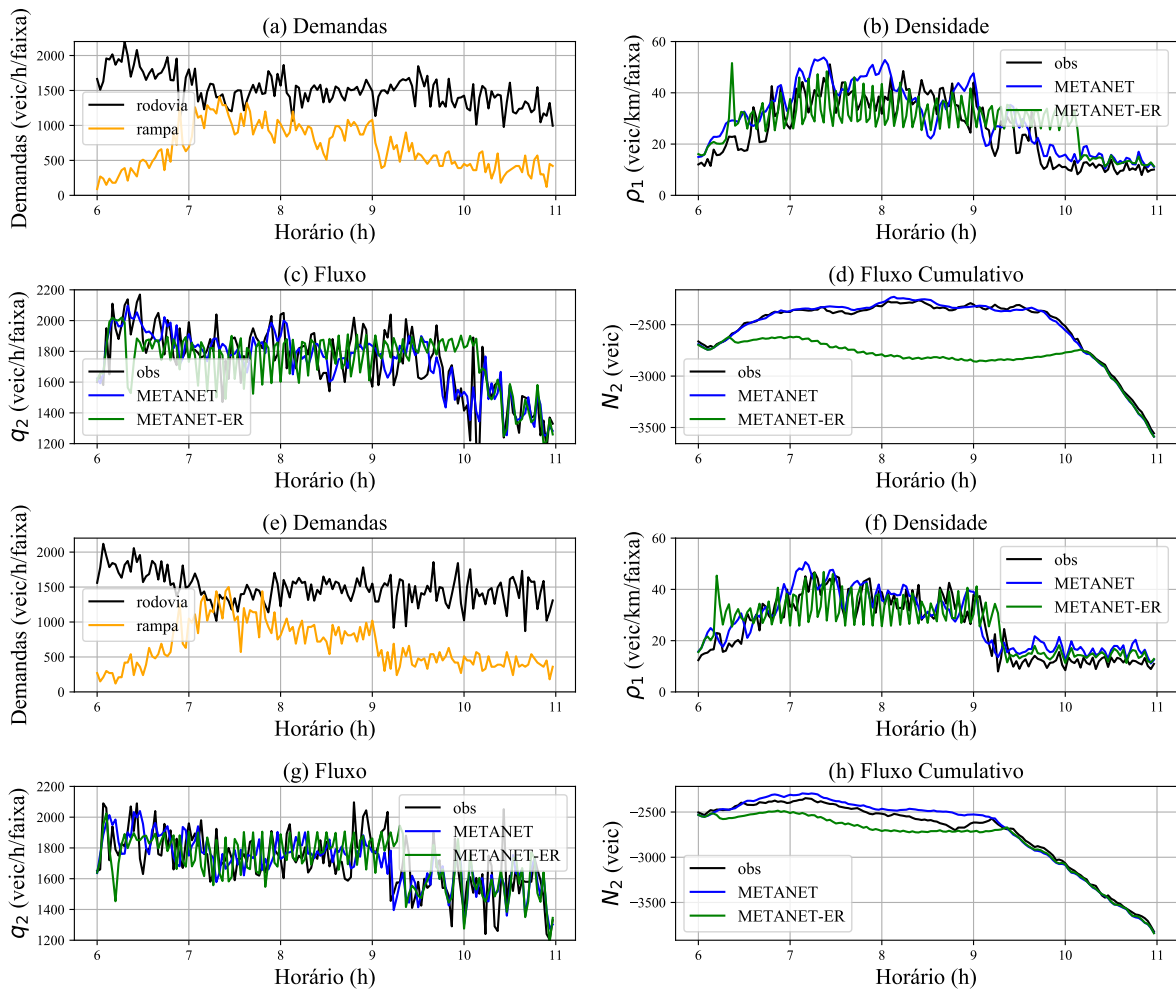


**Figura 3:** Conjunto de Pareto para os dois cenários com os pontos em verde representando o modelo restrito e os pontos em azul modelo completo.

de fluxo cumulativo aumente consideravelmente. Portanto, analisamos uma parametrização em torno desta área. Para o caso da modelagem tradicional, utilizamos uma parametrização que possui erros de densidade similar. Estas duas parametrizações estão destacadas na Figura 3.

As séries temporais são apresentados na Figura 4. Em todos os gráficos as linhas pretas são relacionadas aos dados reais (observados pelos sensores), as linhas azul à modelagem tradicional do METANET e a linha verde à modelagem por estreitamento de faixa. Gráficos (a), (b), (c) e (d) mostram para o dia 1º de março de 2017, respectivamente, as demandas, a densidade a montante do gargalo, o fluxo pelo gargalo e o fluxo cumulativo em coordenadas oblíquas (Cassidy e Windover, 1995; Cassidy e Bertini, 1999) para fluxo base  $q_0 = 5400$  veh/h (isto é, esta curva cresce para fluxos maiores que  $q_0$ , se mantém constante para fluxos iguais a  $q_0$ , e decresce quando o fluxo é menor). Os gráficos (e), (f),(g) e (h) mostram as mesmas séries para o dia 13 de março. A modelagem por estreitamento de faixas consegue reproduzir em algum grau a queda de capacidade. Em ambos os dias, há uma significativa queda de fluxo em torno de 7h da manhã para o caso da modelagem por estreitamento de faixas, porém observe o fluxo observado (linhas pretas) é significativamente maior entre 6 e 8 da manhã levando a um grande disparidade entre as curvas de fluxo cumulativo da modelagem por estreitamento de faixas e o fluxo observado. Por outro lado, a modelagem METANET tradicional acompanha a curva de fluxo cumulativo apropriadamente durante todo o período.

Considerando o conjunto de Pareto, onde a modelagem tradicional apresenta erros significativamente menores, e as séries temporais apresentados na Figura 4, sugere significativa influência do fluxo da rampa no fenômeno de queda de capacidade. Ainda que pareça intuitivo, reforçamos mais uma vez que frequentemente atribuí-se ao fato de o METANET reproduzir melhor o fenômeno de queda de capacidade devido ao comportamento de aceleração (capturado com dependencia espacial na equação de velocidade), tempo de reação (influenciado pelo parâmetro  $\tau$ ) e antecipação (influenciado pelo parâmetro  $\nu$ ). A modelagem por estreitamento por queda de faixas contém todos estes elementos, porém não consegue reproduzir de forma adequada os dados de campo. Por outro lado, a influência da rampa é o único fator considerado na modelagem tradicional que não é considerado na modelagem por estreitamento de faixas. Os resultados mostram que esta modelagem consegue reproduzir melhor os dados observados. Portanto, isto



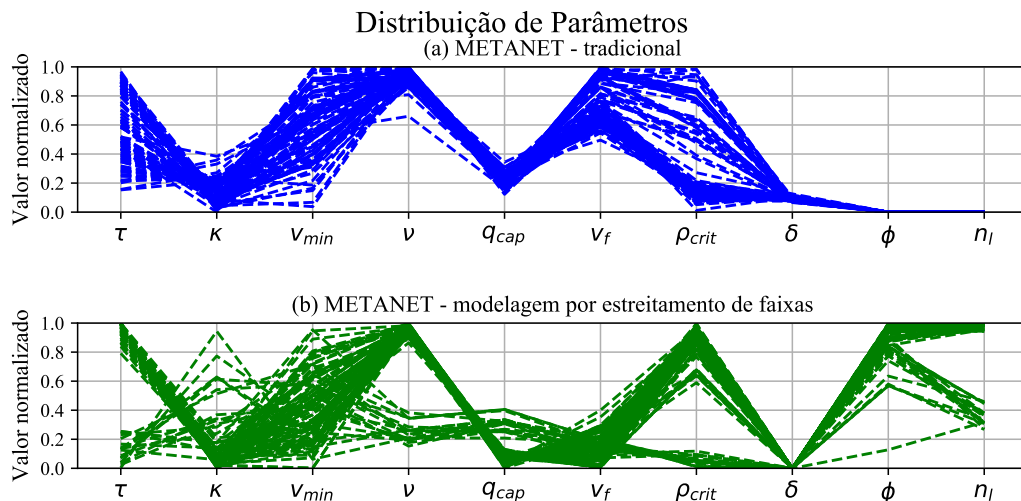
**Figura 4:** Série temporal de uma das soluções de cada caso: gráfico (a) mostra a demanda da rampa e rodovia para o dia 1º de março de 2017, gráfico (b) mostra a densidade na rodovia, gráfico (c) o fluxo a jusante e gráfico (d) o fluxo a jusante em coordenadas oblíquas. Gráficos (e), (f), (g) e (h) mostram as mesmas curvas para o dia 13 de março de 2017. Em todas as curvas verde está relacionado ao modelo restrito e azul ao modelo completo.

sugere um papel importante da rampa de acesso no fenômeno de queda de capacidade.

Por último, cabe discutir a distribuição de parâmetros. A Figura 5 mostra a distribuição de parâmetros de todas as parametrizações dos dois casos com valores de parâmetros normalizados entre 0 e 1, com zero representando  $p_j^{\min}$  e um representando  $p_j^{\max}$  para o respectivo parâmetro. Cada linha é associada a uma solução do conjunto de Pareto mostrado na Figura 3. O primeiro gráfico mostra os valores para a modelagem tradicional e o segundo gráfico para a modelagem por estreitamento de faixas. Em uma primeira análise, ambas as modelagens apresentam significativa variação de parâmetros, especialmente com relação  $\kappa$  e  $v_{min}$ . Isto sugere que fixar estes parâmetros não levaria a uma piora dos resultados. Na modelagem por estreitamento de faixas os resultados se dividiram em dois grupos com valores distintos de  $v$  e  $\rho_{crit}$ .

Observe que a modelagem tradicional apresenta valores maiores de capacidade ( $q_{cap}$ ) comparado à modelagem por estreitamento de faixas. Isto significa que a modelagem tradicional permite

um valor de capacidade maior, o que permite reproduzir o fluxo de mais de 2000 veh/h que ocorre em torno das 7h da manhã nos dois dias avaliados. A modelagem por estreitamento de faixas não consegue atingir o mesmo fluxo uma vez que o valor de capacidade é menor. O aumento do valor de capacidade não necessariamente levaria a um melhor desempenho. Se por um lado poderia permitir fluxos maiores, por outro o congestionamento não ocorreria porque a demanda seria menor que a capacidade e não haveria congestionamento na área. No caso da modelagem tradicional, o congestionamento ocorre devido à influência da rampa e podemos observar que o valor do parâmetro  $\delta$  é diferente de zero em todas as parametrizações deste caso.



**Figura 5:** Distribuição de parâmetros para cada caso. O gráfico (a) mostra os resultados para o modelo restrito e o gráfico (b) para o modelo completo. Cada linha representa cada uma das soluções obtidas. Todos os valores são normalizados entre 0 e 1.

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados da calibração do modelo METANET para um gargalo foram apresentados. Os resultados sugerem um papel importante do fluxo da rampa no fenômeno do fluxo de capacidade, corroborado por (i) erros significativamente menores no modelo que considera redução de velocidade devido ao fluxo na rampa e (ii) pelo termo  $\delta$  ser significativo em todas as parametrizações candidatas como pode ser observado nos resultados do procedimento de calibração.

Para trabalhos futuros, será considerada também uma comparação dos resultados com modelos de primeira ordem de queda de capacidade.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos sob o Programa SMART (Systems and Modeling for Accelerated Research in Transportation (SMART) Mobility Laboratory Consortium) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banks, J. H. (1990) Flow Processes at a Freeway Bottleneck. *Transportation Research Record*, n. 1287.
- Carlson, R. C.; I. Papamichail e M. Papageorgiou (2011) Local Feedback-based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, p. 1261–1276.

- Cassidy, M. J. e R. L. Bertini (1999) Some Traffic Features at Freeway Bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 33, n. 1, p. 25–42.
- Cassidy, M. J. e J. R. Windover (1995) *Methodology for assessing dynamics of freeway traffic flow*. 1484.
- Chen, D.; S. Ahn; J. Laval e Z. Zheng (2014) On the periodicity of traffic oscillations and capacity drop: the role of driver characteristics. *Transportation research part B: methodological*, v. 59, p. 117–136.
- Choe, T.; A. Skabardonis e P. Varaiya (2002) Freeway performance measurement system: operational analysis tool. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1811, p. 67–75.
- Chung, K.; J. Rudjanakanoknad e M. J. Cassidy (2007) Relation Between Traffic Density and Capacity Drop at Three Freeway Bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 41, n. 1, p. 82–95.
- Deb, K. (2001) *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Vol. 16. John Wiley & Sons.
- Edie, L. C. e R. S. Foote (1960) Effect of Shock Waves on Tunnel Traffic Flow. *Highway Research Board Proceedings*. v. 39,
- (1959) *Experiments in Single Lane Flow in Tunnels*. Port of New York Authority.
- Gazis, D. C. e R. S. Foote (1969) Surveillance and Control of Tunnel Traffic by an On-line Digital Computer. *Transportation Science*, v. 3, n. 3, p. 255–275.
- Hall, F. L. e K. Agyemang-Duah (1991) Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. *Transportation Research Record*, n. 1320.
- Jin, W.-L. (2010) A kinematic wave theory of lane-changing traffic flow. *Transportation research part B: methodological*, v. 44, n. 8-9, p. 1001–1021.
- Kontorinaki, M.; A. Spiliopoulou; C. Roncoli e M. Papageorgiou (2017) First-order Traffic Flow Models Incorporating Capacity Drop: Overview and Real-data Validation. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 106, p. 52–75.
- Laval, J. A. e C. F. Daganzo (2006) Lane-changing in Traffic Streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 40, n. 3, p. 251–264.
- Lebacque, J. (2003) Two-phase Bounded-acceleration Traffic Flow Model: Analytical Solutions and Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1852, p. 220–230.
- Leclercq, L.; V. L. Knoop; F. Marczyk e S. P. Hoogendoorn (2016) Capacity Drops at Merges: New Analytical Investigations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 62, p. 171–181.
- Leclercq, L.; J. A. Laval e N. Chiabaut (2011) Capacity Drops at Merges: An Endogenous Model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 17, p. 12–26.
- Lighthill, M. J. e G. B. Whitham (1955) On Kinematic Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proc. R. Soc. Lond. A*, v. 229, n. 1178, p. 317–345.
- Messmer, A. e M. Papageorgiou (1990) METANET: A Macroscopic Simulation Program for Motorway Networks. *Traffic Engineering & Control*, v. 31, n. 9.
- Papageorgiou, M. e A. Kotsialos (2002) Freeway Ramp Metering: An Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 3, n. 4, p. 271–281.
- Payne, H. J. (1971) Model of Freeway Traffic and Control. *Mathematical Model of Public System*, p. 51–61.
- Richards, P. I. (1956) Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, v. 4, n. 1, p. 42–51.
- Robi, T. e B. Filipi (2005) Differential Evolution for Multiobjective Optimization. *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer, p. 520–533.
- Souza, F. de (2019a) Calibration Procedure for Traffic Flow Models of Merge Bottlenecks. *Proceedings of the 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (Accepted Paper)*.
- (2019b) Freeway Loop Detector Data Reconciliation Based on Vehicle Conservation. *Procedia computer science (ANT-2019)*, v. Accepted Manuscript,
- Storn, R. e K. Price (1997) Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, n. 4, p. 341–359.

---

Felipe de Souza (fdesouza@anl.gov)

Argonne National Laboratory, Lemont, IL, 60439, Estados Unidos

Rodrigo Castelan Carlson (rodrigo.carlson@ufsc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina  
Florianópolis, SC, 88040-900, Brasil