

CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO DO MODELO DE *CAR-FOLLOWING* DO VISSIM PARA VIAS ARTERIAIS URBANAS

Victor Macêdo Lacerda
Manoel Mendonça de Castro Neto
Universidade Federal do Ceará
Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO

O software de microssimulação de tráfego VISSIM tem sido amplamente utilizado nas últimas duas décadas. O programa oferece ao usuário dois modelos de *car-following*, o W74 e o W99, ambos baseados no reconhecido modelo psicofísico de Wiedemann. O presente artigo tem como principal objetivo fazer uma discussão sobre pontos relevantes acerca da calibração do modelo de *car-following* do VISSIM para a modelagem do desempenho operacional do tráfego em vias arteriais. Inicialmente é apresentada uma discussão conceitual que compara o modelo originalmente proposto por Wiedemann com as versões incorporadas no microssimulador. Em seguida o artigo traz uma análise de sensibilidade que indica que o algoritmo W74 é mais adequado para modelar tempo de viagem e atraso para vias urbanas. Aspectos conceituais importantes sobre a metodologia de calibração como escolha dos parâmetros e das medidas de desempenho são discutidos. O modelo calibrado resultou em erros de estimação de tempo médio de viagem de até 7%.

ABSTRACT

The traffic microsimulation software VISSIM has been widely used over the past two decades. The software provides the user with two models of car-following, W74 and W99, both based on Wiedemann's psychophysical model. This paper aims to make a discussion of relevant points about the calibration of the VISSIM car-following algorithm for modelling traffic operations on urban arterials. Initially, a conceptual discussion that compares the model originally proposed by Wiedemann with its versions incorporated in microsimulator is presented. Then the paper shows a sensitivity analysis, which indicates that the W74 algorithm is the most appropriate for modeling travel times and delays for urban roads. Important conceptual aspects of the calibration methodology such as choice of the parameters and the performance measures are discussed. The calibrated model resulted in errors of average travel time estimation of up to 7%.

1. INTRODUÇÃO

Simulação microscópica tem sido amplamente empregada nas últimas décadas para a modelagem do tráfego urbano e rodoviário. Um dos principais microssimuladores disponíveis no mercado, o VISSIM (PTV, 2014) possui quatro modelos comportamentais – *car-following*, mudança de faixa, aceitação de brechas e escolha de rotas, cujos parâmetros precisam ser ajustados para melhor refletir a realidade de interesse.

Dentre os modelos comportamentais, o de *car-following* é o que tem atraído a maior atenção de pesquisadores e analistas, por este ser o modelo que representa os movimentos longitudinais da corrente de tráfego, exercendo assim forte influência em importantes variáveis de tráfego como densidade e velocidade média. Diversas questões fundamentais acerca da calibração do modelo de *car-following* para o tráfego interrompido permanecem passíveis de investigação, podendo-se citar as que motivaram este estudo: 1) Qual é a relação entre modelo de *car-following* proposto por Wiedemann (1974) e os modelos de *car-following* implementados no VISSIM: Wiedemann-74 (W74) e Wiedemann-99 (W99)? 2) Quais as diferenças entre os modelos de *car-following* W74 e W99 para modelagem de vias urbanas? 3) Quais parâmetros devem ser calibrados e qual medida de desempenho utilizar para a calibração? 4) Os parâmetros de *car-following* devem ser calibrados simultaneamente? 5) O modelo de *car-following* deve ser calibrado juntamente com os demais modelos comportamentais, ou isoladamente?

Este artigo tem como principal objetivo fazer uma discussão acerca da calibração do modelo

de *car-following* do software VISSIM, versão 6.0 (PTV, 2014), para a modelagem do tempo de viagem em vias arteriais urbanas. A discussão será embasada na modelagem de um trecho de via arterial localizado na cidade de Fortaleza.

2. O MODELO DE CAR-FOLLOWING DO VISSIM 6.0

Nesta seção serão apresentados os modelos de *car-following* proposto por Wiedemann (1974) e os modelos Wiedemann-74 (W74) e Wiedemann-99 (W99) do VISSIM. Serão discutidas as relações e as principais diferenças entre os três modelos.

2.1. O modelo de car following de Wiedemann

O modelo proposto por Wiedemann (1974) é um modelo do tipo psicofísico, em que o motorista seguidor responde aos estímulos do veículo líder com base na aparência da variação das dimensões do veículo líder. O modelo pode ser melhor compreendido por meio da Figura 1. O eixo das abscissas representa a diferença de velocidade ΔV entre os veículos seguidor e líder, e o eixo das coordenadas representa a distância entre eles (ΔX).

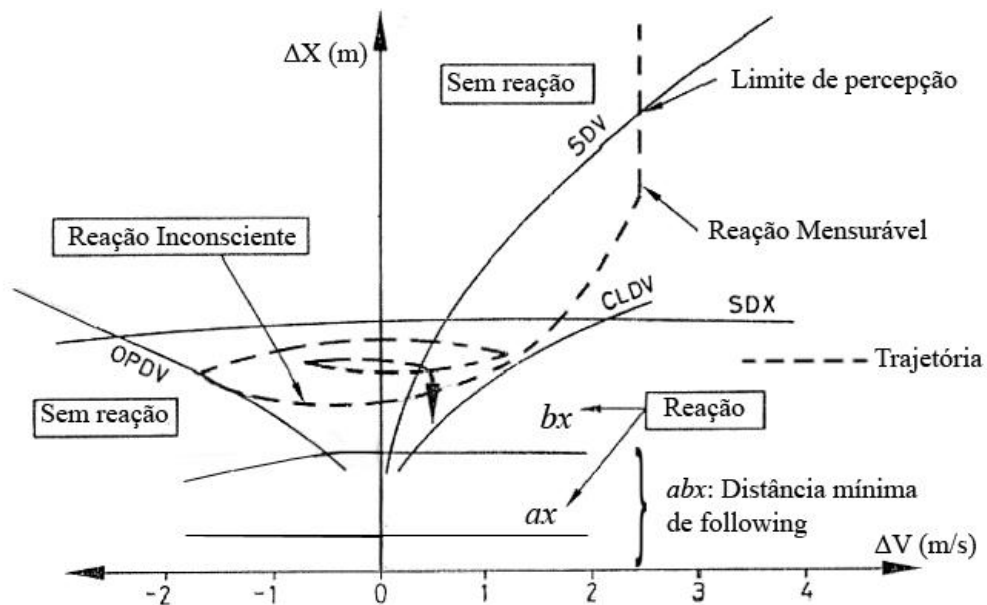


Figura 1: Modelo de *car following* de Wiedemann. (Adaptada de Wiedemann e Reiter, 1992)

Considere o veículo líder trafegando com velocidade constante ($v_{\text{líder}}$). O veículo seguidor se aproxima com velocidade aproximadamente constante (v_{seguidor}), o que significa que o ΔX vai diminuindo e o ΔV permanece aproximadamente constante. Ao cruzar o limite *sdv*, o veículo seguidor começa diminuir sua velocidade levemente, portanto ΔX continua diminuindo, mas de forma mais menos acentuada. O limite *SDV* – assim como os limites do modelo – impõem aos motoristas alguma ação de aceleração ou desaceleração, portanto são comumente chamados de pontos de ação (*action points*). O veículo seguidor continua diminuindo sua velocidade até que v_{seguidor} fique menor que $v_{\text{líder}}$. Ao perceber que o espaçamento para o veículo da frente começa a aumentar, o veículo seguidor retorna a acelerar próximo ao ponto de ação *OPDV*. A partir deste ponto, o módulo de ΔV começa a diminuir, mas o ΔX ainda aumenta, pois v_{seguidor} ainda é menor que $v_{\text{líder}}$. Quando v_{seguidor} passa a ser maior do que $v_{\text{líder}}$, ou seja, quando ΔV se torna positivo novamente, ΔX recomeça a diminuir, e o motorista continua a acelerar até chegar ao ponto de ação *CLDV*, quando ele então retira o pé do

acelerador. A partir deste ponto, o veículo seguidor ainda se aproxima do veículo líder (ΔX diminui), pois o ΔV ainda é positivo. Em seguida, o espaçamento começa a aumentar novamente quando ΔV se torna negativo, e o motorista reagirá no ponto de ação *OPDV* novamente. Este comportamento oscilatório se repete, caracterizando o regime de *following*,

O *headway* no estado de *following* varia entre o limite inferior $ax+bx$ (chamado de abx) e o limite superior sdx . O parâmetro ax significa o *headway* entre os veículos quando parados, e é dada por:

$$ax = L + ax_{add} + rndl(I) \cdot ax_mult \quad (1)$$

em que ax : distância entre os veículos quando parados em fila [m];
 L : comprimento do veículo [m];
 ax_add : fator aditivo de ax [m];
 ax_mult : fator multiplicativo de ax [m];
 $rndl[I]$: variável aleatória $N(0,5; 0,15)$, truncada entre 0 e 1 ;

O parâmetro bx , também chamado de distância de segurança, é a distância adicional deixada pelo veículo seguidor pelo fato deste estar em movimento, já que os *headways* aumentam com o aumento da velocidade. O bx dado pela seguinte equação:

$$bx = (bx_add + bx_mult \cdot rndl(I)) \cdot \sqrt{v} \quad (2)$$

em que bx : distância de segurança [m];
 bx_add : fator aditivo de bx ;
 bx_mult : fator multiplicativo de bx ;
 v : velocidade do líder enquanto houver aproximação dos veículos, e do veículo seguidor enquanto houver distanciamento [m/s];

Portanto, o modelo de Wiedemann considera que o *headway* mínimo de *following* ($abx = ax + bx$) aumenta com a raiz quadrada da velocidade. Valores altos de ax implicam em filas maiores. Valores altos de ax e bx implicam em distâncias mínimas de *following* maiores, portanto implicam em redução da capacidade viária.

2.2. Os algoritmos de car-following W74 e W99 do VISSIM

O VISSIM permite o usuário escolher entre dois modelos de *car-following*: o modelo Wiedemann-74 (W74) e o modelo Wiedemann-99 (W99). Ambos são baseados no trabalho de Wiedemann (1974). O manual indica que o W74 seja utilizado para o tráfego urbano e que o W99 seja empregado na modelagem do tráfego rodoviário, porém o documento não traz justificas para tal recomendação.

O parâmetro ax do modelo W74 tem basicamente o mesmo significado do ax de Wiedemann, porém eles se diferem em dois pontos. O primeiro é que o ax do simulador representa o espaçamento entre os veículos parados, e não o *headway*. A segunda diferença é que, apesar de não deixar explícito, o VISSIM adota o ax_mult igual a 1,0 m, constante e não passível de ser modificado pelo usuário. O valor *default* de ax é 2,0 m com uma variação segundo uma distribuição normal com desvio padrão 0,3 m, truncada entre os valores 1,0 m e 3,0 m. Esta variação diz respeito à geração dos valores de ax para os veículos da rede, e não a uma variação para o mesmo veículo—uma vez um veículo é gerado, seu valor de ax é constante durante toda a simulação.

A distância mínima de *following* (d) é dada pela soma de $ax + bx$, sendo bx idêntico ao bx

proposto por Wiedemann (Eq. 2). O valor *default* de *bx_add* é de 2,0 e de *bx_mult* é de 3,0. Como *d* representa o espaçamento entre os veículos no VISSIM e *abx* representa o *headway* dos veículos no trabalho de Wiedemann, tem-se que $abx = d - L$.

O W99 descreve *d* por meio de apenas dois parâmetros: CC0, que tem o mesmo significado de *ax* do W74, ou seja, a distância média entre veículos quando parados em fila, e CC1, que similarmente ao *bx* do W74, define o incremento da distância mínima de *following* devido aos veículos estarem em movimento ($d = CC0 + CC1 \cdot v$). Portanto, uma das principais diferenças entre os modelos W74 e W99 diz respeito à variação de *d* como função de *v*: enquanto no modelo W74 a variação é parabólica, no W99 ela é linear, como mostra a Figura 2, que foi elaborada com os parâmetros dos modelos em valores *default*. É importante perceber que o W74 implica em espaçamentos maiores para velocidades menores, o que é mais adequado para representar o tráfego urbano, já que nesta configuração espaçamentos maiores permitem mais aceitação de brechas. Vale notar que Wiedemann propôs a relação quadrática entre *bx* e *v*, e justificou afirmando que para velocidades maiores os motoristas tendem a sobre-estimar a distância de segurança, portanto taxa de crescimento de *d* diminui com o aumento de *v*.

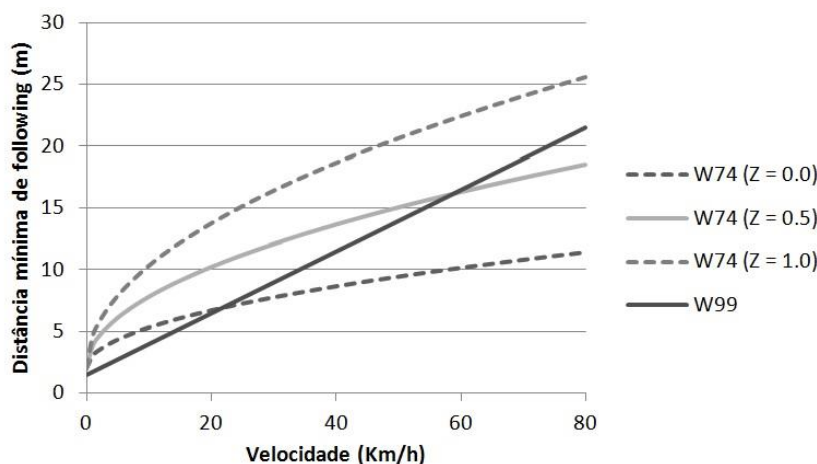


Figura 2: Relação entre distância mínima de *following* (*d*) e velocidade (*v*) para algoritmos de *car-following* W74 e W99 do VISSIM.

Outra diferença fundamental entre o W74 e o W99 do VISSIM é que o primeiro não permite o usuário definir valores para as demais variáveis do modelo de *car-following* de Wiedemann - *SDV*, *SDX*, *CLDV* e *OPDV*; tais parâmetros estão embutidos no algoritmo do W74 com valores *default*. Os usuários que precisam definir tais parâmetros devem utilizar o modelo W99, cujos parâmetros podem ser relacionados com os parâmetros originais de Wiedemann da seguinte forma.

O parâmetro CC2 determina a grandeza *sdx* do modelo de Wiedemann, ou seja, ele delimita o espaçamento máximo dos veículos em *following*. Assim, motoristas mais agressivos possuem CC2 menores. O valor *default* é 4,0 m, o que segundo o manual do *software* resulta num processo de *following* bem estável (PTV, 2014). Fellendorf e Vortisch (2010) afirmam que *SDX* (CC2) é geralmente 1,5 a 2,5 vezes o tamanho de *abx* (*d*). Com os parâmetros CC0, CC1 e CC2 em valores *default*, e com velocidade de 50km/h, o espaçamento entre os veículos no processo de *following* variará entre 14,0 m e 18,0 m.

O parâmetro CC3 refere-se ao parâmetro *SDV* de Wiedemann. Ele representa o momento em que o veículo começa a desacelerar devido à presença de um veículo a sua frente, iniciando a partir deste momento o processo de aproximação. Portanto, quanto menor o valor de CC3, mais tarde ele começará a diminuir a sua velocidade durante a aproximação. O valor *default* é de -8,0 s, ou seja, o veículo iniciará a desacelerar quando estiver a 8,0 s de atingir a distância de segurança.

Os parâmetros CC4 e CC5, adimensionais, definem os limites das diferenças de velocidades entre os veículos que determinam os momentos de retomada da aceleração e desaceleração do veículo seguidor no regime de *following*. Portanto, estão relacionados com as curvas *OPDV* e *CLDV* de Wiedemann. O manual sugere que os parâmetros tenham a mesma magnitude e sinais opostos, o que presume uma simetria no comportamento oscilatório de aceleração e desaceleração durante o regime de *following*. Os valores *default* destes dois parâmetros são -0,35 e +0,35, para CC4 e CC5, respectivamente. Quanto menor for o valor (em módulo) dos parâmetros, mais rápido responderá o motorista à variação de velocidade do veículo líder, ou seja, mais agressivo.

O parâmetro CC6 controla o efeito da distância de *following* na oscilação da velocidade do veículo seguidor. Quanto maior o valor de CC6, maior será o aumento da oscilação da velocidade com o aumento da distância de *following*. Seu valor *default* é 11,44 m/s². O valor 0 (zero) para este parâmetro resulta na oscilação da velocidade independente da distância de *following*, o que não é muito realista, já que veículos mais próximos tendem a variar menos a sua velocidade devido à atenção dada pelo seguidor aos estímulos do veículo líder e à maior dependência entre as velocidades dos veículos seguidor e líder (Lownes e Machemehl, 2006).

O manual do VISSIM versão 6.0 descreve o parâmetro CC7 apenas como a oscilação durante a aceleração. O manual da versão 5.4 é mais preciso, pois afirma que o parâmetro é a aceleração do veículo no regime de *following*, e tem como valor *default* 0,25 m/s² (PTV, 2012). Um valor alto de CC7 indica unidades veículos-motoristas que apresentam taxas de aceleração e desaceleração maiores.

O parâmetro CC8 representa a aceleração desejada do veículo quando ele parte do repouso e tem como valor *default* 3,5 m/s². Este parâmetro tem como limite a aceleração máxima definida pelas curvas de aceleração. O parâmetro CC9 é o valor da aceleração quando o veículo trafega a 80 km/h e também tem seu valor limitado pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração. Motoristas agressivos possuem CC8 e CC9 elevados.

2.3. Estudos existentes de calibração

Atestar com precisão a validade de modelos comportamentais de *car-following* olhando-se individualmente para cada parâmetro é uma tarefa complexa. Porém, em geral eles têm sido capazes de estimar variáveis macroscópicas do fluxo de tráfego com acurácia satisfatória (Brackstone e McDonald, 2000). A literatura nacional apresenta estudos de calibração apenas para o algoritmo W99, todos aplicados à modelagem do tráfego rodoviário. Merece destaque o trabalho de Oliveira e Cybis (2008), que traz uma revisão bibliográfica sobre os estudos de calibração do modelo. Em outro estudo, Caleffi *et al.* (2012) calibra o W99 para um trecho de rodovia.

Na literatura internacional são muitos os trabalhos publicados que tratam da calibração dos modelos de *car-following* do VISSIM. Estes trabalhos divergem acerca do método de calibração empregado. Por exemplo, no que diz respeito ao alvo de calibração, alguns estudos se baseiam em dados desagregados da trajetória dos veículos (Brackstone *et al.*, 2002), ao passo que outros se baseiam em variáveis macroscópicas do fluxo de tráfego (Menneni *et al.*, 2008). A escolha entre os dois métodos de utilização deve ser guiada pelos objetivos de estudo. Em trabalhos cujo objetivo é simular o comportamento microscópico de cada veículo com o maior nível de detalhamento possível, o primeiro método deve ser empregado. Isto acontece principalmente nos trabalhos de modelagem de emissão de poluentes (Jie *et al.*, 2013) e de segurança viária (Cunto e Saccomanno, 2008), nos quais os perfis de velocidade e de aceleração de cada veículo são de grande interesse. Já para análises cujos objetivos são a modelagem de variáveis agregadas da corrente de tráfego, como velocidade média, o segundo método é preferível devido a sua simplicidade.

Para a literatura voltada para o modelo W74, Park e Schneeberger (2003) calibraram apenas o parâmetro ax , com o intervalo de busca [0,5-7,0] m, encontrando o valor de 3,0 m. Kim *et al.* (2005) utilizaram estatística não paramétrica e algoritmo genético para calibrar ax , bx_add e bx_mult (entre outros parâmetros) para uma via arterial controlada por semáforos atuados. A calibração não buscou valores fixos para os parâmetros, mas sim intervalos de valores a serem escolhidos pelo usuário. Os resultados mostraram os seguintes intervalos prováveis para os parâmetros: $ax = [1-4]$, $bx_add = [1-9]$ e $bx_mult = [1-10]$. Park e Qi (2005) empregaram regressão linear e algoritmo genético para calibração, chegando aos seguintes valores: $ax = 3,85$ m, $bx_add = 5,0$ e $bx_mult = 5,3$. Nos três artigos citados neste parágrafo, os parâmetros do W74 foram calibrados simultaneamente com outros parâmetros do *software*, incluindo os do algoritmo de mudança de faixa. Asamer *et al.* (2013) restringiram $bx_add = bx_mult$ para simplificar a calibração, o que em contrapartida limitou a combinação de valores possíveis para os dois parâmetros

Sobre a comparação entre os modelos W74 e W99, na literatura não são encontrados estudos que avaliam a possível contribuição trazida pela utilização do modelo W99 ao invés do W74 na modelagem dos tempos de viagem em vias arteriais. Esta é uma lacuna abordada no presente trabalho.

3. CALIBRAÇÃO DO MODELO

3.1. Codificação da área de estudo

A via arterial selecionada é unidirecional com duas faixas de tráfego misto e encontra-se numa das regiões mais adensadas da cidade de Fortaleza, com uso do solo predominantemente comercial. O trecho da via em estudo, denominada Avenida Santos Dumont, é composto por cinco interseções em nível, das quais três são semaforizadas, limitando-se a oeste pela Rua Carlos Vasconcelos e a leste pela avenida Barão de Studart. Optou-se por modelar uma via arterial, e não uma rede, para se evitar o efeito dos parâmetros do modelo de escolha de rota na calibração do modelo de *car-following*.

A coleta de dados para a codificação, calibração e validação da rede se deu para as seguintes variáveis: contagem volumétrica direcional e classificatória em todas as aproximações de todas as cinco interseções; tempos médios de viagem na via, fluxo de saturação em duas aproximações da via principal, e dados da operação do transporte coletivo por ônibus, mais

especificamente posição dos pontos de paradas, *headway* e tempo para embarque e desembarque. Para a contagem volumétrica, tempos de viagem e transporte coletivo, as coletas foram realizadas no período da manhã (de 7h às 8h) de uma quarta-feira, dia 30 de abril de 2014. O fluxo de saturação foi coletado somente no pico da tarde, quando foi possível observar ciclos com pelo menos 15 veículos em fila, recomendado pelo Manual do DENATRAN (2014).

Os volumes foram coletados com o auxílio de câmeras e de contadores manuais, com agregação temporal de 15 minutos. Para a coleta dos tempos de viagem, o método utilizado foi o do veículo teste, resultando um total de 23 observações. O fluxo de saturação foi coletado de acordo com o Método 1 do Manual do DENATRAN (2014). Por fim, os dados relativos ao transporte coletivo e planos semaforicos foram disponibilizados pela ETUFOR e CTAFOR, órgãos municipais responsáveis pelo transporte público e pelo controle de tráfego, respectivamente.

3.2. Escolha entre os algoritmos W74 e W99

A primeira decisão que o usuário do VISSIM precisa tomar para a modelagem de *car-following* é qual algoritmo utilizar. Embora o manual recomende o W74 para o tráfego urbano e o W99 para o tráfego de rodovias, ele não oferece razões para esta recomendação. Para melhor avaliar esta sugestão, realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 ao CC9 do W99, já que estes são os parâmetros adicionais trazidos pelo algoritmo com relação ao W74. Foram realizadas dois tipos de análise de sensibilidade. A primeira delas consistiu em variar um parâmetro por vez, mantendo-se os demais com valores *default*, tendo portanto o objetivo de se avaliar o efeito isolado do parâmetro no tempo médio de viagem na via e no atraso veicular médio na primeira aproximação semaforica da via em estudo. Como esta abordagem traz a grande limitação de não considerar a dependência entre os parâmetros, foi realizada uma segunda análise de sensibilidade baseada na comparação de duas combinações de valores dos parâmetros: uma combinação para o motorista “cauteloso”, e outra para o motorista “agressivo”.

Para a análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, cada parâmetro foi variado em dois níveis, com os valores retirados do trabalho de Lownes e Machemehl (2006), que apresentou uma análise de sensibilidade para estimar o efeito dos parâmetros do W99 na capacidade de uma rodovia. Para a análise de sensibilidade baseada na comparação dos tipos de motoristas, os valores foram os mesmos, tomando-se cuidado em alocar os níveis ao devido tipo de motorista. Os valores utilizados foram os seguintes. Motorista cauteloso: CC3 = -15 s; CC4 = -2,0; CC5=2,0; CC6=20 m/s²; CC7=0,15 m/s²; CC8=2,0 m/s² e CC9=0,65 m/s². Motorista agressivo: CC3 = -4,0 s; CC4 = -0,1 s; CC5 = 0,1; CC6 = 2,0 m/s²; CC7 = 0,5 m/s²; CC8 = 3,5 m/s² e CC9 = 2,3 m/s². Para cada conjunto de parâmetros, foram realizadas 30 replicações com sementes aleatórias diferentes, sendo as 30 sementes mantidas iguais para cada par de amostras (níveis) analisado. O número de replicações foi 30 para se valer do teorema do limite central na aplicação dos métodos de inferência estatística, para o caso das variáveis analisadas não serem normalmente distribuídas.

Ainda sobre as análises de sensibilidade, é importante ressaltar que muitos trabalhos realizam testes estatísticos de igualdade de médias para avaliar a relevância de um parâmetro na medida de desempenho (Lownes e Machemehl, 2006). Há um problema crucial nesta abordagem, que é o fato de que significância estatística não implica em significância prática.

Em outras palavras, as médias podem ser estaticamente diferentes, porém a diferença entre elas não seja relevante para o fenômeno em estudo. Por esta razão, neste estudo foram utilizados intervalos de confiança (IC) para avaliar o tamanho do efeito do parâmetro no tempo de viagem, pois além do IC também fornecer o resultado do teste de igualdade de médias – bastando observar se o valor zero está contido no intervalo, ele também fornece uma estimativa da diferença entre as médias, ou seja, do tamanho do efeito do parâmetro, com o grau de confiança e precisão escolhidos pelo analista. A Tabela 1 mostra os resultados das análises de sensibilidade empregadas.

Tabela 1: Análise de sensibilidade dos parâmetros CC3 a CC9 do W99

Parâmetro (<i>default</i>)	Nível	Valor	Tempo de Viagem (s)	IC (95%) Tempo de viagem (s)		Atraso (s)	IC (95%) Atraso (s/veic)	
CC3 (-8,0s)	Baixo	-4,0	90	-1,2	6,9	17	-1,1	-1,0
	Alto	-15,0	93			16		
CC4 / CC5 (±0,35)	Baixo	±0,10	91	-1,6	5,3	17	0,3	0,5
	Alto	±2,00	93			17		
CC6 (11,44m/s ²)	Baixo	2,0	90	-1,7	0,6	17	-0,1	0,0
	Alto	20,0	89			17		
CC7 (0,25m/s ²)	Baixo	0,15	90	-2,8	1,7	17	-0,1	0,0
	Alto	0,50	90			17		
CC8 (3,5m/s ²)	Baixo	2,0	92	-5,3	-0,2	17	-0,3	-0,2
	Alto	3,50	89			17		
CC9 (1,5m/s ²)	Baixo	0,65	89	-1,2	2,2	17	0,0	0,0
	Alto	2,30	90			17		
Motorista Cauteloso		---	97	-11,4	-5,0	17	0,1	0,3
Motorista Agressivo		---	88			17		

Na análise de sensibilidade de um parâmetro por vez, a maior diferença entre as médias amostrais dos tempos de viagem foi de apenas 3 segundos (Tabela 1), o que para o trecho em estudo (0,5km), representa uma diferença de velocidade média de apenas 0,6km/h. Vale notar que todos os ICs incluíram o zero, menos para o parâmetro CC8, porém com limite superior praticamente zero (-0,2 s). O maior valor dos extremos dos IC foi de 6,9 s, para o CC3, indicando que a média das diferenças das velocidades pode ser de até 1,4 km/h, o que é uma diferença pequena frente aos intervalos das classes de níveis de serviço do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010). No que diz respeito ao atraso veicular médio, a maior diferença encontrada foi de 1,0 s/veíc., e os ICs para todos os parâmetros mostram intervalos bastante estreitos e próximos de zero, o que indica que em termos práticos não houve efeito dos parâmetros nesta medida de desempenho.

Para a análise de sensibilidade de comparação dos tipos de motoristas, os ICs para a variável tempo de viagem resultou numa diferença média de até 11,4 segundos, o que em velocidade média resulta em apenas 2,0 km/h. Portanto, considerando-se ainda que os valores escolhidos para os níveis dos parâmetros foram distantes dos valores *default*, os resultados da análise de sensibilidade mostram que a utilização do modelo W99 do VISSIM ao invés do modelo W74 não traz benefícios para estudos de simulação de tempo de viagem e atraso em vias arteriais urbanas como a analisada neste artigo.

3.3. Calibração dos parâmetros

O processo de calibração iniciou-se com a simulação da rede mantendo-se todos os parâmetros do *software* em valores *default*, com o objetivo de se verificar a aptidão da rede não calibrada em modelar o fluxo de saturação, tempo de viagem e atraso na primeira aproximação. Porém, é importante se advertir que, mesmo que as diferenças entre os resultados simulados e observados em campo estejam dentro do erro aceitável, o analista deve avaliar a coerência e a validade do valor de cada parâmetro que julgar relevante, pois o baixo erro pode ser observado apenas para a rede na situação atual, e não para os cenários de intervenção de interesse. Por exemplo, um cenário de intervenção com maior volume de tráfego poderá produzir um aumento expressivo no número de troca de faixas, o que requererá que o modelo de mudança de faixa esteja bem calibrado. Tal calibração pode ter sido equivocadamente dispensada pelo analista ao ver que a rede inicial—com menor volume e com menos troca de faixas—apresentou baixos erros de estimação.

O passo seguinte consistiu na escolha dos parâmetros a serem calibrados ou coletados em campo. Como o principal objetivo da simulação era simular tempo de viagem ao longo da avenida, os quatro parâmetros escolhidos foram velocidade máxima desejada, *ax*, *bx_add*, *bx_mult*. A velocidade máxima desejada foi escolhida porque trata-se da velocidade dos veículos quando eles não estiverem em regime de *following*. Os outros três parâmetros, do algoritmo W74, determinam a brecha entre os veículos enquanto estiverem em *following*, afetando assim os espaçamentos entre os veículos, e, portanto, o tempo de viagem da corrente. Pela facilidade de coleta, os parâmetros *velocidade máxima desejada* e *ax* foram coletados em campo, enquanto *bx_add* e *bx_mult* foram calibrados, devido à impossibilidade de observação destes em campo. Os demais parâmetros comportamentais, como os de mudança de faixa, foram deixados com valores default.

O parâmetro *ax* foi coletado em campo por meio da avaliação de fotografias feitas com câmeras postas sobre o passeio, a aproximadamente 20 metros da faixa de retenção e a 1 m de altura. A medição se baseou na inspeção visual, balizada por mini-cones dispostos ao longo do meio-fio, equidistantes de um metro. O valor médio do espaçamento foi de 1,9 m, pouco abaixo do valor *default* (2 m). O desvio padrão observado foi de 0,7 m, enquanto ao utilizado pelo *software* é de 1 m.

O parâmetro *velocidade máxima desejada* já havia sido coletado em campo em outro trabalho (Medeiros *et al*, 2013), utilizando-se o método do veículo teste. O valor coletado em campo foi praticamente igual ao valor *default*, 40 km/h. O parâmetro *brecha crítica*, que não está entre os parâmetros escolhidos, também teve o seu valor alterado do valor *default* de 3,0 s para 4,5 s, valor este encontrado segundo pesquisas de campo realizada no trabalho de Maia (2007).

Após a inserção dos valores dos parâmetros de entrada, simulou-se novamente a rede com 30 replicações e obteve-se um tempo de viagem médio de 91 s, valor igual ao encontrado na simulação com os parâmetros em *default*. Isto indica que a modificação nos valores do *ax* e da *brecha crítica* não influenciou o tempo médio de viagem da via, como era esperado.

É importante mencionar que, sempre que possível, o parâmetro *ax* não deve ser calibrado simultaneamente com os parâmetros *bx_add* e *bx_mult*, pois *ax* afeta o tamanho da fila, enquanto os outros dois afetam os *headways* de saturação, ou seja, o ritmo de descarga da fila.

Calibrar os três parâmetros simultaneamente pode resultar numa combinação de valores que não seja coerente com a realidade, ainda que o fluxo de saturação observado e simulado sejam similares. Embora ax e bx somem-se para formar o *headway* de segurança (abx), somente a calibração de forma separada permitirá estimar a contribuição de cada parâmetro.

A calibração dos parâmetros de *car-following* bx_add e bx_mult teve como alvo o fluxo de saturação, e não o tempo de viagem. O fluxo de saturação é a melhor variável para a calibração dos mencionados parâmetros, pois estes definem os *headways* de *following*, ou seja, os *headways* de saturação. Além disto, uma grande vantagem em se calibrar bx_add e bx_mult com base no fluxo de saturação reside no fato de que esta variável não é influenciada por parâmetros dos modelos de mudança de faixa, aceitação de brecha ou escolha de rotas. Portanto, a calibração dos parâmetros de *car-following*, isoladamente, com base exclusivamente no fluxo de saturação, permite uma melhor estimativa dos mesmos. De outra forma, calibrar parâmetros de *car-following* tendo-se como alvo uma medida de desempenho como tempo de viagem, como é comumente visto na literatura, pode resultar em estimativas equivocadas dos parâmetros, já que o tempo de viagem é influenciado por outros modelos comportamentais. O fato de ambos modelos comportamentais influenciarem no tempo de viagem, a calibração simultânea destes modelos pode incorrer numa combinação de parâmetros inadequada. Kim *et al.* (2005) observaram um grande número de combinações de conjunto de parâmetros que resultaram distribuições de tempo de viagem simulados similares à distribuição observada em campo. Asamer *et al.* (2013) também optaram por utilizar o fluxo de saturação para calibrar o modelo W74 para uma aproximação de uma interseção semafórica. É importante ressaltar que a calibração de parâmetros baseada no fluxo de saturação deve ser realizada para qualquer rede urbana, pois esta variável tem impacto direto na capacidade e no nível de serviço das interseções. Por isto, alguns autores recomendam a calibração com alvo na capacidade, independentemente da medida de desempenho interesse (Barceló, 2010).

Assim, tomando-se como base o fluxo de saturação, foi realizada a calibração dos parâmetros bx_add e bx_mult . Como citado anteriormente, a coleta se deu de acordo com o Manual do DENATRAN (2014). A calibração se deu sem a utilização de método de busca automatizada, devido à quantidade reduzida de parâmetros. A calibração se deu sem a utilização de um método de busca automatizada devido à quantidade reduzida de parâmetros. Foram estipulados valores máximos (o dobro do default) e mínimos (metade do default) para os dois parâmetros e depois de realizadas as comparações entre os pares de valores máximos e mínimos, o melhor resultado encontrado (máximo com máximo) serviu de base para a estimativa do próximo par de parâmetros a ser testado, visando a diminuição do erro. Dessa forma, o menor erro encontrado foi para um par de parâmetros com valores acima dos máximos estipulados inicialmente, tendo em vista que o erro diminuía na medida em que os valores de bx_add e bx_mult aumentavam, chegando ao limite ótimo bx_add e bx_mult iguais a 6,0. Para valores maiores do que este, o erro voltava a aumentar. Para cada combinação de parâmetros, foram realizadas 30 replicações de 20 minutos, sendo os primeiros 5 minutos utilizados para *warm up* da rede.

Depois de calibrados, partiu-se para a verificação dos tempos de viagem simulados e observados. Vale lembrar que o tempo de viagem observado em campo foi de 127 segundos. Antes da calibração, o valor simulado para esta variável foi de 91 s, resultando num erro percentual absoluto médio (EPAM) de 28%. Após a calibração, o tempo de viagem

simulado subiu para 125 segundos, resultando num EPAM de apenas 1% (Tabela 2).

Com fins de validação, os valores dos parâmetros calibrados e coletados foram aplicados a um segundo trecho da mesma via, com características similares, e com volume de tráfego menor. Este novo trecho, localizado imediatamente à montante do trecho original, é composto por quatro interseções em nível, sendo duas semaforizadas. Para a validação também foram realizadas 30 replicações de 20 minutos cada, sendo os 5 minutos iniciais de *warm-up*. A coleta de dados em campo foi realizada no mesmo dia e horário da coleta do trecho original. O tempo de viagem médio observado foi de 111s e o simulado foi de 119 s, o que resulta um EPAM de 7%. Em termos de velocidade, esta diferença entre os valores simulados e observados é de apenas 1,0 km/h, uma diferença pequena frente aos incrementos de velocidades das classes dos níveis de serviço do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010). Não utilizada a mesma rede para a validação, porque os dados para tal atividade foram coletados no pico da tarde, período em que a rede estava bastante saturada.

Tabela 2: Resultados das simulações

Parâmetros Modificados				Medidas de Desempenho					
<i>ax</i>	<i>bx_add</i>	<i>bx_mult</i>	Brecha Crítica	Fluxo Sat. Simul.	Fluxo Sat. Observ.	EPAM	Tempo de Viagem Simul.	Tempo de Viagem Observ.	EPAM
2,0 (default)	2,0 (default)	3,0 (default)	3,0 (default)	2080	1476	41%	91	127	28%
1,9 (Coletado)	2,0 (default)	3,0 (default)	4,5 (Coletado)	2195		49%	91		28%
1,9 (Coletado)	6,0 (Calibrado)	6,0 (Calibrado)	4,5 (Coletado)	1462		1%	126		1%

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho traz considerações e conclusões importantes sobre a modelagem de vias arteriais urbanas no microssimulador VISSIM. Entre os modelos de *car-following* disponíveis no *software*, o modelo de Wiedemann-74 é o mais indicado, já que os efeitos dos parâmetros extras trazidos pelo modelo de Wiedemann-99 no tempo médio de viagem e no atraso veicular são praticamente desprezíveis.

A calibração dos parâmetros *bx_add* e *bx_mult* com base no fluxo de saturação resultou em um modelo capaz de representar bem os tempos de viagem na via. Calibrar *bx_add* e *bx_mult* somente após a especificação de *ax*, coletado em campo, foi importante para a estimação da contribuição isolada de *ax* e de *bx* na distância mínima de *following*. Além disto, calibrar o modelo de *car-following* tendo como alvo o fluxo de saturação também permite a estimação dos parâmetros controlando-se o efeito dos outros modelos comportamentais, já que estes não exercem influência no fluxo de saturação.

Para a calibração do modelo W74 com alvo no fluxo de saturação, faz-se necessário que outros parâmetros do *software* que influenciam esta variável sejam considerados pelo analista, como é o caso da velocidade máxima desejada. Para a calibração do modelo W99, indicado para o tráfego ininterrupto, outras variáveis além do *headway* de saturação devem ser

consideradas como alvo de calibração, já que no W99 outros parâmetros (CC2 a CC9) não modelam a distância mínima de *following*. Para uma estimação precisa dos valores dos parâmetros do modelo W99, a calibração pode ser baseada em dados desagregados da trajetória dos veículos como alvo.

Um algoritmo genético está sendo trabalhado para calibrar simultaneamente os cinco parâmetros do VISSIM aqui abordados. A hipótese dos autores é que a calibração automatizada possa até resultar em pequenos erros de estimação, porém com valores de parâmetros menos condizentes com a realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/MCT pelo financiamento do presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asamer, J., H. J. van Zuylen e B. Helmann (2013) *Calibrating car-following parameters for snowy road conditions in the microscopic traffic simulator VISSIM*. IET Int. Transp. Systems, Vol. 7, n. 1, p. 114-121.
- Barceló, J. E. (2010) *Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research and Management Science, Springer.
- Brackstone, M e M. McDonald (2000) Car-following: A Historical Review. *Transp.Res.Part F*. 2(4), p. 181-196
- Brackstone, M., B. Sultan e M. McDonald (2002) Motor-way Driver Behavior: Studies on Car-following. *Transportation Research Part F*. Vol. 5, p. 31-46
- Caleffi, F., Y. Moisan, H. B. B. Cybis, F. Michel e F. Hirsch (2012). Simulação de alternativas operacionais de um segmento especial de autoestrada através do software Vissim. *Anais do XXVI ANPET*, Joinville.
- Cunto, F. e F. F. Saccomanno (2008). Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, n. 40, p. 1171-1179.
- DENATRAN (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito*. Volume V – Sinalização Semafórica.
- Fellendorf, M. e P. Vortisch (2010). *Traffic Simulation with VISSIM. Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research and Management Science, Cap. 2, Ed. Springer.
- TRB (2010). Highway Capacity Manual. Transportation Research Board.
- Jie, L., H. V. Zuylen, Y. Chen, F. Viti, e I. Wilmink (2013) Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. *Transportation Research Part C*, no. 31, p. 172-184.
- Kim, S-J, W. Kim, L.R. Rillet (2005). Calibration of Microsimulation Models Using Nonparametric Statistical Techniques. *Transportation Research Record*, n. 1935, p.111-119.
- Lownes, N. e R. Machemehl (2006) Sensitivity of Simulation Capacity to Modification of VISSIM Driver Behavior Parameters. *Transportation Research Record*, n. 1988, p. 102-110.
- Maia, F. V. B. (2007) *Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Medeiros, A. L., M. Castro-Neto, C. F. Loureiro e J. E. Bessa-Jr (2013) Calibração de Redes Viárias Urbanas Microsimuladas com o uso de Algoritmos Genéticos. *Anais do XXVII ANPETs*. Belém, PA
- Menneni, S.; C. Sun e P. Vortisch (2008) Microsimulation Calibration Using Speed-Flow Relationships. *Transportation Research Record*, n. 2088, p. 1-9.
- Oliveira, M. L. e H. B. Cybis (2008) Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. *VIII SEPROSUL – Bento Gonçalves, Brasil*.
- Park, B. B. e J. D. Schneeberger (2003) Microscopic Simulation model calibration and Validation. Case Study of VISSIM Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transp.Res.Record*, n. 1856, p. 185-192.
- Park, B. B. e H. M Qi (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models *Transportation Research Record*, no. 1934, p. 208-217.
- PTV (2014) VISSIM 6.0. Manual do Usuário. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.
- Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Verkehrsflusses*. Dissertação do Instituts fuer Verkehrswesen, Heft 8, Uniersitaet Karlsruhe. Desde 2009 – Karlsruher Institue fuer Technologie.
- Wiedemann, R. e U. Reiter (1992) Microscopic Traffic Simulation - The Simulation System Mission – Background and Actual State.

Victor Macedo Lacerda (victor.macedo.ufc@gmail.com)

Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará