

Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira

Marcelo Leismann de Oliveira (PPGEP/UFRGS)

Helena Beatriz Bettella Cybis (PPGEP/UFRGS)

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão sobre a experiência de calibração do algoritmo de *car-following* psicofísico do VISSIM para ambientes rodoviários, analisando a aplicabilidade das experiências reportadas na literatura em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira. O segmento modelado é o quilômetro 01 da rodovia BR-290, e inclui o acesso à RS-389, Estrada-do-Mar. A revisão bibliográfica indica alteração preferencial dos parâmetros “distância de parada – CC0”, “tempo de *headway* – CC1” e “limites do ‘*following*’ negativos e positivos – CC4 e CC5” para a calibração de trechos rodoviários. Estes parâmetros influenciam diretamente as velocidades e capacidades, atuando no espaçamento desejado de tráfego entre veículos. A literatura não faz referência à importância dos perfis de velocidades desejadas na calibração de modelos, e este parâmetro foi identificado como tendo importância relativa alta na simulação de situações onde a intensidade de tráfego é baixa.

Palavras chave: Micro simulação de tráfego, calibração, Vissim.

1. Introdução

A micro simulação é ferramenta estratégica na elaboração de estudos e desenvolvimento de projetos em engenharia de transportes. Para especialistas da área de tráfego, a simulação representa um método de comparação e avaliação de alternativas de projeto, análise de impactos e seleção de formas de atuação nas redes de transportes, de forma a minimizar o transtorno aos usuários e maximizar a eficácia na aplicação de recursos financeiros.

A representação do movimento do tráfego em micro simuladores é realizada através do processamento dos algoritmos do software, que buscam estimar posições de veículos baseando seus cálculos em regras pré-definidas. Um dos algoritmos que mais impactam nas capacidades viárias é o algoritmo de *car-following*.

O algoritmo de *car-following*, cuja experiência de calibração será levantada na bibliografia, é do tipo psicofísico, e está disponível através do software de micro simulação VISSIM – *Verkehr In Städten-SIMmulation* (PTV, 2006). O software de micro simulação VISSIM apresenta vantagens com relação a outros ferramentais quanto a (i) facilidade de elaboração das redes modeladas e (ii) flexibilidade de implementação do comportamento do tráfego relacionado a cada *link*. O comportamento de *car-following* de veículos em simulações de rodovias no VISSIM é alterado através de dez parâmetros comportamentais, que buscam representar diferentes modos de condução do veículo: (i) condução livre; (ii) condução de aproximação; (iii) condução de seguidor e; (iv) condução de frenagem.

Este artigo apresenta uma revisão sobre a experiência de calibração do algoritmo de *car-following* psicofísico do VISSIM para ambientes rodoviários, analisando a aplicabilidade das experiências reportadas na literatura em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira. O estudo de caso é relativo ao km-01 da rodovia BR-290, e inclui o acesso à rodovia RS-389, conhecida como Estrada-do-Mar. Foi realizada revisão bibliográfica e identificados parâmetros de calibração para contextos rodoviários. A literatura aponta para a seleção dos parâmetros “distância de parada – CC0”, “tempo de *headway* – CC1” e “limites do ‘*following*’ negativos e positivos – CC4 e CC5”. Estes parâmetros afetam diretamente o espaçamento desejado entre veículos trafegando num mesmo fluxo de tráfego, portanto são aqueles mais influentes nas capacidades e velocidades do fluxo em rodovias. A literatura não faz referência à importância dos perfis de velocidades desejadas na calibração de modelos, e

este parâmetro foi identificado como tendo importância relativa alta na simulação de situações onde a intensidade de tráfego é baixa.

2. O Modelo de Micro Simulação Vissim

O VISSIM é um modelo de simulação de tráfego microscópico, com algoritmos de representação de tráfego baseados nos trabalhos de Wiedemann (1974 *apud* PTV, 2006) e Wiedemann (1991), os quais combinam um modelo de percepção de motoristas com modelos de desempenho de veículos. O algoritmo para movimentos longitudinais de veículos (*car-following*) apresenta características psicofísicas, enquanto movimentos transversais (*lane-changing*) são determinados por um algoritmo baseado em regras.

O VISSIM possui dois algoritmos de *car-following*, cada qual buscando representar distintas situações de tráfego. De acordo com PTV (2006), o tráfego urbano é mais bem representado pelo modelo de Wiedemann-74, situação onde veículos trafegam a baixas velocidades, há ocorrência de *headways* pequenos, tempos de reação de motoristas são menores e o efeito de fila (paradas e arrancadas) é freqüente. Já o algoritmo de *car-following* de Wiedemann-99, versão atualizada do algoritmo de Wiedemann-91, é indicado para representação dos movimentos dos veículos em segmentos rodoviários, onde a velocidade do fluxo e a proximidade com que veículos trafegam são variáveis predominantes na determinação de capacidades. O algoritmo de Wiedemann-99 é mais complexo e apresenta um maior número de parâmetros de calibração, levando a uma maior flexibilidade nas acelerações e/ou desacelerações de acordo com o posicionamento do veículo líder. Outra importante consideração está na possibilidade de alteração do tempo de reação de motoristas quando verificado a presença de veículo líder mais lento.

Neste estudo será revisado o algoritmo de *car-following* psicofísico de Wiedemann-99, já que o ambiente modelado é uma autoestrada rural, seguindo orientação de PTV (2006).

2.1. O Algoritmo de Car-Following Psicofísico

O algoritmo de *car-following* psicofísico busca representar o fluxo de tráfego através de movimentos dos elementos formados pela combinação de veículos e motoristas (DVE) dentro de uma rede. Cada motorista, com seus comportamentos e percepções singulares, são designados para veículos específicos.

Os atributos que caracterizam cada elemento motorista-veículo podem ser separados em três categorias: (i) Especificações técnicas de veículos – comprimento, velocidade máxima, aceleração potencial e posição, velocidades e acelerações atuais na rede; (ii) Comportamento dos elementos – limites de sensibilidade psicofísicas dos motoristas (habilidade de estimar, agressividade), grau de conhecimento da via, acelerações baseadas nas velocidades atuais e desejadas; (iii) Interdependência dos elementos – referências aos veículos à frente e atrás em sua faixa de tráfego e nas faixas adjacentes, referência ao link atual e à próxima intersecção, referência ao próximo semáforo.

O modelo comportamental de *car-following* envolve a classificação das reações em resposta às velocidades e distâncias relativas percebidas pelos motoristas com relação aos demais veículos no fluxo de tráfego.

A idéia básica do modelo de Wiedemann-99 é assumir que motoristas podem estar em um dos quatro estágios de formas de condução de veículos, de acordo com PTV (2006): (i) Condução Livre - sem influências de veículos a sua frente. Nesta forma de condução, o motorista busca

atingir e manter sua velocidade desejada. Na realidade, a velocidade na condução livre não se mantém constante, variando em torno da velocidade desejada devido ao controle imperfeito do pedal do acelerador; (ii) Condução de Aproximação - corresponde ao processo de adaptação da velocidade de motoristas as menores velocidades impostas por veículos mais lentos à sua frente, de forma a atingir uma distância de segurança desejada; (iii) Condução de Seguidor - o motorista segue o veículo a sua frente sem consciência de aceleração ou desaceleração, buscando manter relativamente constante uma distância por ele considerada segura. Contudo, devido a imperfeições no controle do pedal do acelerador e em estimativas de posicionamento, a diferença de velocidades oscila em torno de zero, e; (iv) Condução de frenagem - ocorre se há imposição de taxas de desaceleração médias ou altas, resultando em distâncias entre veículos abaixo da distância considerada segura pelo condutor. Isto pode acontecer quando o veículo líder altera sua velocidade abruptamente, ou quando outro veículo realiza uma troca de faixa, ficando a frente do veículo observado, diminuindo assim a distância de segurança.

Para cada estágio, a aceleração é definida como resultado da (i) velocidade, (ii) diferenças de velocidades e distâncias com relação a outros veículos e (iii) características individuais de motoristas e veículos. Motoristas passam de um estágio para outro assim que atingem certas condições, expressas como combinações de diferenças de velocidades e distâncias. Por exemplo, uma pequena diferença de velocidades consegue apenas ser percebida em curtas distâncias, enquanto altas diferenças de velocidades, que forçam uma aproximação mais rápida, requerem outro tipo de atitude por parte dos condutores.

A Figura 1: representa, em cada um dos estágios apresentados anteriormente, o comportamento de um elemento motorista-veículo (DVE_j) quando da aproximação de outro elemento motorista-veículo (DVE_i) a sua frente. O motorista j começa a desacelerar, de acordo com limites individuais de percepção, buscando atingir certa distância ao veículo a sua frente. A distância a ser mantida é função de uma diferença de velocidades e distâncias aceitáveis. O motorista j, a partir desta situação, procura manter uma velocidade igual ou menor do que a velocidade de DVE_i. Esta velocidade é mantida até que a percepção de distância do condutor j identifique um distanciamento com relação à DVE_i. O condutor j passa então a acelerar novamente, buscando diminuir sua distância com relação à DVE_i.

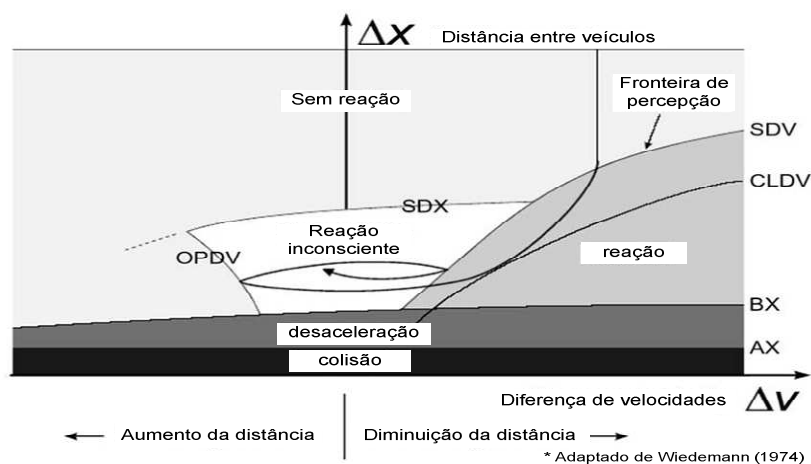


Figura 1: Representação da aproximação entre conjuntos motoristas-veículos

Um dos desafios do modelo psicofísico está na definição das distribuições dos limites de percepção de condutores. Medições contínuas de diferentes situações de tráfego são necessárias para a calibração do modelo de forma realística (Panwai e Dia, 2005).

As percepções particulares de motoristas e o comportamento individual de risco são modelados pela adição de valores aleatórios em cada um dos parâmetros da Figura 1:, onde:

- AX – distância desejada entre dois veículos sucessivos em uma fila parada.
- ABX – distância mínima desejada de *'following'*, a qual é uma função de AX, de uma distância de segurança e da velocidade.
- SDV – ponto sobre o qual o condutor passa a perceber a aproximação de um veículo mais lento a sua frente. SDV é alterado na medida em que mudam as diferenças de velocidades entre veículos.
- OPDV – ponto sobre o qual o condutor do veículo seguidor percebe o aumento do espaço entre seu veículo e o veículo a sua frente, passando a acelerar novamente.
- SDX – fronteira de percepção sobre a qual é modelada a máxima distância de *'following'*, que representa em torno de 1,5 a 2,5 vezes ABX.

O algoritmo de Wiedemann-99 possui 10 parâmetros ajustáveis, são eles:

- CC0 (distância de parada, em metros) representa a distância que um motorista deseja manter atrás de um veículo parado em uma rodovia, e não possui variação alguma. Esta variável influencia a capacidade na medida em que é utilizada para o cálculo da distância de segurança mantida por motoristas. A distância de segurança é definida como a distância mínima que motoristas desejam manter quando seguindo outros veículos. Para o caso de altos volumes, esta distância tornar-se-á o valor com maior influência na capacidade. O cálculo da distância de segurança (dx_safe) é realizado através da equação retirada de PTV (2006), em conjunto com o parâmetro CC1, e obtida da seguinte forma: $dx_safe = CC0 + CC1 * v$ (m/s);
- CC1 (tempo de *headway*, em segundos) é o intervalo de tempo que corresponde a um espaçamento que motoristas desejam manter de veículos a sua frente. Este parâmetro é responsável por controlar a parte da distância de segurança que depende da velocidade. Portanto, a uma dada velocidade (m/s), é obtida uma distância de segurança dx_safe pela equação apresentada acima;
- CC2 (variação de *'following'*, em metros) restringe a oscilação longitudinal da distância de segurança, sendo um incremento de espaçamento para a distância de segurança desejada. Se este valor é definido como 10 metros, por exemplo, o processo de *'following'* resulta em distâncias entre dx_safe e $dx_safe + 10m$;
- CC3 (espaçamento para entrar em *'following'*, em segundos) controla o começo do processo de desaceleração, isto é, define quantos segundos antes de atingir a distância de segurança o motorista começa a desacelerar.

- CC4 e CC5 (limites do *'following'*) são parâmetros adimensionais, e influenciam a aproximação entre o veículo seguidor e o veículo líder, controlando a diferença de aceleração entre estes dois veículos. Menores valores resultam em veículos trafegando mais próximos uns dos outros. PTV (2006) recomenda que estes parâmetros tenham igual magnitude e sinais opostos. Os valores absolutos de CC4 (ou CC5) podem ser entendidos como o inverso de um coeficiente de ajuste de espaçamento entre dois veículos consecutivos;
- CC6 (Velocidade dependente da oscilação) busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos no processo de *'following'*. Se determinado como nulo, a oscilação da velocidade é independente da distância com relação ao veículo líder. Valores altos para este parâmetro levam a altas oscilações na velocidade de acordo com o aumento das distâncias;
- CC7 (Oscilação da Aceleração) aceleração real durante o processo de oscilação;
- CC8 (Aceleração quando parado) aceleração desejada de um veículo quando este estiver começando a se movimentar a partir da situação parada (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração do modelo);
- CC9 (Aceleração a 80 km/h) aceleração desejada a 80 km/h (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração do modelo).

2.2. Calibração do Modelo Psicofísico na Literatura

A complexidade do fenômeno e a correlação existente entre parâmetros tornam os processos de calibração de algoritmos de *car-following* tarefa um tanto complexa. Neste sentido, autores buscaram calibrar o algoritmo de *car-following* psicofísico através de métodos de inteligência computacional (algoritmos genéticos), como realizaram Zhizhou *et al.* (2005), Park e Qi (2006) e Kim e Rilett (2007). Outros autores executaram diferentes processos, como tentativa e erro, e limitaram o número de parâmetros a calibrar, de forma a escolher aqueles mais influentes nas capacidades de rodovias, como executaram Gomes *et al.* (2004), Lownes e Machemehl (2006) e Ambadipudi *et al.* (2006). Todas as formas de calibração obtiveram resultados satisfatórios.

Diversos outros estudos investigaram o desempenho do pacote de simulação VISSIM com relação a outros micro simuladores (Moen *et al.*, 2000; Bloomberg e Dale, 2000; Tian *et al.*, 2002). Entre as qualidades do modelo VISSIM apontadas por alguns autores estão: (i) superioridade para a representação dos movimentos de veículos pelo algoritmo de *car-following* psicofísico, (ii) praticidade no desenvolvimento de redes a modelar, (iii) flexibilidade na definição dos parâmetros de troca de faixas e *following* por área ou *link* de tráfego e (iv) praticidade e flexibilidade na forma de apresentação de relatórios com resultados das simulações.

A calibração utilizando inteligência artificial é realizada através do processamento dos algoritmos do software desenvolvido para este fim, e proporciona rapidez e agilidade na convergência para uma função objetivo de calibração. Portanto, a automação favorece a inclusão de um maior número de variáveis a serem calibradas. A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores obtidos na bibliografia para as variáveis calibradas no âmbito de seus respectivos trabalhos.

Tabela 1: Valores de calibração obtidos na bibliografia

Autores	Default	Gomes <i>et al.</i> (2004) Freeway	Gomes <i>et al.</i> (2004) SoftCurve	Gomes <i>et al.</i> (2004) HardCurve	Park e Qj (2006)	Lownes e Machemehl (2006)	Ambadipudi <i>et al.</i> (2006)	Kim e Rilett (2007)	Zhizhou <i>et al.</i> (2005) Pico	Zhizhou <i>et al.</i> (2005) Fora Pico
Parâmetros de Wiedemann-99					AG			AG	AG	AG
Distância de Parada (m) - CC0	1,50	1,70	1,70	1,70	1,74	1,45		1,50	1,50	1,50
Tempo de <i>Headway</i> (s) - CC1	0,90	0,90	1,10	1,40	2,77	0,85	0,85	0,95	0,80	1,00
Variação de <i>Following</i> (m) - CC2	4,00				4,09			2,00	3,50	5,00
Espaço p/ entrar em <i>Following</i> - CC3	-8,00				-0,91			-9,00		
Limite de <i>Following</i> Negativo - CC4	-0,35	-2,00	-2,00	-2,00	-0,97	-1,00	-0,30	-0,25		
Limite de <i>Following</i> Positivo - CC5	0,35	2,00	2,00	2,00	0,86	1,00	0,30	0,25		
Veloc. Dependente da Oscilação - CC6	11,44				10,70			7,00		
Oscilação da Aceleração (m/s ²) - CC7	0,25				0,67					
Aceler. quando Parado (m/s ²) - CC8	3,50				2,06					
Aceler. a 80 km/h (m/s ²) - CC9	1,50				2,77					

AG – Trabalhos calibrados com auxílio de Algoritmos Genéticos

Lownes e Machemehl (2006) investigaram o impacto de alterações viárias nas capacidades simuladas em uma rodovia do Texas, Estados Unidos. Os autores verificaram que diversos parâmetros de calibração comportamentais de motoristas exercem, individualmente, influência significativa nas capacidades viárias, e selecionaram para calibração do *car-following* os parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5, além do aumento da distância de visibilidade e desaceleração do algoritmo de troca de faixas.

Gomes *et al.* (2004) desenvolveram e calibraram um modelo do VISSIM para uma rodovia congestionada no estado da Califórnia, Estados Unidos, e investigaram os impactos provenientes da alteração de diversos parâmetros de calibração do modelo de *car-following* na representação da realidade observada. Os autores descreveram então a influência da alteração de alguns parâmetros escolhidos para o processo de calibração do modelo, concluindo que a calibração dos parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5 é suficiente para uma correta representação da realidade. Naquele estudo, houve a calibração do modelo para três situações de tráfego distintas, e os valores calibrados estão apresentados na Tabela 1 para: (i) segmentos retos homogêneos da rodovia; (ii) segmentos com curvas de raio longo, e; (iii) segmentos com curvas de raios curtos.

O desenvolvimento de modelos microscópicos com grandes redes foi objeto de estudo de Ambadipudi *et al.* (2006), onde um dos ferramentais utilizados foi o VISSIM. Os autores modelaram uma rede de grande porte para a cidade de Columbus – Ohio, Estados Unidos, selecionando para a calibração do algoritmo de *car-following* os parâmetros CC1, CC4 e CC5, além de parâmetro de troca de faixas relativo à distância ao ponto de parada de emergência, que afeta o perfil de desacelerações de veículos quando seguindo rota pré-determinada.

De forma geral, dentre os trabalhos levantados na bibliografia que realizaram calibração do algoritmo de *car-following* psicofísico no VISSIM, os parâmetros mais frequentes observados foram a “distância de parada – CC0”, “tempo de *headway* – CC1” e “limites do ‘*following*’ negativos e positivos – CC4 e CC5”. Estes parâmetros são responsáveis diretos pelo espaçamento desejado e mantido entre veículos dentro de um fluxo de tráfego, e afetam diretamente as capacidades e velocidades simuladas em rodovias.

O parâmetro “tempo de *headway* – CC1” compõe a distância de segurança desejada, fazendo parte da parcela da distância de segurança que depende das velocidades. A análise da magnitude dos parâmetros indica que valores mais elevados de CC1 devem ser empregados para representar situações onde a influência das velocidades na distância de segurança é

maior. A calibração para distintas situações reais realizada por Gomes *et al.* (2004), mantendo constante os demais parâmetros de calibração e variando CC1, é exemplo do impacto desta variável. No trabalho citado, em segmentos da via onde há maiores capacidades e velocidades (trechos homogêneos de rodovia), o parâmetro CC1 apresenta baixo valor se comparado a outras situações calibradas no mesmo estudo. O inverso também é válido.

Com relação à variável de calibração “distância de parada – CC0” percebe-se certa padronização quanto aos seus valores calibrados. Dentre todos os trabalhos levantados, os valores calibrados ficaram entre 1,45 metros e 1,70 metros. Deve-se observar dois trabalhos que realizaram calibração através de inteligência artificial (Kim e Rilett, 2007 e Zhizhou *et al.*, 2005). Nestes estudos não houve calibração de CC0, e o valor padrão foi utilizado (1,50 metros).

As variáveis “limites do ‘following’ negativos e positivos – CC4 e CC5” foram calibradas em cinco de seis trabalhos levantados na bibliografia, evidenciando a importância atribuída pelos diversos autores a este fator. Os valores calibrados variaram entre (-2, 2) e (-0,3 e 0,3). Valores altos, distantes de zero, foram empregados por Gomes *et al.* (2004) e Lownes e Machemehl (2006), ambos realizaram uma calibração por tentativa e erro. A configuração padrão do software VISSIM apresenta valores baixos para estes parâmetros (-0,35 e 0,35). Valores baixos também foram observados em trabalhos que realizaram uma calibração utilizando inteligência artificial, além de estudo desenvolvido por Ambadipudi *et al.* (2006), que utilizou outro processo de calibração para seu modelo.

A próxima seção apresenta o estudo de caso, onde foram aplicadas as experiências reportadas na literatura a respeito da calibração do software VISSIM. Nesta seção são descritas a coleta de dados e as etapas adotadas para a calibração. O processo de calibração teve seus parâmetros definidos a partir dos limites sugeridos na literatura.

3. Estudo de Caso

Como estudo de caso, foi selecionado o segmento correspondente ao quilômetro 01 da rodovia BR-290, cuja classificação é rodovia rural de múltiplas faixas. O segmento selecionado inclui um acesso para importante rodovia de interligação com cidades litorâneas, chamada de RS-389 – Estrada-do-Mar. O segmento de rodovia modelado possui três faixas de tráfego, e o acesso à direita do fluxo em direção à Estrada-do-Mar duas faixas. Após o acesso, dentro do segmento analisado, a rodovia passa a contar com duas faixas de tráfego para o fluxo que segue, e mais adiante se conecta à BR-101. A Figura 2: apresenta o segmento de rodovia modelado.

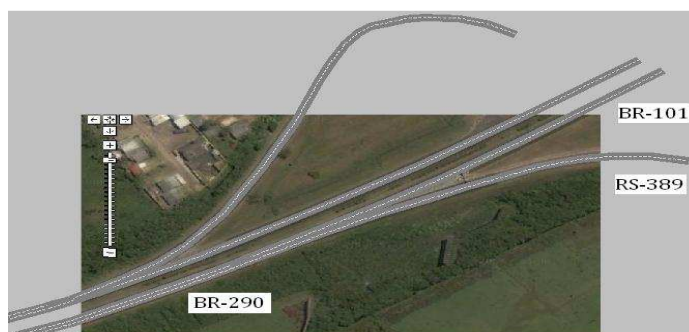


Figura 2: Segmento de rodovia modelado

3.1. Levantamento de Dados

Os dados foram extraídos de filmagens realizadas em abril de 2007, e foram obtidas informações sobre velocidades e fluxos durante 1 hora e 30 minutos de coleta. Dados sobre velocidades e fluxos foram coletados em intervalos de 3 minutos, o que possibilitou uma posterior composição de dados agrupados em intervalos de 15 minutos. Dados sobre intensidades e composições do fluxo foram coletados para ambas as rotas, tanto para veículos que seguiam pela rodovia em direção à BR-101, como para aqueles que utilizaram o acesso em direção à RS-389. Dados de velocidades foram obtidos em ambas as rotas cronometrando-se o tempo de percurso de veículos para um trecho de via com comprimento conhecido. Foram obtidas velocidades para veículos leves, caminhões e ônibus.

A intensidade do fluxo durante o período de coleta variou entre 2312 veic./hora e 2680 veic./hora. Para este contexto, e levando-se em consideração cálculos de capacidade viária do HCM-2000, determinou-se que a rodovia estava carregada com 45% de sua capacidade, e níveis de serviço foram classificados como “B”. A calibração do modelo, portanto, apresenta um contexto limitado a estas condições.

O tráfego de veículos pesados (ônibus e caminhões) é proibido na rodovia Estrada-do-Mar, cujo acesso se dá através do trecho modelado. Portanto, o tráfego que segue a rota do acesso é composto por 82% de veículos leves, 14% de caminhões e 4% de ônibus. Nesta rota, ônibus e caminhões correspondem ao tráfego local ou aquele tráfego que se desloca até a maior cidade litorânea da região. Este tráfego pesado utiliza uma rodovia alternativa chamada RS-030. Os limites regulamentares de velocidades neste trecho são 100 km/h, 90 km/h e 80 km/h, respectivamente a veículos leves, ônibus e caminhões.

Os dados coletados foram agrupados em intervalos de 15 minutos para cada classe de veículo e por rota. Portanto, passaram a existir seis grupos de dados de velocidades, subdivididos em intervalos de 15 minutos, para calibração do modelo: (i) três grupos para a rota 1 (veículos leves, caminhões e ônibus que dobram no acesso em direção a Estrada-do-Mar) e; (ii) três grupos para a rota 2 (veículos leves, caminhões e ônibus que seguem pela rodovia em direção a BR-101). Destes seis grupos, três deles não apresentavam número de observações suficientemente alto para apresentar significância estatística. Desta forma, somente três grupos de dados sobre velocidades serão utilizados na calibração: (i) veículos leves - rota 1; (ii) veículos leves – rota 2 e; (iii) caminhões - rota 2.

3.2. Calibração do Estudo de Caso

Para a calibração do estudo de caso não foram alteradas características *default* de veículos como tamanho, peso, potência e perfis de acelerações e desacelerações. Contudo, antes do início da coleta de dados, e baseando-se nas velocidades regulamentares, características da via e frota, foram arbitradas empiricamente perfis de velocidades desejadas para cada classe veicular modelada. Velocidades desejadas são aquelas velocidades praticadas por veículos quando em situação de fluxo livre.

Em decorrência dos dados, foram determinadas as velocidades reais praticadas pelos veículos no trecho a ser modelado. A Figura 3: apresenta as distribuições das velocidades empíricas desejadas e reais para as classes modeladas.

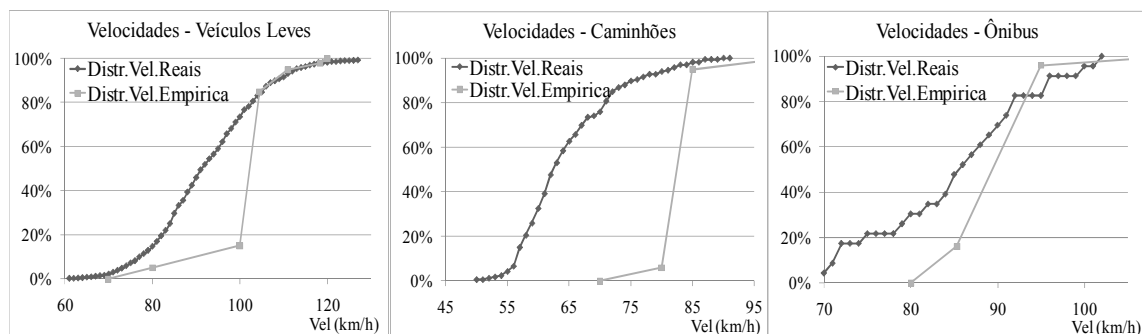


Figura 3: Distribuições de velocidades empíricas desejadas e reais por classe veicular

Os parâmetros calibrados no estudo de caso foram aqueles indicados pela bibliografia como importantes para a representação de ambientes rodoviários. Estes parâmetros afetam a determinação das distâncias de segurança adotadas pelos veículos, e são eles: (i) “distância de parada – CC0”; (ii) “tempo de *headway* – CC1” e; (iii) “limites do ‘*following*’ negativos e positivos – CC4 e CC5”. Os parâmetros citados afetam diretamente a aproximação entre veículos dentro do fluxo de tráfego, que é refletida nas velocidades e capacidades viárias. Análises estatísticas de variância (ANOVA) foram utilizadas para verificar diferenças estatisticamente significativas entre médias de velocidades modeladas e reais.

O processo de calibração foi desenvolvido em três etapas, cada qual com duas rodadas de simulação. A primeira etapa buscou avaliar a sensibilidade do modelo com relação aos perfis de velocidades (i) desejadas arbitradas empíricas e (ii) reais. A segunda etapa da calibração possuiu o objetivo de avaliar a sensibilidade do modelo com relação aos parâmetros de *car-following*, e foram aplicados, dentro de limites observados na literatura, dois conjuntos de valores para os parâmetros de *following*, chamados de conjunto de valores que gerariam “altas capacidades” e “baixas capacidades”. As duas últimas rodadas de calibração possuíram o objetivo de compatibilizar velocidades simuladas na rota 1 (trecho do acesso em curva) com velocidades reais nesta rota. A Tabela 2 apresenta resumidamente as etapas descritas.

Conforme descrito, a primeira etapa da calibração utilizou os perfis de velocidades empíricas e valores *default* para parâmetros de *car-following*. Após a rodada “a”, veículos pesados apresentaram velocidades calibradas para a rota 2, e velocidades modeladas para veículos leves apresentaram diferenças de 7,13% para mais na rota 1, e de 6,36% para menos na rota 2. Velocidades não foram reproduzidas para nenhuma classe de veículo na rodada “b”.

Tabela 2: Etapas da calibração e suas rodadas

	Perfis de Velocidades	Coefficientes de <i>Following</i>	Ajuste perfil Vel. p/ Curva
Etapa 1	a) desejadas arbitradas	default	X
	b) reais coletadas		
Etapa 2	c) reais coletadas	coef. de altas capacidades	X
	d) reais coletadas	coef. de baixas capacidades	
Etapa 3	e) desejadas arbitradas	rota 1- coef. de baixas capacidades rota 2- coef. de altas capacidades	X
	f) desejadas arbitradas	rota 1- coef. de baixas capacidades rota 2- coef. de altas capacidades	

Na segunda etapa de calibração partiu-se para a calibração dos parâmetros de *following*. , Baseado nos valores da literatura, foram elaborados dois cenários de características opostas. Aqueles valores de calibração que proporcionariam uma maior capacidade e velocidades mais altas, com valores de parâmetros de “altas capacidades”, e aquele conjunto composto por

parâmetros de valores de “baixas capacidades”, que teoricamente proporcionariam menores velocidades e capacidades viárias. A Tabela 3 apresenta os dois conjuntos de parâmetros e seus respectivos valores.

Tabela 3: Valores para os conjuntos de parâmetros de calibração alterados

	Altas capacidades	Baixas capacidades
Distância de parada – CC0 (metros)	1,45	1,70
Tempo de <i>headway</i> – CC1 (segundos)	0,80	1,40
Limites do ‘ <i>following</i> ’ – (-) CC4 / (+) CC5	0,25	2,00

A calibração utilizando o conjunto de valores de “altas capacidades” resultou em velocidade calibrada para somente um intervalo de 15 minutos de veículos leves na rota 1, todos os demais conjuntos apresentaram velocidades simuladas abaixo e estatisticamente diferentes das velocidades reais. Já a calibração com o conjunto de valores de “baixas capacidades” não apresentou nenhuma velocidade simulada estatisticamente igual à respectiva velocidade real.

Nesta etapa da calibração, observou-se que apesar das velocidades simuladas estarem abaixo das reais para ambos os casos, houve pequena sensibilidade do modelo com a aplicação do conjunto de valores de calibração de “baixas capacidades” e “altas capacidades”. Valores de calibração de “altas capacidades” resultaram, na média, em velocidades 1,5% maiores do que velocidades obtidas com o conjunto de calibração de valores que gerariam “baixas capacidades”. A hipótese mais provável para explicar tal insensibilidade do modelo pode estar no fato de que fluxos simulados estão abaixo de 50% da capacidade da via, o que proporcionaria uma liberdade de manobras e uma trafegabilidade com maiores espaços. De qualquer forma, foi mantido o conjunto de valores de calibração de “altas capacidades” para a próxima etapa de calibração para o link representativo da rodovia e rota 2, já que velocidades simuladas ainda apresentavam-se abaixo das velocidades reais.

Na terceira e última etapa de calibração foram retomadas os perfis arbitrados para velocidades desejadas, e estas distribuições proporcionam uma boa representação das velocidades reais na rota 2 (veículos leves e pesados que seguem pela BR-290). Para a rota 1 – Estrada-do-Mar, veículos leves apresentaram diferenças, em média, de 9 km/h entre velocidades simuladas e suas respectivas reais, havendo diferenças estatísticas significativas.

Buscando corrigir as diferenças de velocidades de veículos leves que tomam a rota 1 (saída para Estrada-do-Mar), definiu-se parâmetros de *car-following* específicos para o link representativo da curva, já que o software permite tal flexibilidade. Foram aplicados os parâmetros de “baixas capacidades”. Estes parâmetros possuem a característica teórica de aumentarem os espaçamentos entre veículos, diminuindo assim as velocidades, fenômeno observado em curvas acentuadas.

Após a simulação “e”, observou-se melhora nas velocidades simuladas de veículos leves que tomam a rota 1 – Estrada-do-Mar, porém estas ainda encontravam-se maiores do que as reais. Contudo, as diferenças variaram entre 5 e 10 km/h, que representam diferenças estatisticamente significativas. Também foi verificada uma inesperada melhora nas velocidades simuladas de veículos leves e pesados que seguem pela rota 2 – BR-101.

Com o modelo apresentando velocidades calibradas para a rota 2 (BR-101), esforços de calibração foram dispensados para o entendimento e compatibilização das velocidades de veículos leves na rota 1 (acesso a RS-389 – Estrada-do-Mar). O acesso modelado possui

inicialmente uma curva de raio longo, e este raio diminui na medida em que há o encontro com a rodovia Estrada-do-Mar, forçando os veículos a trafegarem com menores velocidades.

Este fenômeno pode ser representado através da inserção, sobre o *link* representativo da curva, de “área com redução de velocidades”. A “área com redução de velocidades” é artifício disponível no software para representar zonas onde veículos apresentam comportamentos específicos. Sob estas “áreas”, veículos devem imprimir distribuição de velocidades e acelerações/desacelerações especificadas pelo especialista.

Tabela 4: Resultados da calibração por intervalo de tempo, classe veicular e rota

segundos		Rota 1 - RS-030 - Veic.Leves			ANOVA	Rota 2 - BR-101 - Veic.Leves			ANOVA	Rota 2 - BR-101 - Caminhões			ANOVA
		observ.	média	desvio.p	valor-P	observ.	média	desvio.p	valor-P	observ.	média	desvio.p	valor-P
		km/h		km/h		km/h		km/h		km/h		km/h	
900	real	99	89,94	12,08	0,053519	34	102,36	10,16	0,122545	16	78,31	8,39	0,014342
	simulado	496	91,90	8,04	media.igual	99	99,82	7,87	media.igual	40	82,31	2,70	dif.sign
1800	real	79	88,37	9,26	0,000275	35	103,87	12,38	0,057729	20	77,33	4,98	0,000060
	simulado	463	92,09	8,26	dif.sign	73	100,14	7,75	media.igual	26	83,02	3,15	dif.sign
2700	real	80	90,91	10,79	0,887082	32	104,04	7,67	0,044893	21	79,41	6,28	0,011753
	simulado	460	91,01	9,20	media.igual	91	100,19	8,65	dif.sign	60	82,35	2,99	dif.sign
3600	real	89	91,39	9,84	0,673576	40	101,67	12,71	0,491188	20	80,15	5,98	0,176832
	simulado	505	91,02	10,18	media.igual	113	100,23	8,34	media.igual	30	81,75	2,57	media.igual
4500	real	79	88,55	12,16	0,002569	37	101,35	10,95	0,189677	24	80,42	5,30	0,790610
	simulado	449	91,56	7,40	dif.sign	107	98,87	11,24	media.igual	30	80,93	4,97	media.igual
5400	real	83	88,45	9,68	0,001282	27	100,33	8,42	0,403274	25	79,35	6,35	0,638017
	simulado	452	91,74	8,49	dif.sign	102	97,95	12,20	media.igual	46	80,44	9,55	media.igual

Novos dados sobre velocidades de veículos leves, que trafegaram especificamente no trecho do acesso a calibrar, foram coletados. Estes novos dados apresentaram médias de velocidades de 89,6 km/h, com desvio padrão de 2,34 km/h, e foram inseridos como velocidades que veículos leves deveriam imprimir na rota 1, reproduzindo o efeito de curva. O resultado foi uma calibração sem diferenças estatísticas para três dos seis intervalos de tempo modelados. Os intervalos com diferenças estatísticas apresentaram de 3 a 4 km/h de diferença entre velocidades modeladas e reais. A Tabela 4 apresenta os dados finais da calibração, separados por intervalo de simulação, classe veicular e rota.

4. Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma revisão sobre a calibração do software VISSIM e seu algoritmo de *car-following* psicofísico, analisando a aplicabilidade das experiências reportadas na literatura em um estudo de caso de uma autoestrada brasileira.

Durante o levantamento bibliográfico sobre o assunto, foram identificados os parâmetros do algoritmo que mais influenciam nas capacidades rodoviárias e seus limites máximos, *default* e mínimos, sendo eles respectivamente: “distância de parada (metros) – CC0” (1,74; 1,50; 1,45); (ii) “tempo de *headway* (segundos) – CC1” (2,77; 0,90; 0,80) e; (iii) “limites do *following*’ negativos e positivos (adimensionais) – CC4 e CC5” (2,00; 0,35; 0,25). O parâmetro CC0 apresentou variabilidade total de 0,29 metros, enquanto o parâmetro CC1 variou 1,97 segundos. Os parâmetros adimensionais CC4 e CC5 variaram em 1,75.

A calibração do estudo de caso possuiu o objetivo de verificar a aplicabilidade dos valores levantados na bibliografia para o contexto brasileiro. Embora todos os trabalhos levantados focassem no ambiente rodoviário, não foi verificada referência sobre a influência dos perfis de velocidades desejadas, que são resultantes de limites regulamentares, características de frota e ambiente viário, sobre a calibração. No estudo de caso, fluxos observados mantiveram-se praticamente constantes, e representaram um carregamento de menos de 50% da capacidade da via simulada. Nestas condições, a alteração dos parâmetros de *following* apresentou pouco impacto nas velocidades modeladas. Os perfis de velocidades desejadas são

elementos não mencionados na literatura, e que tem grande influência na qualidade dos resultados da simulação quando esta estiver representando baixas intensidades de fluxos de tráfego, onde veículos possuem liberdade de manobras.

Os veículos apresentam comportamento e velocidades diferenciadas em trecho em curva. Parâmetros de calibração válidos para segmentos retos podem não ser adequados para trechos em curva. Duas características do VISSIM foram importantes para a calibração do trecho em curva, a possibilidade de definição de parâmetros diferenciados por faixa e a definição de segmentos com características de velocidades especiais.

Pesquisa ampliada se faz necessária utilizando intensidades de tráfego próximas da capacidade da via. Nestas condições, é provável que parâmetros de *car-following* e perfis de velocidades desejadas apresentem importâncias relativas bem maiores, e os efeitos da alteração de ambos os parâmetros sobre velocidades reais seja relevante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBADIPUDI, R., DOROTHY, P. E KILL, R. (2006) Development and Validation of Large-Scale Microscopic Models. *Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., CD-ROM.
- BLOOMBERG, L. E J. DALE (2000) Comparison of VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network. *Transportation Research Record 1727*, TRB, National Research Council, Washington D.C. pp. 52-60.
- GOMES, G., MAY, A. E HOROWITZ, R. (2004) A Microsimulation Model of a Congested Freeway using VISSIM. *Transportation Research Record 1876*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 2004. pp. 71-81.
- FELLENDORF E VORTISCH (2001) Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. *Proceedings of the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., CD-ROM.
- KIM, S-J E L.R. RILLET (2007) Simultaneous Calibration of a Microscopic Traffic Simulation Model and OD Matrix. *Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., CD-ROM.
- LOWNES, N. E MACHEMEHL R. (2006) Sensitivity of Simulated Capacity to VISSIM Driver Behavior Parameter Modification. *Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., CD-ROM.
- MOEN, B., FITTS, J., CARTER, D., E Y. OUYANG (2000) A Comparison of the VISSIM Model to Other Widely Used Traffic Simulation and Analysis Programs. Presented at the *Institute of Transportation Engineers 2000 Annual Meeting and Exhibit*, Nashville, TN.
- PANWAI, S. E H. DIA (2005) Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 6, no. 3, Setembro de 2005.
- PARK, B. E H. QI (2006) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of VISSIM. *Proceedings of the 2006 IEEE ITSC Intelligent Transportation Systems Conference*, Toronto, Canadá, pg. 1471-1476.
- PTV (2006) VISSIM v.4.20 User Manual. PTV – Planung Transport Verkehr AG.
- TIAN, Z. Z., URBANIK, T., ENGELBRECHT, R., E K. BALKE (2002) Variations in Capacity and Delay Estimates from Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record 1802*, TRB, National Research Council, Washington D.C. pp. 23-31.
- WIEDEMANN, R. (1991) Modeling of RTI-Elements on Multi-Lane Roads. In: *Advanced Telematics in Road Transport*. Edited by Commission of the European Community, DB XIII, Brussels.
- ZHIZHOU, W., JIAN, S. E Y. XIAO GUANG (2005) Calibration of Vissim for Shanghai Expressway Using Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. Eds. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, pg.2645-2648.

Marcelo Leismann de Oliveira
Helena Beatriz Bettella Cybis

(leismann@gmail.com)
(helenabc@producao.ufrgs.br)

Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS