

CALIBRAÇÃO DO MODELO FLUXO-VELOCIDADE DO SIMULADOR INTEGRATION A PARTIR DE TEMPOS DE PERCURSO EM VIAS URBANAS

Diogo Artur Tocacelli Colella

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Transportes

Sergio Henrique Demarchi

Universidade Estadual de Maringá
Departamento de Engenharia Civil
Grupo de Engenharia de Transportes

RESUMO

O objetivo deste trabalho é calibrar e validar o modelo fluxo-velocidade do INTEGRATION a partir de tempos de percurso obtidos em uma via arterial semaforizada, com o auxílio de duas câmeras digitais localizadas em interseções limítrofes do segmento. O método de calibração consiste na realização de uma série de simulações, nas quais os parâmetros de calibração do modelo são variados sistematicamente, de forma a minimizar uma função de erro, obtido a partir das diferenças entre frequências relativas de tempos observados em campo e obtidos através de simulação. A completa automatização de etapas de manipulação de arquivos de dados, de resultados e execução das simulações tornou o procedimento de calibração bastante eficiente, embora sua rotina de minimização do erro ainda seja sujeita a identificação de mínimos locais, ao invés de mínimos globais, sugerindo o aprimoramento do método com a utilização de uma rotina de busca mais sofisticada.

ABSTRACT

In this paper, the INTEGRATION speed-flow relationship is calibrated and validated against travel times measured in a segment of a signalized arterial street by means of two digital camcorders, located at upstream and downstream intersections of the segment. The calibration process consists of a sequence of simulations in which calibration parameters values are iteratively changed, in order to minimize the error between relative frequencies of observed and simulated travel times. Since the creation of input and output files and simulation runs are automatically done by a computational routine, the whole process is very efficient. However, the routine for error minimization is still subject to find local minima, instead of a global minimum, suggesting that the method should be improved with the use of a more sophisticated search routine.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Crowther (2001), a quantidade de viagens, expressa em veículos-milhas, que vem sendo realizadas nas rodovias atuais vem crescendo constantemente, indicando que a demanda no sistema de transportes está crescendo mais rápido do que as melhorias vêm sendo feitas. Dessa forma, os planejadores de sistema de transportes, engenheiros e analistas devem enfatizar o gerenciamento do tráfego, adotando estratégias que promovam a utilização do sistema de tráfego com a maior eficiência operacional possível.

Os simuladores de tráfego são ferramentas cada vez mais utilizadas como suporte ao processo de gerenciamento da operação viária e análise do desempenho de sistemas de tráfego de grande complexidade (Hourdakis *et al.*, 2003). A grande vantagem da simulação de tráfego é permitir que a análise e a comparação de medidas de desempenho para cenários alternativos sejam feitas sem a necessidade de introduzir qualquer tipo de modificação no sistema real antes da avaliação efetiva dos resultados obtidos.

Para que um simulador possa fornecer resultados confiáveis sobre a operação do sistema de tráfego, é fundamental que os parâmetros de um simulador sejam corretamente calibrados e validados. Segundo Houdarkis *et al.* (2003), a calibração é feita através da variação dos parâmetros e execução de simulações que produzem resultados similares a uma determinada variável observada em campo, tal como a velocidade média da corrente de tráfego ou o volume que passa por uma seção de controle. A validação do modelo é a comparação dos resultados obtidos por simulação com os dados observados. Dessa maneira, calibração e validação são realizadas simultaneamente, em um processo iterativo, até que as variáveis observadas em campo e obtidas por simulação sejam similares.

Considerando que um simulador de tráfego possui diversos parâmetros que podem ser ajustados conforme o cenário a ser representado, é desejável a definição de um método de calibração e validação que substitua o método mais intuitivo, no qual os parâmetros são definidos por tentativa e erro. Além disso, é importante a utilização de rotinas que permitam, na medida do possível, automatizar o processo de calibração e validação dos parâmetros.

Colella *et al.* (2004) definiram um método para calibração e validação de parâmetros do simulador INTEGRATION, visando replicar, através de simulação, a dispersão de pontos espaçamento-velocidade observados em campo. Uma das limitações do método proposto pelos autores é que os parâmetros obtidos a partir de dados coletados em um local (no caso, próximo de uma interseção semaforizada), não representam com o mesmo nível de precisão a relação entre espaçamento e velocidade observada em um local diferente, tal como no meio do segmento entre duas interseções semaforizadas. Esta constatação é confirmada também por outros autores, tais como May (1990), Hall (1992) e Hall *et al.* (1992), que citam a dificuldade de se realizar coletas em um único local para se caracterizar todos os regimes previstos pela relação entre as variáveis fundamentais de tráfego.

A outra limitação do modelo proposto por Colella *et al.* (2004) é que todas as simulações eram realizadas manualmente, tornando o processo de calibração extremamente moroso e sujeito a erros, devido à necessidade de manipular uma grande quantidade de dados durante a criação dos arquivos de simulação ou durante a análise dos resultados obtidos.

As limitações apresentadas motivaram a elaboração deste trabalho, cujo objetivo é apresentar um método de calibração e validação de parâmetros do modelo fluxo-velocidade do simulador de tráfego INTEGRATION, de forma a replicar uma distribuição de tempos de percurso gastos pelos veículos para percorrer a distância entre duas interseções semaforizadas consecutivas. Desta forma, elimina-se o problema da dependência do local de coleta, observada anteriormente, ao se utilizar como base de calibração uma medida de desempenho que reflete o comportamento veicular no segmento de via como um todo. Além disso, o processo de calibração foi totalmente automatizado, reduzindo de forma significativa a necessidade de manipulação de dados e o tempo necessário para definição dos parâmetros ótimos.

O trabalho é composto por 5 itens, incluindo esta introdução. O item 2 fornece detalhes sobre os parâmetros a serem calibrados. O item 3 descreve o método proposto para a obtenção dos parâmetros de calibração. No item 4 são analisados os resultados obtidos, e, por fim, o item 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO INTEGRATION

O comportamento dos veículos trafegando em um segmento de via é representado no INTEGRATION (Rakha, 2004) pelo modelo fluxo-velocidade proposto por Van Aerde (1995). Este modelo, que é calibrado macroscopicamente de forma a representar o comportamento da corrente de tráfego como um todo, também busca representar a interação entre veículos trafegando em pelotões. Desta maneira, o espaçamento entre dois veículos consecutivos, trafegando em uma mesma faixa de tráfego, é função da velocidade do veículo, conforme mostra a equação (1):

$$s = \frac{1}{k_j} \left[\frac{v_f (v - v_c)^2}{v_c^2 (v_f - v)} \right] + \frac{v}{q_c} \quad (1)$$

em que s : espaçamento entre veículos na mesma faixa de tráfego [km];

v : velocidade [km/h];

v_f : velocidade de fluxo livre [km/h];

v_c : velocidade na capacidade do arco [km/h];

q_c : capacidade do arco [veíc/h/faixa]; e

k_j : densidade de congestionamento [veíc/km/faixa].

A relação entre fluxo e velocidade é obtida a partir da expressão (1), considerando que a densidade k da corrente de tráfego é o inverso do espaçamento s e que o fluxo q é o produto da densidade k pela velocidade v , conforme define a relação fundamental de fluxo de tráfego.

A calibração do modelo de Van Aerde é feita através do ajuste dos valores de 4 parâmetros listados anteriormente. Colella *et al.* (2004) estimaram em 58 km/h a velocidade de fluxo livre para vias arteriais semaforizadas de Maringá, admitindo que este valor corresponda ao 85º percentil da distribuição de velocidades observadas para condições em que o fluxo de tráfego é leve. A densidade de congestionamento foi estimada por Demarchi *et al.* (2003), considerando o espaçamento médio ocupado por automóveis nas filas formadas nas aproximações de interseções semaforizadas durante a indicação de vermelho. A capacidade e a velocidade na capacidade, cujos valores são, respectivamente, 2115 cpe/h/faixa e 27 km/h, foram estimadas por Colella *et al.* (2004) através de um procedimento iterativo, similar ao utilizado neste trabalho, no qual os parâmetros de calibração são definidos de forma a reproduzir uma dispersão de pares espaçamento-velocidade similar à dispersão observada em campo.

Além dos parâmetros do modelo fluxo-velocidade, é preciso calibrar mais dois parâmetros para conseguir a dispersão de pontos espaçamento-velocidade observada em campo. Dessa maneira, Colella *et al.* (2004) determinaram um coeficiente de variação da velocidade ($Cv_v = 0,50$), que corresponde à razão entre o desvio-padrão e o valor da velocidade estimada pela expressão (1), e um fator que expressa o percentual da potência máxima utilizada pelos veículos durante fases de aceleração e retomada de velocidade ($p_{pmax} = 0,50$).

Deve ser observado que o valor de $Cv_v = 0,50$ foi determinado para a versão do INTEGRATION disponível na época, na qual era considerado que a velocidade variava num intervalo entre a velocidade de fluxo livre e valores menores que esta. Na versão mais recente do INTEGRATION (2.30g, de janeiro de 2005), o coeficiente de variação da velocidade produz uma dispersão de velocidades acima ou abaixo da curva fluxo-velocidade, sendo que o valor limite desse parâmetro passou a ser igual a 0,20. O novo limite considerado na versão 2.30g do INTEGRATION, utilizada neste trabalho, implica na necessidade de uma nova calibração deste parâmetro.

3. MÉTODO PROPOSTO

O processo de calibração e validação dos parâmetros mencionados no item 2 é uma adaptação do método originalmente proposto por Colella *et al.* (2004), tomando como base a simulação de uma rede simplificada com características geométricas e de controle semelhantes a um segmento de via real. Após a codificação do cenário, diversas simulações são realizadas, com a variação sistemática dos parâmetros de calibração, de tal forma que a distribuição de tempos de percurso, obtidos através da simulação, replique o mais fielmente possível a distribuição de tempos de percurso observados em campo. O conjunto de parâmetros de calibração será adotado como aquele que minimiza uma função de erro, calculada a partir das distribuições de frequência de tempos de percurso observados e simulados.

No item 3.1 é descrita a etapa de obtenção dos tempos de percurso entre duas interseções de um segmento de via da Av. Colombo, em Maringá e, no item 3.2, é descrito o processo de codificação deste segmento viário no simulador INTEGRATION. As distribuições de frequências relativas dos tempos de percurso observados em campo e obtidos por simulação são então comparadas (item 3.3), definindo uma medida de erro, que é minimizada de forma iterativa (item 3.4) até a obtenção dos parâmetros ótimos.

3.1. Obtenção dos Tempos de Percurso em Campo

Os tempos de percurso foram obtidos em um segmento da Av. Colombo, entre as Avenidas Lauro Eduardo Werneck e Paraná, na cidade de Maringá, PR. Este segmento de 391 m de extensão é composto por 2 pistas e 4 faixas por sentido, sendo que a entrada e saída de veículos no segmento é controlada por semáforos. As coletas foram realizadas no dia 20 de outubro de 2004, entre 7:45 e 8:45 da manhã, nas duas faixas centrais da pista Leste-Oeste.

Os tempos de percurso foram estimados a partir da identificação dos instantes de passagem dos veículos por seções de controle, determinados com o auxílio de duas câmeras filmadoras digitais, apoiadas sobre tripés, cada uma delas focando a faixa de cruzamento de pedestres de cada interseção limítrofe do segmento (Figura 1). Para obter uma mesma referência de tempo, os instantes de início da gravação em ambas as filmadoras foram sincronizados com o auxílio de rádios comunicadores.

Para obter os instantes de passagem dos veículos pelas seções de controle, as filmagens foram transferidas para um computador através de uma conexão *Firewire*, e, em seguida, analisadas com o auxílio do aplicativo de vídeo *Pinnacle Studio DV 8.0*. Com esse aplicativo, torna-se possível adicionar digitalmente uma seção de controle a jusante da faixa de pedestres. Como exemplo, a Figura 1a mostra a aproximação de um automóvel branco e o instante em que seu pára-choque traseiro cruza a seção de controle 1, localizada no cruzamento com a Av. Lauro Werneck. Em seguida, é feita a identificação do instante em que o pára-choque traseiro deste mesmo veículo passa pela seção de controle 2 (Figura 1b), no cruzamento da Av. Colombo com Av. Paraná. A diferença entre os instantes de passagem pela seção 1 e pela seção 2 fornece o tempo de percurso que, no caso, é de 30,8 s.

O processo de análise dos 2 vídeos, incluindo o pareamento de veículos em ambos, a identificação dos instantes de passagem pelas seções de controle e digitação do modelo do veículo e instantes de passagem em uma planilha eletrônica, durou aproximadamente 12 h. No total, foram observados 483 veículos nas duas faixas, em pouco mais de 51 min de filmagem, o que corresponde a uma taxa de fluxo de 568 veíc/h, dos quais 56% são automóveis, 11% utilitá-

rios (caminhonetes, vans e peruas), 27% de caminhões rígidos e ônibus, e 6% de caminhões articulados (semi-reboque e duplo semi-reboque).

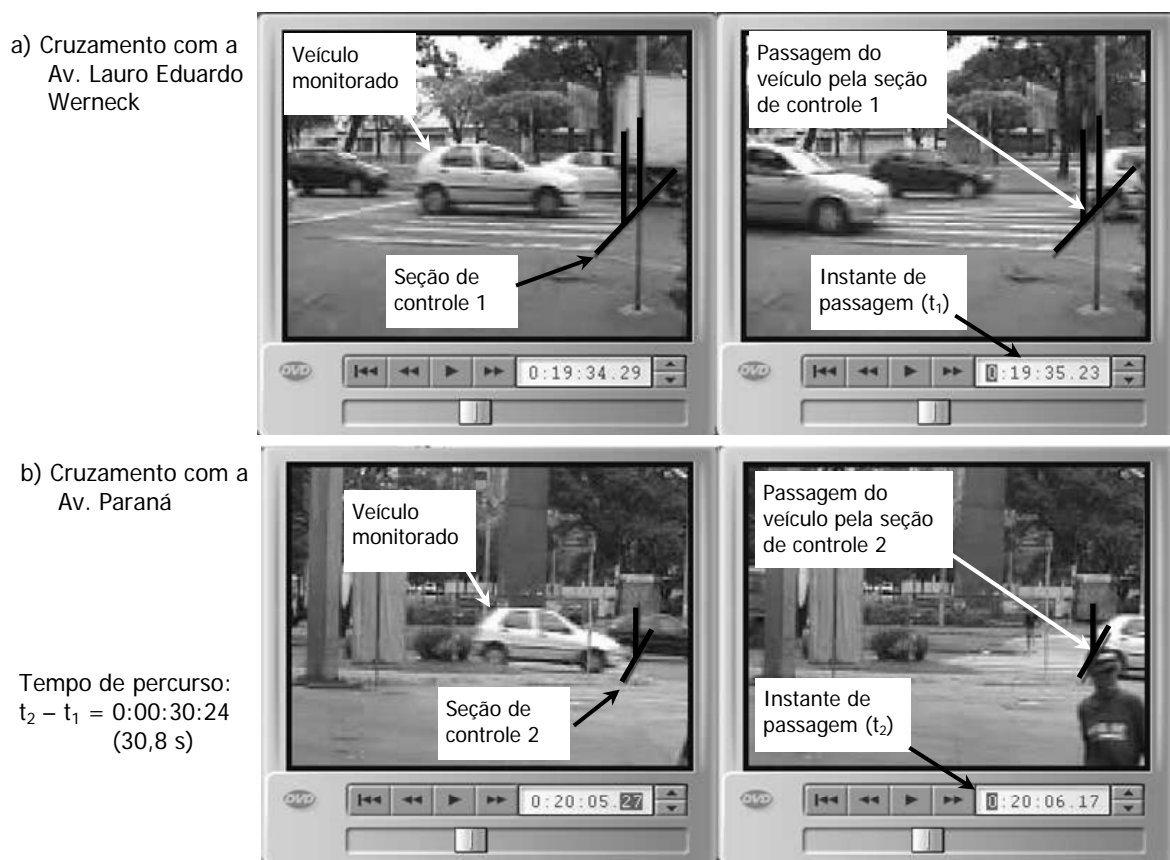


Figura 1: Definição dos instantes de passagem de um veículo pelas seções de controle 1 e 2

A distribuição relativa de frequências dos tempos de percurso dos 483 veículos é apresentada na Figura 2. Observa-se, para o esquema de defasagens entre semáforos adotado no dia da coleta, que 44% dos veículos conseguem realizar o percurso entre as interseções com tempos variando entre 20 e 40 s, sem a necessidade de parar no cruzamento da Av. Paraná. Por outro lado, 56% dos veículos restantes realizam o mesmo percurso com tempos que variam entre 76 e 122 s, parando na segunda interseção do segmento analisado.

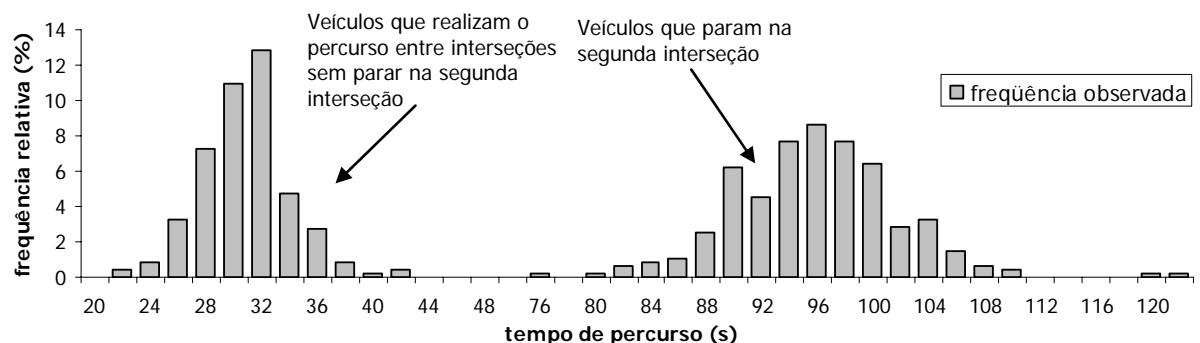


Figura 2: Distribuição de frequências relativas de tempos de percurso observados

3.2. Codificação dos Cenários e Obtenção dos Tempos de Percurso por Simulação

Para obter uma distribuição de tempos de percurso através de simulação, semelhante à observada em campo, o segmento de via da Av. Colombo foi codificado no simulador INTEGRATION. A rede codificada (Figura 3) é composta por 3 arcos, o primeiro deles para entrada e dispersão dos veículos nas faixas de tráfego, o segundo para obtenção dos tempos de percurso entre as interseções semaforizadas, e o terceiro para saída dos veículos da rede. Os tempos de ciclo (86 s), a duração dos verdes (27 s) para as aproximações de ambas as interseções e a defasagem entre a abertura dos semáforos (17 s) foram medidas em campo, durante a realização das filmagens.

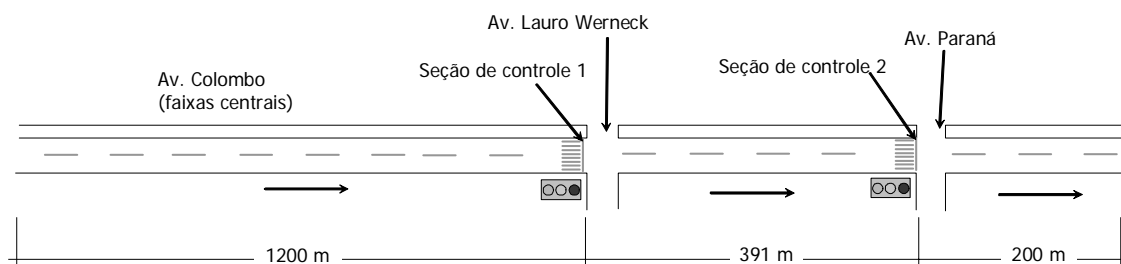


Figura 3: Configuração da rede de simulação

A taxa de fluxo considerada na simulação é de 568 veíc/h, conforme a quantidade de veículos observada nas filmagens. A composição do tráfego nas simulações foi adotada também em função das proporções de veículos observados em campo. Os parâmetros para calibração do modelo de desempenho do INTEGRATION, apresentados na Tabela 1, foram adaptados de valores definidos estudos anteriores (Demarchi *et al.*, 2001; Demarchi e Setti, 2001; Demarchi e Setti, 2000). As equivalências entre espaçamentos, também apresentadas na Tabela 1, foram definidas em função de valores encontrados por Demarchi *et al.* (2003).

Tabela 1: Parâmetros de calibração do modelo de desempenho

Parâmetro	automóveis	utilitários	Caminhões rígidos e ônibus	caminhões articulados
Peso (kg)	1.067	1.500	15.000	44.000
porcentagem do peso sobre o eixo motriz	0,50	0,50	0,67	0,39
coeficiente de aderência pneu-pavimento	0,60	0,60	0,60	0,60
potência do motor (kW)	69	97	115	250
eficiência da transmissão	0,83	0,83	0,83	0,83
coeficiente aerodinâmico	0,3	0,5	0,9	0,8
área frontal (m ²)	2,3	3,0	9,0	9,0
coeficiente de rolamento	1,2	1,2	1,2	1,2
constante para tipo de pneu (C ₂)	0,025	0,025	0,025	0,025
constante para tipo de pneu (C ₃)	4,1	4,1	4,1	4,1
equivalência entre espaçamentos	1,00	1,21	2,12	3,58

É importante mencionar que duas simplificações foram consideradas na elaboração da rede. A primeira é que os arcos da rede possuem somente duas faixas de tráfego, enquanto que a Av. Colombo possui quatro faixas. Isso se justifica pelo fato de que as observações de tempos de percurso em campo foram realizadas somente para as duas faixas centrais de um dos sentidos

da Av. Colombo.

A segunda simplificação refere-se à programação semafórica. No sistema real, os semáforos de ambas as interseções são programados com 3 fases, sendo a primeira para a Av. Colombo (sentido leste-oeste), a segunda para a Av. Colombo (sentido oeste-leste) e a terceira para a Av. Lauro Werneck (sentidos norte-sul e sul-norte). Como as simulações contemplam apenas veículos trafegando no sentido leste-oeste (Av. Colombo), é possível considerar que ambas as interseções possuem semáforos de 2 fases, sendo uma delas alocada para a aproximação da Av. Colombo e a segunda para as vias transversais. A descarga de veículos ocorre somente durante a primeira fase.

3.3. Planejamento das Simulações e Cálculo do Erro entre as Distribuições de Tempo de Percurso

As simulações foram realizadas com diferentes conjuntos de parâmetros, definidos a partir de um planejamento fatorial com dois níveis para cada parâmetro, similar ao utilizado por Colella *et al.* (2004). Os valores iniciais, mostrados Tabela 2, foram adotados de forma a contemplar uma faixa de variação ampla, garantindo que o conjunto de parâmetros de calibração esteja contido nesta faixa. Deve ser observado que a velocidade de fluxo livre também é determinada através das simulações, ao contrário de Colella *et al.* (2004), o que duplica o número de simulações a serem realizadas.

Tabela 2: Níveis iniciais adotados para os parâmetros de calibração

Parâmetros de calibração	q_c (cpe/h/faixa)	v_f (km/h)	v_c (km/h)	Cv_v	$P_{Pmáx}$
Valores mínimos	1500	50	15	0,00	0,50
Valores máximos	2300	70	45	0,20	1,00

Cada simulação foi realizada com 3900 s, sendo os 300 s iniciais considerados como tempo de *warm-up* e descartados da análise, para evitar que a distribuição obtida fosse influenciada pelos menores tempos de percurso quando os arcos ainda estão vazios no início da simulação. Após a realização de cada simulação, os tempos de percurso foram obtidos do arquivo 16, de resultados, do INTEGRATION e, em seguida, utilizados para a elaboração de uma distribuição de tempos de percurso similar à mostrada na Figura 2. A medida de erro entre as distribuições de frequências relativas (δ) foi então calculada como sendo a soma das diferenças entre as frequências relativas de tempos observados (p_i^{obs}) e obtidos por simulação (p_i^{sim}), para cada um dos i intervalos de 2 segundos considerados na elaboração dos histogramas:

$$\delta = \sum_i |p_i^{obs} - p_i^{sim}| \quad (2)$$

3.4. Minimização do Erro

Para automatizar o processo de busca do conjunto de parâmetros que minimiza o erro definido pela equação (2), uma macro em Visual Basic foi elaborada. Tomando como base o conjunto de parâmetros fornecidos pelo usuário (Tabela 2), a macro gera as 32 combinações possíveis para os 5 parâmetros considerados, listando as combinações em uma planilha eletrônica. Em seguida, modifica os arquivos de simulação com os valores dos parâmetros de cada combinação listada e roda o INTEGRATION. Após cada simulação, a macro abre o arquivo de resultados, obtém os tempos de percurso e constrói o histograma de frequências relativas. O erro entre distribuições é então calculado, de acordo com a equação (2).

Em função dos erros calculados, a macro identifica o conjunto de parâmetros que minimiza o erro para a primeira iteração e define novos valores mínimos e máximos dos parâmetros, reduzindo o intervalo de busca para a próxima iteração. Este procedimento é ilustrado na Figura 4, considerando somente duas dimensões (uma para cada parâmetro), por questões de representação da figura em um espaço bidimensional. Como existem cinco parâmetros a serem calibrados, o processo de busca ocorre, na verdade, em um hipercubo de cinco dimensões.

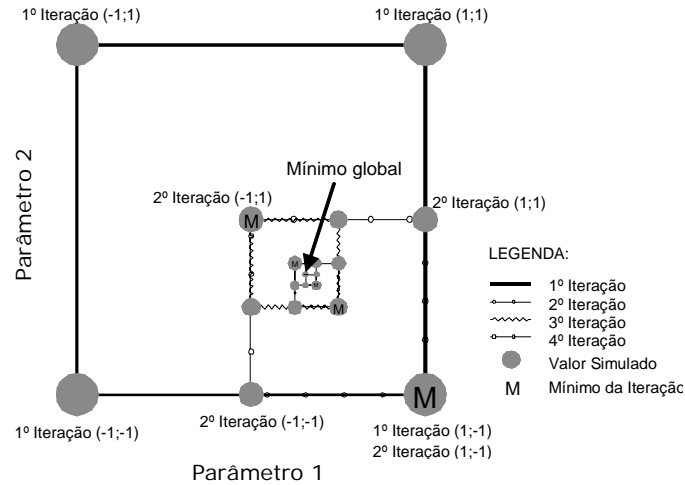


Figura 4: Procedimento de busca dos parâmetros que minimizam o erro entre as distribuições de tempo de percurso (Colella *et al.*, 2004)

O procedimento completo é repetido iterativamente até que os valores mínimos e máximos de todos os cinco parâmetros converjam para um ponto em comum, indicando que o conjunto de parâmetros que minimiza o erro foi encontrado.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os parâmetros que minimizam o erro são $q_c = 2100$ cpe/h/faixa, $v_f = 65$ km/h, $v_c = 37,5$ km/h, $Cv_v = 0,50$ e $p_{Pmax} = 0,15$, para um erro $\delta = 32,15\%$. Estes parâmetros foram encontrados após 13 iterações, com a realização de 246 simulações, que duraram cerca de 2,5 h no total, ou seja, 34 s em média para cada simulação.

No entanto, é possível que os parâmetros encontrados não correspondam, necessariamente, ao erro mínimo global, mas somente a um mínimo local. Para investigar esta hipótese, foi decidido realizar mais três novas rodadas de simulações, considerando como ponto de partida para definição dos parâmetros das novas iterações os três menores erros obtidos na primeira iteração ($\delta_2 = 54,04\%$, $\delta_3 = 62,36\%$ e $\delta_4 = 68,82\%$), além do erro mínimo na primeira iteração da primeira rodada ($\delta_1 = 51,84\%$). Para cada uma das novas rodadas, foram realizadas entre 198 e 228 simulações, que resultaram em novos valores de erro, mostrados na Figura 5, juntamente com os erros obtidos na primeira rodada.

De fato, observa-se na Figura 5 e na Tabela 3 que, apesar do erro considerado para a primeira rodada (51,84%) ser menor que o erro da rodada 4 (68,82%), o erro obtido ao final do processo é menor no caso da rodada 4 (26,32%). No caso da primeira rodada, o erro converge para um mínimo local de 32,15% logo na 3ª iteração, enquanto que nas outras rodadas isso só ocorre entre a 10ª ou 12ª iterações.

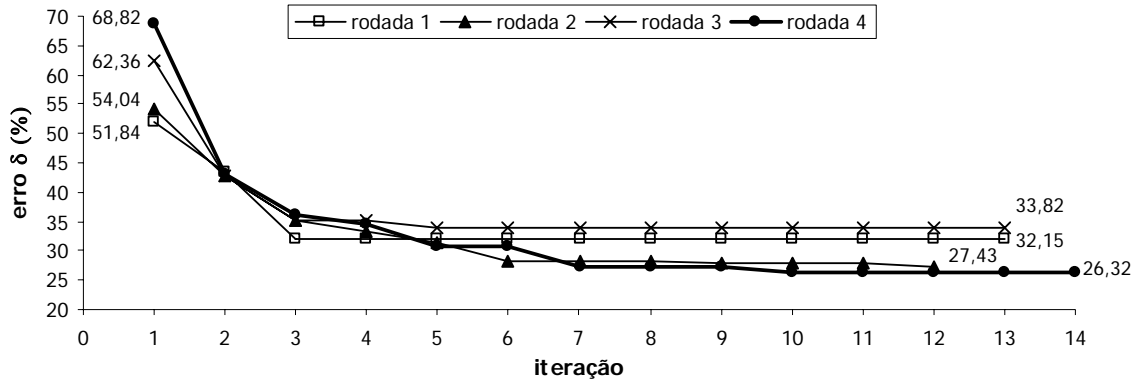


Figura 5: Erros obtidos em cada iteração, para diferentes rodadas de simulação

Na Tabela 3 também são mostrados os parâmetros que minimizam o erro entre as distribuições de tempos observados e simulados para cada uma das rodadas de simulação. De uma forma geral, é possível concluir que os parâmetros capacidade, velocidade de fluxo livre e velocidade na capacidade variam pouco de uma rodada para outra, enquanto que o coeficiente de variação da velocidade e o percentual da potência máxima variam de forma mais significativa dependendo da rodada de simulações considerada.

Tabela 3: Parâmetros ótimos e erros mínimos para as rodadas de simulação

Rodada	1	2	3	4
Erro mínimo δ (%)	32,15	27,43	33,82	26,32
capacidade q_c (cpe/h/faixa)	2100	2075	2051	2238
Velocidade de fluxo livre v_f (km/h)	65,00	62,43	60,00	59,73
Velocidade na capacidade v_c (km/h)	37,50	38,44	37,50	34,16
Coeficiente de variação da velocidade Cv_v	0,15	0,19	0,19	0,03
Percentual da potência utilizada p_{Pmax}	0,50	1,00	1,00	0,93

A Figura 6 compara as distribuições de freqüências relativas dos tempos de percurso observados em campo com os tempos obtidos através de simulação, considerando os parâmetros de calibração $q_c = 2238$ cpe/h/faixa, $v_f = 59,73$ km/h, $v_c = 34,16$ km/h, $Cv_v = 0,03$ e $p_{Pmax} = 0,93$, definidos na quarta rodada de simulações. Observa-se que a maior diferença entre as freqüências relativas dos tempos observados e simulados é de 2,96% para veículos que não param na segunda interseção do segmento de via, enquanto que a maior diferença para veículos que param na interseção em virtude do semáforo estar fechado é de 2,80%. Apesar dessas diferenças, nota-se que as duas distribuições de freqüência são bastante próximas, o que demonstra que os parâmetros de calibração obtidos são capazes de replicar adequadamente o comportamento veicular no sistema real.

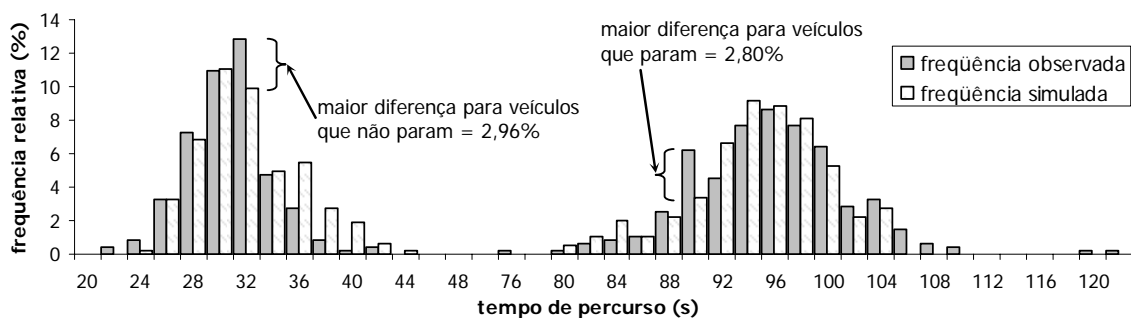


Figura 6: Histogramas de freqüências relativas de tempos de percurso observados e simulados

A Figura 7 mostra o formato da relação entre fluxo e velocidade (Figura 7a) e da relação entre densidade e velocidade (Figura 7b). Os resultados obtidos são similares aos obtidos por Colella *et al.* (2004), indicando que a curva fluxo-velocidade tem um formato aproximadamente parabólico, mas com uma velocidade da capacidade maior que a metade da velocidade de fluxo livre e uma capacidade menor que $(v_f k_j)/4$, prevista pelo modelo de Greenshields (1935). Tais diferenças resultam em uma relação entre densidade e velocidade que não é definida por uma reta, ao contrário do previsto pelo modelo de Greenshields.

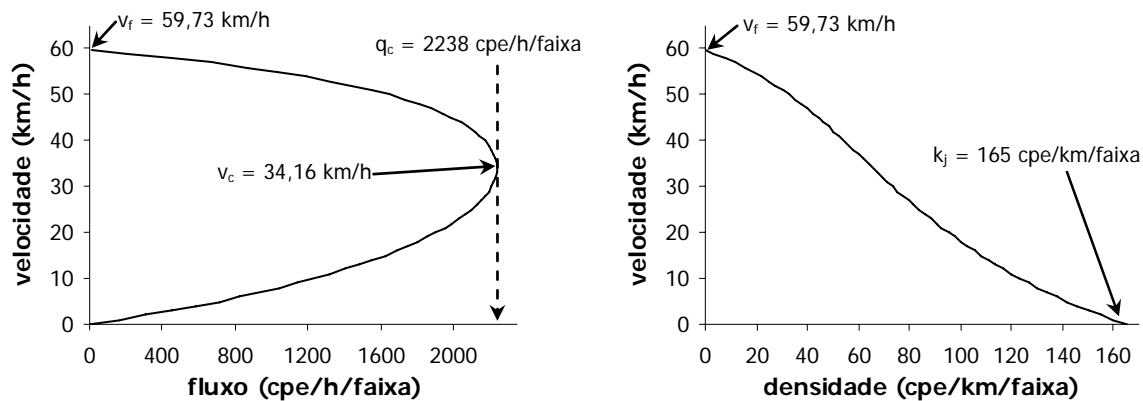


Figura 7: a) relação fluxo-velocidade; b) relação densidade-velocidade

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho descreveu um método para calibrar e validar o modelo fluxo-velocidade incorporado ao simulador de tráfego INTEGRATION, tomando como base a minimização de uma medida de erro entre os tempos de percurso observados em um determinado segmento de via e os obtidos por simulação.

Parte dos parâmetros de calibração, obtidos neste estudo para um segmento de 391 m da Av. Colombo, são similares aos obtidos no estudo de Colella *et al.* (2004). A capacidade estimada neste trabalho é igual 2238 cpe/h/faixa, valor 6% maior que 2115 cpe/h/faixa estimado anteriormente. A velocidade de fluxo livre, igual a 59,73 km/h, é somente 3% maior que o valor determinado anteriormente (58 km/h), e muito próxima do limite de 60 km/h estabelecido para a Av. Colombo. O coeficiente de variação da velocidade ($Cv_v = 0,03$) sugere a existência de uma pequena parcela de veículos que trafega com velocidades ligeiramente superiores a velocidade de fluxo livre e, eventualmente, maiores que a velocidade limite. A variação observada é menor que a obtida por Colella *et al.* (2004), em virtude das diferenças entre versões do INTEGRATION utilizadas nos dois estudos e do tipo de variáveis comparadas (espaçamentos e velocidades no estudo anterior, tempos de percurso neste trabalho).

A velocidade na capacidade ($v_c = 34,16$ km/h) é 19% maior que 27 km/h, determinado por Colella *et al.* (2004). Esta diferença reflete, provavelmente, diferenças na configuração geométrica e tipo de uso da Av. Colombo e das vias em que os dados foram coletados no estudo anterior. Embora a velocidade limite dessas vias seja a mesma (60 km/h), a Av. Colombo possui um maior número de faixas e apresenta quantidade significativa de tráfego de passagem, que cruza a cidade de Maringá na direção Leste-oeste, para acessar a rodovia BR 376.

O percentual da potência utilizada ($p_{Pmax} = 0,93$) é superior ao obtido anteriormente

($p_{max} = 0,50$), indicando que os veículos utilizam de forma mais efetiva toda a potência disponível, o que é esperado no caso de caminhões e veículos com maior relação massa/potência.

As variações nos valores dos parâmetros também podem ter resultado da abordagem diferente utilizada no processo de calibração (distribuição de tempos de percurso, ao invés da dispersão de pontos espaçamento-velocidade) e da utilização de uma versão mais recente do simulador INTEGRATION para a realização deste estudo.

A utilização de tempos de percurso como base para calibração dos parâmetros é mais vantajosa que pares de espaçamento-velocidade, na medida em que o tempo de percurso é uma medida de desempenho referente ao segmento de via como um todo, não dependendo, portanto, do local em que os dados são coletados, isto é, próximo ou distante de interseções semaforizadas. No entanto, é recomendado repetir o processo para outros segmentos de via da Av. Colombo ou mesmo outras vias, investigando como os valores dos parâmetros calibrados são alterados em função de variações nas características geométricas, de controle e do tráfego. Dessa maneira, poderiam ser identificados conjuntos de parâmetros mais adequados para vias expressas, arteriais, coletoras e locais.

A possibilidade de calibrar cada arco da rede simulada com um conjunto diferente de parâmetros torna o processo de calibração mais flexível e, ao mesmo tempo, permite a representação da operação do sistema real de uma forma mais realística. Por outro lado, exige uma maior quantidade de recursos humanos, equipamentos e tempo para coleta de dados em campo através de filmagem. Para reduzir a necessidade de equipamentos para filmagem, recomenda-se a utilização de métodos alternativos, tais como o uso de rádios comunicadores ou veículo-teste. Na redução da quantidade de tempo necessária para redução dos dados das filmagens, recomenda-se a utilização de tamanhos menores de amostra de veículos, que garantam, no entanto, um nível aceitável de confiança, sob o ponto de vista estatístico.

É interessante notar que o procedimento proposto é genérico o suficiente para que ele possa replicar quaisquer medidas de desempenho consideradas, tais como atrasos e paradas, ou mesmo uma combinação de diferentes medidas de desempenho. A automatização das etapas de montagem dos arquivos do INTEGRATION, manipulação de resultados, execução das simulações e busca do erro mínimo representa um avanço no processo de calibração, permitindo que ele possa ser aplicado sem maiores problemas a redes com maior número de arcos.

No entanto, o método de minimização do erro ainda apresenta limitações, pois não garante que o mínimo encontrado seja de fato um mínimo global. Este aspecto foi demonstrado ao se realizar quatro diferentes rodadas de simulações, e verificar que a rodada com o quarto menor erro na primeira iteração foi, na verdade, aquela que resultou no menor valor erro na iteração final. Embora esta estratégia tenha reduzido o valor do erro, em comparação ao erro que seria obtido a partir de uma única rodada de simulação, ela não é viável para a calibração de diversos segmentos de via ou para um maior número de parâmetros de calibração. É recomendada, desta maneira, a adoção de algum procedimento mais sofisticado para minimização da função de erro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Colella, D. A. T.; Lima, E. P., Demarchi, S. H (2004). "Calibração e validação do modelo fluxo-velocidade do

- Integration para vias urbanas Semaforizadas”. In: *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, v. 1, p. 453-464
- Crowther, B. C. (2001), *Comparison of Corsim and Integration for the Modeling of Stationary Bottlenecks*. Dissertação (mestrado), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 142 p.
- Demarchi, S. H.; Colella, D. A. T.; Bertoncini, B. V. (2003). “Determinação da Densidade de Congestionamento em Filas de Interseções Semaforizadas”. In: *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, v. 1, p. 476-488.
- Demarchi, S. H.; Melo, R. A.; Setti, J. R. A. (2001) “Validação de um Modelo de Desempenho de Caminhões em Rampas Ascendentes” *Transportes*, v. 9. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, RJ.
- Demarchi, S. H.; Setti, J. R. A. (2000). Desempenho de Caminhões em Rampas Ascendentes. In: *Transporte em Transformação*, v. 3, p. 79-94. Makron Books do Brasil, São Paulo, SP.
- Demarchi, S. H.; Setti, J. R. A. (2001) Caracterização da Relação Massa/Potência de Caminhões em Rodovias do Estado de São Paulo. In: *Transporte em Transformação*, v. 4, p. 51-65. Makron Books do Brasil, São Paulo, SP.
- Greenshields, B. D. (1935), “A Study of Traffic Capacity”. Proceedings of HRB, vol. 14, p. 448-477. Highway Research Board, Washington, D.C.
- Hall, F. L. (1992) Traffic Stream Characteristics. In: Gartner, N.; Messer, C.; Rath, H. K. (eds). *Traffic Flow Theory - A State-of-the-Art Report*, cap. 2. Transportation Research Board, Washington, D.C. Obtido em 25/04/2000 no endereço eletrônico <http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>.
- Hall, F.L.; Hurdle, V.F.; Banks, J.H. (1992). “Synthesis of Recent Work on the Nature of Speed-Flow and Flow-Occupancy (or Density) Relationships on Freeways”. *Transportation Research Record 1365*, p. 12-18.
- Hourdakakis, J.; Michalopoulos, P. G.; Kottommannil, J. (2003) “Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models”. *Transportation Research Record 1852*, p.130-139.
- May, A. D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Rakha, H. (2004) *INTEGRATION RELEASE 2.30 for WINDOWS*. User’s Guide. Vol 1 e 2. M. Van Aerde & Associates, Ltd. Blacksburg, VA.
- Van Aerde, M. (1995), “A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Congested and Uncongested Highways”. *Paper 950802*, apresentado na 74th TRB Annual Conference, Washington, D.C.

Endereço dos autores:

Diogo Artur Tocacelli Colella (diogoatc@gmail.com)
Aluno do programa de mestrado, Departamento de Transportes,
Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Universidade de São Paulo – USP
Av. Trabalhador São-Carlense, 400, STT
13566 – 580 – São Carlos, SP, Brasil
fone: (016) 3373-9617

Sergio Henrique Demarchi (shdm@terra.com.br)
Professor Adjunto, Depto. de Engenharia Civil,
Grupo de Engenharia de Transportes

Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5790 - Bloco C67
87020 - 900 – Maringá, PR, Brasil
fone/fax: (044) 3261-4322