

Método de calibração de modelos de micro-simulação de tráfego através de otimização multivariada

D. R. C. Araújo¹, G. B. Jacondino² e H. B. B. Cybis³

Laboratório de Sistemas de Transportes LASTRAN - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, Brasil

C. S. Caten⁴

Laboratório de Otimização de Produtos e Processos LOPP- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, Brasil

Artigo Recebido: 19/08/2003 - Aprovado: 21/10/2003

RESUMO: Este artigo apresenta um método para calibração de simuladores microscópicos de tráfego, implementado através de projetos de experimentos com otimização multivariada. O estudo de caso foi desenvolvido em Porto Alegre, utilizando-se o modelo microscópico de simulação DRACULA. Nesse estudo, os parâmetros comportamentais do DRACULA são calibrados para que o modelo reproduza os valores de indicadores de desempenho, como fluxos, tempos de viagem e comprimentos de fila, observados em campo. Os resultados obtidos foram satisfatórios e o método de calibração aplicado apresentou-se eficiente.

ABSTRACT: This paper presents a calibration method for micro-simulation traffic models based on experimental design and multi-variable optimisation. This method is applied to the micro simulation model DRACULA implemented in a Porto Alegre case study. In this work, the behavioural parameters of DRACULA are adjusted to reproduce the observed values of network flows, travel times and queue lengths. The calibration method proved to be efficient and the model fit was very satisfactory.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço dos recursos computacionais, o uso de modelos microscópicos de simulação para avaliação de projetos de transportes é cada vez mais freqüente. Modelos de micro-simulação de tráfego permitem avaliar o impacto decorrente de mudanças na infra-estrutura viária e de medidas de gerenciamento de tráfego. Os simuladores de tráfego servem de suporte à implantação de sistemas de inteligentes de transportes (ITS), permitindo avaliar políticas avançadas de gerenciamento de viagens (ATMS) tais como sistemas responsivos de controle de tráfego e sistemas de orientação de rotas.

A simulação permite uma compreensão detalhada do sistema de interesse, dispensando intervenções no sistema real que muitas vezes são econômica ou operacionalmente inviáveis. Assim, a simulação se torna uma ferramenta eficiente e de baixo custo relativo.

A confiabilidade de qualquer simulador depende da sua habilidade em produzir resultados próximos à realidade. Os modelos oferecem parâmetros com valores *default*, no entanto, é responsabilidade do analista identificar valores apropriados à realidade particular modelada (Lieberman e Rathi, 1997). Desta forma, a etapa de calibração é parte fundamental do processo de modelagem.

É consenso entre os analistas que o processo de calibração de simuladores microscópicos é complexo (Algers *et al.*, 1997). Entre os fatores que contribuem para este fato é importante salientar: (i) a necessidade de um grande volume de dados (Kim e Rilett, 2003); (ii) a difícil apropriação dos parâmetros que descrevem o comportamento do condutor (Park e Schneeberger, 2003); (iii) a falta de uma metodologia própria consolidada para a calibração de simuladores de tráfego (Rakha *et al.*, 1996).

Em decorrência dessas dificuldades, na prática, a calibração de simuladores de tráfego é freqüentemente realizada por tentativa e erro, onde o êxito do processo é dependente da experiência do usuário. Este processo, porém, revela-se lento e pouco eficiente (Hourdakís *et al.*, 2003). A proposição de procedimentos alternativos à prática de tentativa e erro tem sido preocupação de vários autores.

Hellinga (1998), Milam e Choa (2001) e Jayakrishnan *et al.* (2001) descrevem os aspectos gerais da calibração, apresentando as etapas do processo, sem a indicação de nenhum procedimento específico. Todos são unânimes em apontar que as principais etapas do processo de calibração envolvem: (i) clara definição dos objetivos e metas do estudo; (ii) a escolha dos indicadores de desempenho; (iii) coleta de dados; (iv) definição dos parâmetros de entrada a serem calibrados; e (v) certificação da calibração.

A aplicação de otimização para a calibração de simuladores de tráfego é foco de alguns trabalhos. A diferença entre estas publicações reside no procedimento aplicado. A técnica de algoritmos genéticos - método de otimização baseado no processo de seleção natural e evolução - foi empregada para calibração de simuladores de tráfego por Lee *et al.* (2001). Kim e Rilett (2003) propõem o uso do algoritmo simplex sequencial como técnica para calibração. Eriksson (2000) emprega o projeto de experimentos fatoriais combinado ao método de superfície de resposta.

O objetivo dos trabalhos de Hourdakis *et al.* (2003) e de Park e Schneeberger (2003) é mais amplo. Eles buscam um método completo e sistemático para a calibração de qualquer simulador de tráfego. Além de todas as etapas do processo de calibração, os autores recomendam procedimentos específicos de otimização para ajuste dos parâmetros de entrada e propõem técnicas estatísticas adequadas para a certificação da calibração.

Devido ao grande número e variedade de parâmetros de entrada nos diferentes modelos de micro-simulação de tráfego, não existe consenso, na literatura, sobre a indicação de uma metodologia única para calibração desses modelos.

Uma alternativa para calibração de modelos de simulação de tráfego é a utilização de métodos de otimização de sistemas, em analogia à prática de otimização industrial. Um sistema é avaliado por múltiplos indicadores de desempenho, ou seja, as variáveis resultantes de sua operação. O sistema também é caracterizado por parâmetros de entrada que podem ser alterados e que, por sua vez, afetam os múltiplos indicadores de desempenho.

Métodos de otimização de sistemas se aplicam na calibração de simuladores pois, como em um processo de otimização, o objetivo da calibração é ajustar os parâmetros de entrada do simulador com o objetivo de gerar indicadores de desempenho similares a valores alvo que representam a realidade.

Existe um consenso na literatura de que um dos métodos mais eficazes na otimização de sistemas é o *Projeto de Experimentos*. Projeto de experimentos é um método apoiado fortemente em conceitos estatísticos, destinado ao planejamento e análise de uma coleta experimental. Experimentos planejados estatisticamente permitem estudar separadamente o efeito individual de cada parâmetro de entrada, os efeitos de interação entre os parâmetros e os efeitos não-lineares sobre os indicadores de desempenho. Outra vantagem, é a obtenção de informações com um número reduzido de experimentos viabilizando a obtenção de resultados confiáveis (Ribeiro e Caten, 2000).

A otimização multivariada é realizada posteriormente ao desenvolvimento dos ensaios de simulação estruturados de acordo com o método de Projeto de Experimentos. Este processo consiste na

determinação dos níveis ótimos de um conjunto de parâmetros de entrada, que serão propositalmente alterados até que os indicadores de desempenho do simulador apresentem valores semelhantes àqueles observados em campo.

O objetivo deste artigo é apresentar um método para calibração multivariada de modelos de simulação de tráfego, adaptado de um método de otimização industrial. O método é aplicado em um estudo de caso onde o modelo microscópico DRACULA é empregado para modelar uma rede de Porto Alegre.

2 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

2.1 O Dracula

O DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion*) é um simulador microscópico de tráfego desenvolvido pelo *Institute for Transportation Studies* da Universidade de Leeds. O modelo representa a trajetória individual dos veículos ao longo de rotas pré-especificadas, através de rotinas de *car-following* e *lane-changing*, considerando o comportamento desejado dos motoristas, a sinalização, e o controle nas interseções e arcos. O modelo é discreto no tempo, onde o sistema é atualizado em passos fixos de um segundo (Liu *et al.*, 1995).

O DRACULA exige três conjuntos de dados de entrada: (i) descrição das características operacionais e geométricas da rede; (ii) quantificação da demanda através de fluxos nas rotas (automóveis e veículos de carga); e (iii) parâmetros comportamentais e características dos veículos. O modelo é estocástico, permitindo reproduzir a variabilidade nos três conjuntos de dados de entrada (Liu, 2002).

O DRACULA pode ser utilizado em associação com o modelo SATURN (Hall *et al.*, 1980), permitindo a importação automática de dados da rede e demanda. O DRACULA foi aplicado na Inglaterra em Leeds (Clark *et al.*, 2000; Lind *et al.*, 1999), em Otley (Aden, 1995), e York (Muizelaar, 2002). No Brasil, o DRACULA tem sido aplicado em diversos estudos em Porto Alegre (Jacondino e Cybis, 2002; Araújo e Cybis, 2002; Araújo, 2003).

2.2 Caracterização da Área de Estudo

A rede modelada é composta por um trecho viário arterial e suas vias transversais adjacentes, localizada na área central de Porto Alegre. Consiste na avenida Independência, trecho entre as ruas Barros Cassal e Ramiro Barcelos. O horário modelado corresponde ao período de pico vespertino, entre 18:00h e 19:00h. A figura 1, obtida do módulo de animação do DRACULA, ilustra a rede modelada.

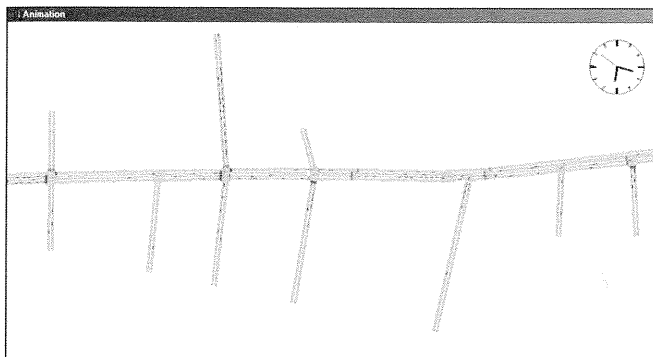


Figura 1. Rede modelada representada através do módulo de animação do DRACULA

3 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

O método de calibração apresentado neste artigo, adaptado de Caten (1995), desdobra-se em cinco etapas principais: (i) planejamento dos experimentos; (ii) execução dos experimentos; (iii) modelagem individual dos indicadores de desempenho; (iv) definição da função objetivo; (v) otimização dos múltiplos indicadores de desempenho.

3.1 Planejamento dos experimentos

Na etapa do planejamento do experimento, são escolhidos os parâmetros de entrada e os indicadores de desempenho que serão objeto de avaliação. Nesta etapa, também são definidos o número de ensaios de simulação e as características dos cenários.

3.1.1 Definição dos indicadores de desempenho

Na etapa de definição dos indicadores de desempenho, devem ser especificados os indicadores, seus valores alvo, suas importâncias relativas, e as tolerâncias ao erro na função de perda.

Os indicadores de desempenho adotados no presente estudo foram: fluxos na rede, tempos de viagem, e comprimentos de fila. Esses indicadores foram escolhidos porque permitem caracterizar bem os níveis de demanda e o comportamento do tráfego. A descrição das técnicas de coleta e a apropriação dos dados constam em Araújo e Cybis (2002). O indicador Y1 representa o fluxo total de veículos no período modelado (automóveis particulares e veículos de carga). O indicador Y2 representa o tempo total de viagem da avenida Independência, medido em campo. Os indicadores Y3 e Y4 representam os comprimentos médios das filas junto à rua Ramiro Barcelos, medidos nas aproximações ao norte e sul do canteiro central, respectivamente.

3.1.2 Seleção dos parâmetros de entrada

O DRACULA oferece um amplo conjunto de parâmetros de entrada. Parte desse conjunto é de fácil mensuração, como a composição do tráfego e os comprimentos dos veículos. Esses parâmetros tiveram

seus valores definidos através de levantamentos de campo, conforme Araújo e Cybis (2002). A bibliografia recomenda que na etapa de calibração sejam questionados os parâmetros comportamentais de difícil apropriação ou medição em campo.

Neste estudo, foram selecionados os parâmetros de entrada que, a partir da fundamentação teórica do modelo (Liu, 2002), possivelmente explicam os indicadores de desempenho questionados. O conjunto selecionado abrange parâmetros relacionados a fenômenos importantes como troca de faixas, interações longitudinais, e negociação de brechas. Da mesma forma, o conjunto inclui parâmetros que interferem em todos os regimes de dinâmica veicular (cruzeiro, regime estacionário, aceleração e desaceleração).

Para cada parâmetro de entrada selecionado, foi definido o intervalo de investigação. A escolha da amplitude do intervalo de investigação deve permitir a investigação de toda a região de interesse, no entorno da solução. A amplitude escolhida deve cobrir uma boa proporção da amplitude operacional e produzir um efeito observável nos indicadores de desempenho. Contudo, não pode ser tão grande a ponto de impedir o ajuste de qualquer modelo empírico para o intervalo escolhido.

O intervalo de investigação foi definido a partir de modelagens prévias através do DRACULA (Araújo, 2003 e Lind *et al.*, 1999). A tabela 1 apresenta os parâmetros de entrada selecionados.

Tabela 1: Descrições dos parâmetros de entrada investigados

Parâmetros de entrada	Nome	Intervalo de investigação
X1	Fator de troca de faixa	1 a 2
X2	Fator de aceleração	0,5 a 1,5
X3	Fator de afastamento	1,0 a 2,5 m
X4	Fator de risco	0,5 a 1,5
X5	Fator de velocidade	0,5 a 1,5

O “fator de troca de faixa” (X1) atua no estímulo para troca de faixas: define o acréscimo mínimo na velocidade operacional do veículo necessário para estimular ultrapassagem de veículos mais lentos. O “fator de aceleração” (X2) é um multiplicador sobre os valores *default* de aceleração e desaceleração normais dos veículos. O “fator de afastamento” (X3) representa a distância mínima entre veículos estacionários. O “fator de risco” (X4) representa a

agressividade dos veículos no modelo de aceitação de brechas; constitui-se num multiplicador sobre as brechas aceitáveis médias na rede. O “fator de velocidade” (X5) define a velocidade desejada dos veículos: constitui-se num multiplicador sobre a velocidade desejada média do arco.

Os parâmetros de entrada do DRACULA que não estão sendo investigados neste estudo assumiram os valores *defaults*.

3.2 Definição do projeto de experimento

Uma vez definidos os indicadores de desempenho e os parâmetros de entrada, é necessário definir o conjunto de experimentos (ensaios) que serão simulados. Os cenários são formados por combinações dos níveis dos parâmetros de entrada, gerados a partir de um projeto de experimentos. O projeto de experimento deve levar em consideração as definições realizadas anteriormente, ou seja, o número de parâmetros de entrada, o intervalo de investigação dos mesmos, a necessidade de investigar efeitos de interação e efeitos não-lineares entre os indicadores de desempenho, além de eventuais restrições de tempo ou técnicas.

Neste trabalho foi utilizado o projeto composto de segunda ordem (PCSO) (Montgomery, 2000). Ele é um caso especial da classe dos projetos compostos, cuja construção consiste de três partes: (i) 2^k vértices de um projeto fatorial (k dimensional) completo ou fracionado com níveis codificados em +/- 1; (ii) $2k$ vértices na porção axial, também chamados de pontos estrela, com níveis codificados em +/- a ; e (iii) n_0 número de rodadas centrais.

Os cenários do projeto fatorial permitem estimar os efeitos principais e efeitos de interação entre os parâmetros de entrada. Os cenários da estrela permitem estimar os efeitos quadráticos puros.

O maior atrativo do projeto composto central é a sua flexibilidade e sua utilidade em experimentos sequenciais. A porção fatorial (completa ou fracionada) e as rodadas centrais servem como uma fase inicial, a partir da qual pode-se ajustar um modelo de primeira ordem e então verificar a necessidade de incorporar os termos quadráticos puros.

3.3 Execução dos experimentos

A etapa de execução dos experimentos envolve o desenvolvimento dos ensaios de simulação. Na matriz de experimentos, foram projetados 27 cenários. Em consequência da variabilidade aleatória no DRACULA, o conjunto de cenários foi replicado três vezes, onde a cada conjunto foi associada uma semente estocástica particular. Assim, a rede avaliada foi simulada 81 vezes, com diferentes combinações de parâmetros de entrada.

3.4 Modelagem individual dos indicadores de desempenho

A partir dos resultados do experimento é realizada a modelagem individual dos indicadores de desempenho em função dos parâmetros de entrada. A partir da modelagem é possível identificar quais parâmetros de entrada que exercem influência significativa sobre cada indicador de desempenho. A modelagem individual dos indicadores de desempenho permite uma melhor compreensão do sistema avaliado.

Outra grande vantagem da modelagem é a possibilidade de estimar o valor dos indicadores de desempenho para níveis intermediários dos parâmetros de entrada. Assim, a estimativa dos indicadores de desempenho não fica restrita aos níveis ensaiados no experimento. Pode-se fazer estimativas dos indicadores de desempenho para qualquer nível dentro do intervalo ensaiado no experimento (interpolação) e, com alguma reserva, também podem ser feitas extrapolações.

Neste estudo, o modelo inicialmente utilizado tenta captar os efeitos lineares, efeitos quadráticos e as interações de dois parâmetros de entrada sobre os indicadores de desempenho. As regressões múltiplas foram geradas a partir da utilização do *software* estatístico SPSS.

Os modelos finais de cada indicador de desempenho consideram exclusivamente os termos que apresentam efeito significativo. A significância dos diversos termos é verificada através da estatística t fornecida nos relatórios de regressão múltipla. Os termos que possuem probabilidade de erro superior a $\alpha = 0,05$ são descartados. Desta forma, os modelos obtidos para cada indicador de desempenho, junto com o seu respectivo coeficiente de correlação ajustado (R_{ajustado}), são apresentados (Equações 1 a 4):

$$Y1 = 4588,961 + 289,001 \cdot X2 - 64,509 \cdot X3 + 150,011 \cdot X5 + 92,589 \cdot X1^2 - 175,812 \cdot X2^2 + 97,098 \cdot X3^2 + 85,929 \cdot X4^2 - 201,411 \cdot X5^2 \quad (1)$$

$$R_{\text{ajustado}}^2 = 0,702$$

$$Y2 = 135,025 - 154,726 \cdot X2 + 33,912 \cdot X3 + 27,453 \cdot X4 - 60,189 \cdot X5 + 95,843 \cdot X2^2 + 84,882 \cdot X5^2 - 35,396 \cdot X2 \cdot X3 \quad (2)$$

$$R_{\text{ajustado}}^2 = 0,765$$

$$Y3 = 2,525 + 0,328 \cdot X2 - 3,246 \cdot X5 + 0,517 \cdot X1^2 - 1,733 \cdot X5^2 - 0,723 \cdot X2 \cdot X5 \quad (3)$$

$$R_{\text{ajustado}}^2 = 0,91$$

$$Y4 = 4,418 + 0,588 \cdot X2 - 3,083 \cdot X5 + 0,226 \cdot X1^2 - 0,436 \cdot X2^2 + 0,584 \cdot X5^2 - 0,367 \cdot X1 \cdot X5 - 0,199 \cdot X3 \cdot X5 \quad (4)$$

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,95$$

As regressões foram desenvolvidas com os níveis codificados dos parâmetros de entrada (entre -1 e +1). Com isso, as diferenças de escalas entre os parâmetros são eliminadas de forma que a magnitude dos coeficientes seja diretamente comparável. A partir da análise dos modelos verifica-se que os parâmetros “fator de aceleração” e “fator de velocidade” estão presentes em todos os modelos. Além disso, os impactos desses parâmetros nos indicadores de desempenho são superiores aos impactos dos demais parâmetros de entrada.

A visualização de gráficos obtidos a partir das funções ajustadas possibilita avaliar o efeito isolado dos parâmetros de entrada em cada indicador de desempenho. Os gráficos das figuras 2 a 4 foram gerados variando-se o parâmetro de entrada do nível baixo (-1) até o nível alto (+1), enquanto que os demais parâmetros foram fixados em seu nível intermediário (0).

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os efeitos de cada parâmetro de entrada sobre os indicadores de desempenho “fila Ramiro sul”, “fluxo total”, e “tempo de viagem”, respectivamente.

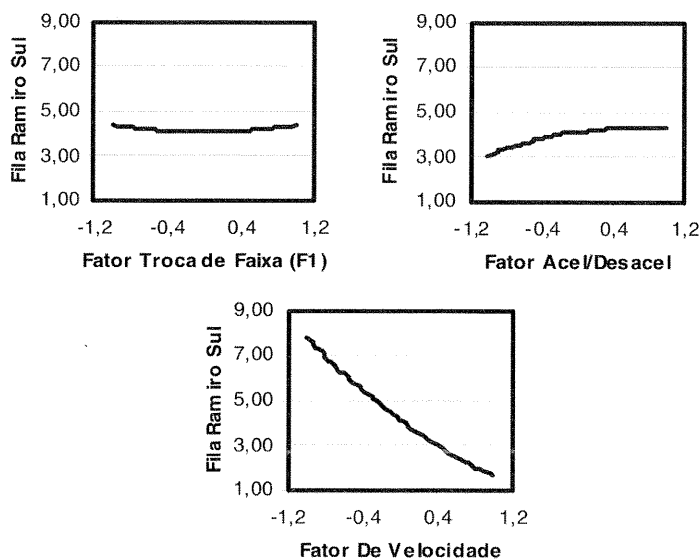


Figura 2. Efeito dos parâmetros de entrada na “fila Ramiro sul”

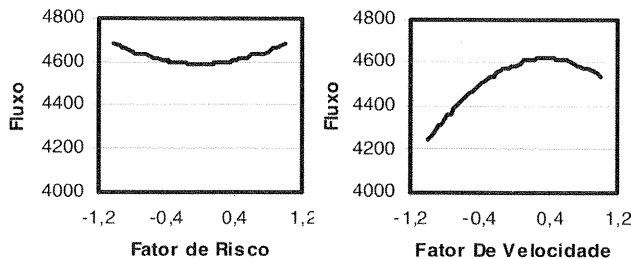
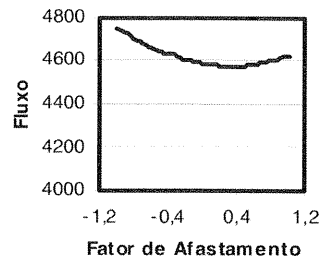
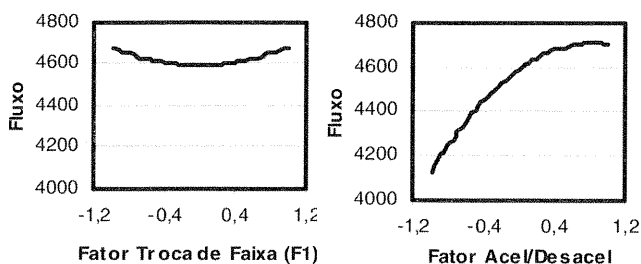


Figura 3. Efeito dos parâmetros de entrada no “fluxo total”

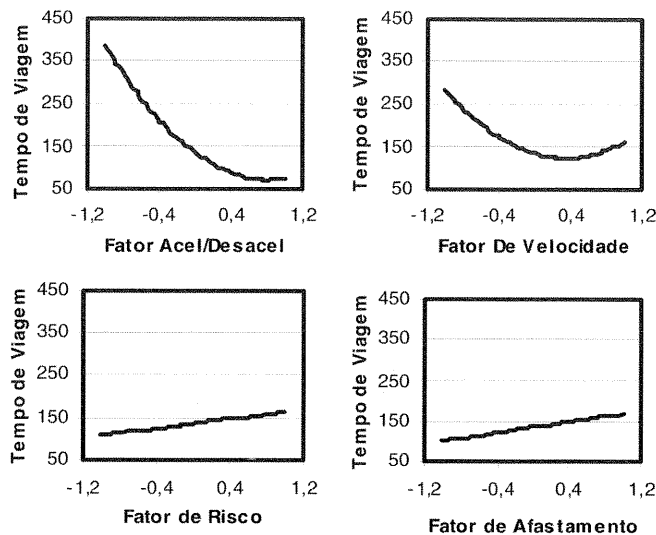


Figura 4. Efeito dos parâmetros de entrada no “tempo de viagem”

A partir dos gráficos acima, os modelos sugerem que os fluxos e tempos de viagem são bastante sensíveis aos “fatores de aceleração”. Esse parâmetro, entretanto, não apresenta influência tão significativa no comprimento de fila modelado. O “fator de velocidades” se constitui, também, num parâmetro bastante importante para a estimação de fluxos e tempos de viagem. O parâmetro foi, também, o fator mais importante na modelagem do comprimento da fila avaliada. As outras variáveis apresentam impactos mais sutis na determinação dos índices de desempenho modelados.

3.5 Definição da função objetivo

A partir da modelagem individual dos indicadores de desempenho, pode-se quantificar analiticamente o efeito dos parâmetros de entrada e identificar o ajuste ótimo para cada indicador de desempenho,

separadamente. No entanto, não necessariamente o mesmo ajuste conduz ao valor ideal de todos os indicadores de desempenho, simultaneamente. Assim, é necessário realizar uma otimização global dos indicadores de desempenho. Essa otimização global implica em compromissos entre os indicadores de desempenho, ou seja, uma solução conciliatória que pondere as importâncias relativas de cada indicador sobre a realidade da rede avaliada.

A otimização global foi realizada através da função objetivo denominada Função de Perda Quadrática Multivariada. A função de perda busca avaliar a perda de confiabilidade do modelo de simulação incorrida quando os indicadores de desempenho do simulador não estão adequados com a realidade modelada. Esta perda de confiabilidade aumenta quadraticamente à medida que o indicador de desempenho afasta-se do seu valor nominal (valor real).

A Função de Perda Quadrática Multivariada Z consiste de (Equação 5):

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=1}^J w_j (\hat{Y}_j - T_j)^2 \quad (5)$$

onde:

\hat{Z} é a função objetivo a ser minimizada;

w_j são pesos que levam em conta a unidade e a importância relativa (IR_j) de cada indicador de desempenho j e as respectivas tolerâncias ao erro; onde $w_j = IR_j / (\text{tolerância})^2$

T_j é o valor ideal para indicador de desempenho j ;

\hat{Y}_j estimativa da média do indicador de desempenho j ;

A tabela 2 apresenta os indicadores de desempenho, suas importâncias relativas, os valores alvo, e as tolerâncias ao erro adotados na etapa de otimização multivariada.

Tabela 2. Descrições dos Indicadores de Desempenho

Indicador de desempenho	Nome	Alvo (T_j)	Tolerância (erro)	Importância Relativa (IR_j)
Y1	Fluxo na Rede	4733 veic	$\pm 5 \%$	3
Y2	Tempo de Viagem	183 seg	$\pm 5 \%$	3
Y3	Fila Ramiro Norte	7,9 m	$\pm 10 \%$	1
Y4	Fila Ramiro Sul	8,8 m	$\pm 10 \%$	1

Considerando que as variáveis “fluxo na rede” (Y1) e “tempo de viagem” (Y2) são indicadores mais abrangentes espacialmente que as variáveis “filas” (Y3 e Y4), atribuiu-se a elas maior importância relativa e menores tolerâncias do erro na função de perda.

3.6 Otimização dos Múltiplos Indicadores de Desempenho

A etapa de otimização consiste em identificar o ajuste que melhor atende, simultaneamente, ao conjunto de indicadores de desempenho.

A tabela 3 ilustra a solução ótima dos parâmetros de entrada que minimiza a função de perda multivariada Z. Deve-se, ainda, avaliar a consistência do conjunto de parâmetros de entrada.

Tabela 3. Solução ótima dos parâmetros de entrada

Parâmetros de entrada					Indicadores de desempenho				Funções de Perda Z				
X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Z1	Z2	Z3	Z4	Z
1,2	1,2	2,0	1,5	0,7	4622,5	189	5,6	6,3	0,1	0,2	4,3	3,9	0,9

Os parâmetros comportamentais associados à solução ótima apresentaram consistência satisfatória, condizente com expectativas a partir da fundamentação teórica. A tabela 4 compara os ajustes ótimos dos parâmetros de entrada com os valores *defaults* propostos pelo DRACULA.

Tabela 4. Parâmetros de entrada: solução ótima comparada aos valores *default*

Indicador de desempenho	Nome	Valor default	Valor ajustado
X1	Fator de troca de faixa	2,0	1,2
X2	Fator de aceleração	1,0	1,2
X3	Fator de afastamento	1,0 m	2,0 m
X4	Fator de risco	1,0	1,5
X5	Fator de velocidade	1,0	0,7

No ajuste ótimo, o “fator de troca de faixa” foi reduzido de 2,0 para 1,2, aumentando a agilidade dos veículos. O significado desta variável indica que os veículos estarão dispostos a ultrapassar veículos mais lentos se puderem aumentar sua velocidade em pelo menos 20%, entre outros critérios. O “fator de aceleração” foi majorado em 20%, aumentando a agressividade dos veículos. O “fator de afastamento” foi alterado de 1,0 m para 2,0 m, aumentando o afastamento entre os veículos estacionários. O “fator

de risco” foi alterado de 1,0 para 1,5; desse modo, os veículos passaram a exigir brechas maiores no modelo de aceitação de brechas. Por fim, o “fator de velocidade” foi ajustado em 0,7, implicando numa velocidade desejada média de 42 km/h, que consiste num valor consistente com a realidade típica de redes urbanas.

3.7 Certificação da Solução

A certificação da solução envolve a comparação entre os indicadores de desempenho simulados a partir dos parâmetros de entrada ajustados, e os valores alvo. O cenário foi simulado com três sementes estocásticas diferentes. A tabela 5 apresenta os valores dos indicadores de desempenho simulados através do DRACULA, comparados aos indicadores de desempenho observados em campo (alvo).

Tabela 5. certificação da solução ótima

Rodada	Y1	Y2	Y3	Y4
Alvo	4733	183	7,9	8,8
1	4821	156,5	5,6	7,5
2	4703	148,5	4,9	8,6
3	4735	171,5	5,4	7,7
Média	4753	159	5,3	7,9
Desvio Padrão	61,0	11,6	0,4	0,6
Coefficiente variação	0,0	0,1	0,1	0,1

A tabela 5 permite concluir que os valores simulados dos indicadores de desempenho apresentaram boa equivalência com os valores alvo. Assim, conclui-se que os parâmetros de entrada calibrados apresentaram ajuste satisfatório.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo apresenta um método para calibração de modelos de micro-simulação de tráfego, através da utilização da técnica de projetos de experimentos e otimização multivariada. O método foi aplicado em um estudo de caso em Porto Alegre, desenvolvido com o modelo microscópico DRACULA. Os parâmetros comportamentais do DRACULA (fator de troca de faixa, fator de aceleração, fator de afastamento, fator de risco, fator de velocidade) foram calibrados, com base em indicadores de desempenho como fluxos na rede, tempos de viagem e comprimentos médios de fila.

O método de calibração apresentado neste artigo desdobra-se em cinco etapas: (i) planejamento dos experimentos; (ii) execução dos experimentos; (iii) modelagem individual dos indicadores de desempenho; (iv) definição de uma função objetivo; (v) otimização dos múltiplos indicadores de desempenho através de uma função de perda multivariada.

A técnica de projeto de experimentos demonstrou-se bastante eficaz no planejamento dos cenários simulados. A modelagem individual dos indicadores através de regressões múltiplas permitiu a compreensão do efeito dos parâmetros de entrada nos indicadores de desempenho simulados. A função de perda multivariada permitiu identificar a solução ótima considerando, simultaneamente, múltiplos indicadores de desempenho.

O método de calibração permitiu identificar o ajuste ótimo dos parâmetros de entrada. Os valores dos parâmetros de entrada associados à solução ótima apresentaram consistência satisfatória e os indicadores de desempenho estimados pelos modelos de regressão apresentaram valores similares aos observados em campo. Da mesma forma, na etapa de certificação da solução ótima, verificou-se boa equivalência para os indicadores de desempenho efetivamente simulados pelo DRACULA.

No estudo de caso, o método comprovou-se adequado para a solução de problema de calibração de simuladores de tráfego. Revelou-se, também, a eficiência do método na obtenção de resultados confiáveis com reduzido número de simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aden, T. S. (1995) *Variability Studies Using SATURN and DRACULA*. Leeds, England. M.Sc. Thesis, Institute for Transportation Studies, University of Leeds.
- Algers, S.; E. Bernauer; M. Boero.; L. Breheret; C. DiTaranto; M. Dougherty; K. Fox e J. F. Gabard (1997) *Review of Micro-Simulation Models*. (Deliverable D3 of the SMARTTEST project) Disponível em <<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv3.html>> Acessado em 05 de maio de 2002.
- Araújo, D. R. C. e H. B. B. Cybis (2002) Aplicação do Simulador de Tráfego DRACULA em Porto Alegre: Análise Comparativa com o SATURN. *Anais do XVI Congresso da Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Natal, RN, v. 1, p. 341 - 352.
- Araújo, D. R. C. (2003) *Comparação das simulações de tráfego nos modelos SATURN e DRACULA*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, UFRGS.
- Caten, C. S. (1995) *Método de Otimização de Produtos e Processos Medidos por Múltiplas Características de Qualidade*. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, Escola de Engenharia, UFRGS.
- Clark, S.D; R. Liu; F. Montgomery e J. Tate (2000) The Microscopic Modelling of Kerb Guided Bus Schemes. *Transportation Research Board, 79th Annual Meeting CD-ROM*, National Research Council, Washington D.C.
- Eriksson, A. (2000) *Calibration of a Traffic Simulation Model by Using Factorial Experiments and Response Surfaces* (Final Report d3 of the project Traffic Performance on Major Arterials). Disponível em <http://www.infra.kth.se/ctr/projekt/tpma/finalreport/D_3_Calibration.pdf>. Acessado em 21 de fevereiro de 2003
- Hall M. D; D. Van Vliet; L. G. Willumsen (1980) SATURN – A Simulation –Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes. *Traffic Engineering and Control*, v.21, p.168-176.
- Hellinga, B. (1998) Requirements for the Calibration of Traffic

- Simulation Models. *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering*, v. IV B, p. 211-222.
- Hourdakis, J.; P. G. Michalopoulos e J. Kottommannil (2003) A Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting CD-ROM*, National Research Council, Washington D.C.
- Jacondino, G. B. e H. B. B. Cybis (2002) Avaliação de Modelos de Emissão de Poluentes em Simuladores de Tráfego. *Anais do XVI Congresso da Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes*, ANPET, Natal, RN, v 1, p. 211-222.
- Jayakrishnam, R.; J. Oh e A. Sahraoui (2001) Calibration and Path Dynamic Issues in Microscopic Simulation for Advanced Traffic Management and Information Systems *Transportation Research Record*, n. 1771, p. 9 – 17.
- Kim, K. e L. Rilett (2003) Simplex Based Calibration of Traffic Micro-Simulation Models Using ITS Data. *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting CD ROM*, National Research Council, Washington D.C.
- Lee, D. H.; X. Yang e P. Chandrasekar (2001) Parameter Calibration for PARAMICS Using Genetic Algorithm. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting CD ROM*, National Research Council, Washington D.C.
- Lieberman, E.; Rathi, A. K. (1997) Traffic Simulation. In: Gartner, N.; Messer, C.M.; Rathi, A. K. (Eds.) The revised monograph on traffic flow theory. EUA: Federal Highway Administration. Disponível em <http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/CHAPI.PDF> Acessado em 18 de maio de 2002
- Lind G., K. Schmidt; H. Anderson; S. Algers; G. Canepari; C. Di Taranto; E. Bernauer; L. Bréheret; J. F. Gabrad e K. Fox (1999) *Best Practice Manual*. (Deliverable D8 of the SMARTEST project) Disponível em <<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/delivd8.html>> Acessado em 05 de maio de 2002.
- Liu, R. (2002) *DRACULA Traffic Simulation Model: a User Guide*. Institute for Transportation Studies, University of Leeds, England.
- Liu, R.; Van Vliet, D.; Watling, D. (1995) DRACULA: Microscopic, Day-to-Day Dynamic Modelling of Traffic Assignment and Simulation. In: *Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. Proceedings. p. 444-448. Capri.
- Milam, R.; F. Choa (2001) Recommended Guidelines for the Calibration and Validation of Traffic Simulation Models. *8th TRB Conference on the Application of Transportation Planning Methods*, Texas. Disponível em < http://www.fehrandpeers.com/publications/pubs_set.html>. Acessado em 5 de março de 2003.
- Montgomery D. C. (2000) *Design and Analysis of Experiments*. Wiley and Sons, 5 ed.
- Muizelaar, T. J. (2002) *One-way Inner Ring Road in the City of York: Effects on Traffic and the Environment*. Technical Report. University of Leeds, England.
- Park, B. e J. D. Schneeberger (2003) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: A Case Study of VISSIM for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting CD ROM*, National Research Council, Washington D.C.
- Ribeiro, J.L.D e C. S. Caten (2000) *Projeto de Experimentos*. FEENGE/UFRGS, Porto Alegre.
- Rakha, H.; B. Hellinga; M. Van Aerde e W. Perez (1996) Systematic Verification, Validation and Calibration of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Board, 75th Annual Meeting CD ROM*, National Research Council, Washington D.C.

CONTATOS

¹Nome: Davi R. Campos Araújo
E-mail: davi@ppgep.ufrgs.br

²Nome: Gabriel B. Jacondino
E-mail: gabriel@ppgep.ufrgs.br

³Nome: Helena Beatriz B. Cybis
E-mail: helenabc@ufrgs.br

⁴Nome: Carla S. ten Caten
E-mail: tencaten@ppgep.ufrgs.br