

Análise probabilística de colisões veiculares pelo método de Monte Carlo

H. P. Carvalho ^a, A. Armigliato ^a, L. L. Almeida ^a, A. R. Correia ^a, C. R. De Musis ^{a,*}

^a Diretoria Metropolitana de Criminalística, Perícia Oficial e Identificação Técnica (POLITEC), Cuiabá (MT), Brasil

* Endereço de e-mail para correspondência: carlodemusis@politec.mt.gov.br. Tel.: +55-65-3613-1289.

Recebido em 22/11/2015; Revisado em 07/03/2016; Aceito em 12/03/2016

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo para análise probabilística de perícias de colisão de veículos automotores, apresentando um modelo computacional flexível para avaliação da confiabilidade por simulação Monte Carlo. Os procedimentos desenvolvidos buscaram a representação estatística dos parâmetros ambientais e psicomotores, tais como coeficientes de atrito e ritmo de Reação, em uma simulação, com 10.000 iterações, da confiabilidade em um modelo bidimensional aplicado a um estudo de caso de colisão frontal envolvendo dois veículos de passeio, obtendo intervalos unilaterais e bilaterais para as variáveis estudadas.

Palavras-Chave: Colisão veicular, Método de Monte Carlo, Simulação computacional.

Abstract

This paper presents a model for probabilistic analysis skills collision of motor vehicles, featuring a flexible computational model for the evaluation of reliability by Monte Carlo simulation. The developed procedures sought statistical representation of environmental and psychomotor parameters such as friction coefficient and reaction rate in a simulation with 10,000 iterations, reliability in a two-dimensional model applied to a frontal collision case study involving two vehicles, obtaining unilateral and bilateral ranges for the variables studied.

Keywords: Vehicle collision, Monte Carlo method, Computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação de colisões envolvendo um ou mais veículos terrestres requer, muitas vezes, considerações a respeito de parâmetros anteriores ao choque afim de fundamentar inferências a respeito dos mecanismos envolvidos. Nem sempre a análise direta dos vestígios de uma colisão veicular será suficiente para permitir o entendimento do ocorrido, sendo necessário o uso de sistemas e modelos de auxílio ao especialista para a estimativa de valores precedentes a colisão.

Tema deste trabalho, a reconstrução de uma colisão veicular, sendo multidisciplinar por princípio, pode utilizar técnicas como: modelagem computacional, experimentação, caracterização física, e dinâmica veicular, entre outros campos do conhecimento. Dispostos os instrumentos, compor um todo prestante a compreensão precisa e acurada dos fatos é tema de diversas pesquisas no mundo todo.

Em destaque, temos as técnicas computacionais e estatísticas que remetem a procedimentos como lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos, método de Monte Carlo, e pesquisa operacional.

Amiúde, na simulação computacional de uma perícia de colisão veicular, as propriedades dos materiais e dos indivíduos usualmente são empregados os valores médios, entre os diversos dados obtidos experimentalmente, para os parâmetros físicos e psicotécnicos do modelo. Para as dimensões costumam ser utilizados os valores medidos *in loco* no momento do exame pericial.

Porém, sabemos que os coeficientes de atrito, constantes de elasticidade, tempos de resposta, entre outros, são variáveis aleatórias com funções de densidade e de probabilidade características [1,2].

Assim sendo, por derivação, todas as estimativas relacionadas à colisão veicular são funções de diversas variáveis aleatórias e, dessa forma, também possuem comportamento probabilístico. Embora uma análise feita

com base nas propriedades médias produza uma boa estimativa do seu comportamento, é importante determinar o quanto o comportamento estocástico destas propriedades e dimensões podem afetar as estimativas da cinemática da colisão.

Uma maneira de se determinar o efeito da variabilidade dos parâmetros físicos e psicotécnicos nas estimativas periciais é a utilização do método de simulação de Monte Carlo. Para tanto, dois referentes são estabelecidos:

1. Na escala de estudo, os parâmetros do modelo com comportamento estocástico são representados por distribuições de probabilidade.
2. Deve-se dispor de modelos que relacionem esses parâmetros com a dinâmica do sinistro.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional, baseado nos procedimentos compilados por [3], para modelagem de colisões veiculares, com destaque para colisões frontais de veículos de passeio, buscando ampliar o conhecimento nesta área, tanto no aspecto da pesquisa, como no que se refere aos procedimentos periciais. Uma vez implementado, este modelo computacional efetivará uma análise probabilística com o intuito de avaliar as estimativas da dinâmica dos sinistros com relação aos referentes legais.

2. MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é um procedimento computacional para a determinação da probabilidade aproximada de um evento específico resultante de uma série de processos estocásticos, assumindo que os parâmetros de entrada são estatisticamente não correlacionados e a distribuição estatística dos parâmetros de entrada é conhecida ou suposta – por exemplo: uniforme, triangular ou Gaussiana. Como exemplo de uma das primeiras aplicações da técnica, temos o trabalho desenvolvido por Stanislaw Marcin Ulam e John von Neumann para resolver problemas de simulação do comportamento da difusão de nêutrons, que mais tarde auxiliaria no projeto Manhattan, responsável pelo desenvolvimento das primeiras bombas atômicas [4].

Devido ao avanço da capacidade de processamento dos computadores aconteceu nas duas últimas décadas um crescimento na utilização do método do Monte Carlo (MMC) e técnicas para modelagem e simulação de sistemas cada vez mais complexos e sofisticados [5].

Prova disso é que o MMC tem sido uma ferramenta essencial em diversas áreas da ciência, dentre elas: economia [6]; medicina [7]; medicina nuclear [8]; biologia [9]; ecologia [10,11]; física do clima [12]; climatologia [13,14]; engenharias [15,16]; modelagem de colisões veiculares [17-20].

Trata-se de uma técnica de simulação numérica, que partindo da geração de valores randômicos para as variáveis aleatórias, simula combinações de valores, obedecendo às respectivas distribuições, levando aos resultados os quais são o foco da análise.

Em cada iteração da simulação, são gerados valores para as variáveis básicas de entrada e são calculados os valores das variáveis de saída pelo modelo computacional, sendo o conjunto dos resultados obtidos utilizado para determinar os parâmetros estatísticos das variáveis de saída. Para geração dos valores pseudoaleatórios recorre-se normalmente a um algoritmo computacional de geração de sequências de números pseudoaleatórios com distribuição uniforme no intervalo]0,1[, que são depois adaptados às respectivas distribuições através de conversões adequadas.

Admitindo que o gerador de números pseudoaleatórios utilizado garante as propriedades de independência e de uniformidade, este método fornece estimativas exatas para a probabilidade de um evento $g(x) \leq 0$ quando o número de simulações, N , tender ao infinito.

$$P(g(x) \leq 0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\text{card}(g(x) \leq 0)}{N} \quad (1)$$

No domínio da perícia criminal, esta técnica pode ser utilizada para estimativa de probabilidades, sobretudo com três objetivos:

1. Validação de métodos analíticos.
2. Solução aproximada de sistemas de grande dimensão e complexidade para os quais as aproximações analíticas não são de fácil obtenção.
3. Avaliação probabilística dos resultados periciais face a um referente externo.

Neste trabalho optou-se pela terceira possibilidade, restrita a obtenção da estimativa de distribuições de probabilidade associadas às variáveis de saída relacionadas a uma perícia de colisão frontal de dois veículos de passeio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o procedimento proposto utilizou-se como referência uma colisão entre dois veículos, adaptado de uma situação pericial real ocorrida em 2015, em Cuiabá, Mato Grosso (Figura 1), considerando que se tratou de uma colisão parcialmente elástica e que o movimento ocorreu no plano.

A colisão entre os veículos se deu de forma ortogonal, em uma região de intersecção de vias locais, destinadas ao acesso local e áreas restritas, com intersecções em nível e sem sinalização semaforica, com velocidade máxima de 30km/h [21]. O arranjo das vias fez com que os veículos

tivessem suas trajetórias convergidas para a intersecção, resultando na colisão indicada na Figura 2.

O método analítico empregado para descrever a colisão dos veículos, e assim estimar suas velocidades, foi a equação de balanço da quantidade de movimento, amplamente empregada e difundida no meio pericial de acidente de trânsito.

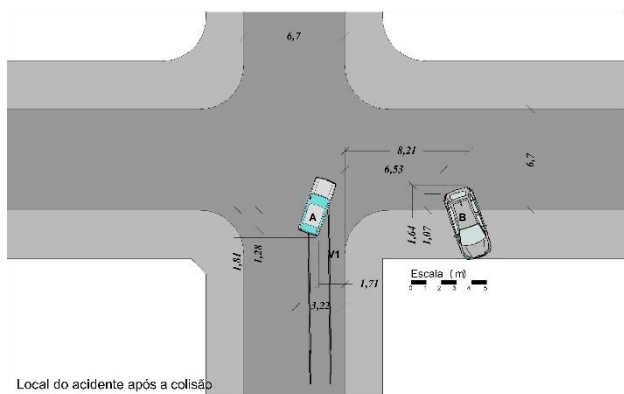


Figura 1. Croqui do local do acidente após a colisão.

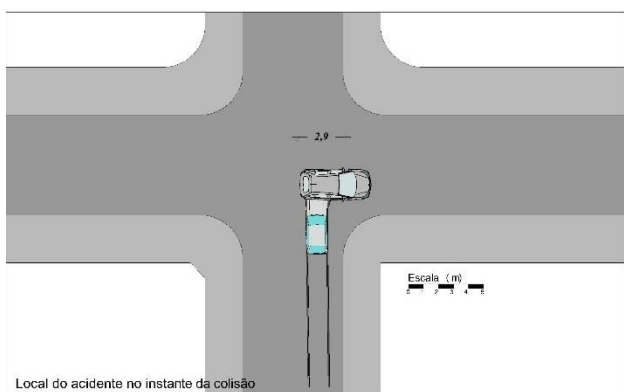


Figura 2. Croqui do local do acidente no instante da colisão.

Na referida equação, são considerados dois instantes, um para cada lado da igualdade, sendo um instante imediatamente antes da colisão e outro imediatamente após.

O instante após a colisão é definido, praticamente, no exame do local do acidente, no qual são identificados vestígios que evidenciam a região onde ocorreu a colisão, os veículos envolvidos, as condições do ambiente e a trajetória percorrida por cada veículo da colisão até assumir sua posição de repouso. Com essas informações, foi possível definir os valores de referência para os balanços de energia e de quantidade de movimento: massa dos veículos, direção e sentido dos vetores velocidades antes e após colisão, coeficiente de atrito de dissipação de velocidade do veículo após colisão, e o tempo psicotécnico – definido por [1] como o tempo decorrido entre o instante em que o condutor do veículo percebe o perigo iminente de acidente e o instante que o condutor materializa sua reação evasiva e ou de frenagem.

Definidos os elementos de contorno, o sistema de equações obtido, *mutatis mutandis*, foi parametrizado para as seguintes variáveis aleatórias: coeficiente de atrito do pavimento asfáltico, massa dos conjuntos veículos-ocupantes e o tempo psicotécnico de reação. As variáveis de saída a serem simuladas foram as velocidades dos veículos e a distância entre os veículos.

O Método de Monte Carlo foi implementado a partir dos seguintes procedimentos:

1. Geração de valores pseudoaleatórios para as variáveis de entrada de acordo com as respectivas funções de distribuição adotadas.
2. Realização da análise determinística do modelo do sistema N vezes.
3. Estimativa das funções de probabilidade das variáveis de saída.

Na simulação o cálculo das velocidades imediatamente após a colisão considerou os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de atrito de pavimento asfáltico com distribuição triangular com mínimo de 0.6, máximo de 0.9 e médio de 0.8.
- Massa do carro A com distribuição triangular com mínimo de 990 kg, máximo de 1210 kg e médio de 1100 kg.
- Massa do carro B com distribuição triangular com mínimo de 1400 kg, máximo de 1700 kg e médio de 1550 kg.
- Tempo psicotécnico de reação com distribuição triangular com mínimo de 0.75 s, máximo de 2.5 s e médio de 1.5 s.

A ausência de experimentos específicos nos levaram ao uso da distribuição triangular para modelar os parâmetros. Essa opção justifica-se pela possibilidade de termos ajustes para o comportamento assimétrico reportado por [13], e ainda por corresponder a uma curtose maior que os modelos sigmóides, locando as distribuições obtidas a favor da segurança.

As variáveis de saída foram escolhidas, a partir do viés pericial, como sendo as mais prestantes para a interpretação do sinistro foram as seguintes:

- Velocidade no momento imediatamente anterior a frenagem/colisão do veículo A (V_A).
- Velocidade no momento imediatamente anterior a frenagem/colisão do veículo B (V_B).
- Projeção da distância do veículo A até o veículo B no eixo das ordenadas (D_{AB}).

As simulações foram desenvolvidas com o *software* Oracle Crystal Ball, em conjunto com a planilha eletrônica Microsoft Excel, com 10.000 iterações.

4. RESULTADOS

Os intervalos de confiança de 95% das variáveis de saída estão dispostos na Tabela 1. É possível verificar que, posto que as velocidades limites das vias eram de 30 km/h, apenas o veículo B possuía uma velocidade máxima (limite inferior do intervalo de confiança unilateral) significativamente superior a esse valor.

Por outro lado, o valor máximo unilateral de D_{AB} foi de 2.15 m, sendo maior que o observado nas marcas periciadas, remetendo a impossibilidade do condutor de A frear a tempo de não colidir com B. De outra forma, a probabilidade dos condutores reagirem a tempo de evitar a colisão era de 2.2%.

Tabela 1. Intervalos de confiança de 95% das variáveis de saída.

Variável de saída	Limite inferior (unilateral)	Limite inferior (bilateral)	Média	Limite superior (bilateral)	Limite superior (unilateral)
V_A	24.35	24.33	24.44	24.57	24.55
V_B	30.41	30.13	32.11	34.31	33.98
D_{AB}	-0.35	-0.57	0.93	2.34	2.15

5. CONCLUSÕES

O uso do método de Monte Carlo possibilitou a estimativa de probabilidades para as variáveis em análise, permitindo o desenvolvimento de um argumento mais completo que uma aplicação direta dos valores centrais na equação de Torricelli, sem considerar o comportamento estocástico dos parâmetros considerados.

No estudo de caso apresentado, o modelo foi efetivo, possibilitando avaliar confiabilidade das estimativas, as quais permitiram afirmar a baixa probabilidade dos motoristas reagirem a tempo de evitar o acidente, e ainda estimar as probabilidades associadas às velocidades críticas dos veículos, ampliando as possibilidades de suporte ao especialista na engenharia reversa e avaliação pericial do sinistro.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio a todos os colegas e gestores da POLITEC/MT pelo suporte e opiniões fornecidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Vithayasrichareon, I.F. Macgill. A Monte Carlo based decision support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries. *Energ. Policy*, **41**, 374-392, 2012.

[2] G. Kost, S.M. Werner. Use of Monte Carlo Simulation Techniques in Accident Reconstruction, SAE Paper No. 940719. *Society of Automotive Engineers*, 1994.

[3] L.L. Almeida. *Manual de Perícias em Acidentes de Trânsito*. Campinas-SP: Millennium Editora, 504p., 2011.

[4] I.M. Sobol. *A primer for the Monte Carlo method*. Florida: CRC Press, 1994.

[5] P. Vaz. Monte Carlo methods and techniques status and prospects for future evolution. *Appl. Radiat. Isotopes* **68**, 536-541, 2010.

[6] D. Courard-Hauri. Using Monte Carlo analysis to investigate the relationship between overconsumption and uncertain access to one's personal utility function. *Ecol. Econ.* **64**, 152-162, 2007.

[7] S. García-Pareja, M. Vilches, A.M. Lallena. Ant colony method to control variance reduction techniques in the Monte Carlo simulation of clinical electron linear accelerators of use in cancer therapy. *J. Comput. Appl. Math.* **233**, 1534-1541, 2010.

[8] I. Buvat, D. Lazaro. Monte Carlo simulations in emission tomography and GATE: an overview. *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.* **569**, 323-329, 2006.

[9] C.J. Mode, R.J. Gallop. A review on Monte Carlo simulation methods as they apply to mutation and selection as formulated in Wright-Fisher models of evolutionary genetics. *Math. Biosci.* **211**, 205-225, 2008.

[10] J. Guiot, F. Torre, D. Jolly, O. Peyron, J.J. Boreux, R. Cheddadi. Inverse vegetation modeling by Monte Carlo sampling to reconstruct palaeoclimates under changed precipitation seasonality and CO₂ conditions: application to glacial climate in Mediterranean region. *Ecol. Model.* **127**, 119-140, 2000.

[11] C. Martin, E. Ayesa. An Integrated Monte Carlo Methodology for the calibration of water quality Models. *Ecol. Model.* **221**, 2656-2667, 2010.

[12] Y. Ding, K. Arai. Forest parameter estimation by means of Monte-Carlo simulations with experimental considerations: estimation of multiple reflections among trees depending on forest parameters. *Adv. Space Res.* **43**, 438-447, 2009.

[13] A. Ramírez, C. Keizer, J.P.V. Sluijs, J. J. Olivier, L. Brandes. Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990-2004. *Atmos. Environ.* **42**, 8263-8272, 2008.

[14] X. Tang, Z. Wang, J. Zhu, A.E. Gbaguidi, Q. Wu, J. Li, T. Zhu. Sensitivity of ozone to precursor emissions in urban Beijing with a Monte Carlo scheme. *Atmos. Environ.* **44**, 3833-3842, 2010.

[15] J. Haarhoff, E.H. Mathews. Monte Carlo method for thermal building simulation. *Energ. Buildings* **38**, 1395-1399, 2006.

[16] J. Keirstead, N. Shah. Calculating minimum energy urban layouts with mathematical programming and Monte

- Carlo analysis techniques. *Comput. Environ. Urban Systems* **35**, 368-377, 2011.
- [17] W. Wach, J. Unarski. Uncertainty of calculation results in vehicle collision analysis. *Forensic Sci. Int.* **167(2)**, 181-188, 2007.
- [18] M. Cai, T. Zou, P. Luo, J. Li. Evaluation of simulation uncertainty in accident reconstruction via combining Response Surface Methodology and Monte Carlo Method. *Transport. Res. C: Emerging Technologies* **48**, 241-255, 2014.
- [19] G. Davis, A. Mudgal. Bayesian Uncertainty Quantification for Planar Impact Crashes via Markov Chain Monte Carlo Simulation. *SAE Technical Paper*, 2016.
- [20] I. Han, I. Impulse-momentum based analysis of vehicle collision accidents using Monte Carlo simulation methods. *Int. J. Automot. Techn.* **16(2)**, 253-270, 2015.
- [21] Brasil. *Lei n. 9.503, de 23 de setembro de 1997. Código de Trânsito Brasileiro*. Disponível no sítio eletrônico:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9503.htm>. Acessado em 21 novembro de 2015.