AVALIAÇÃO DE EXCESSO DE VELOCIDADE EM SINISTROS DE TRÂNSITO COM SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO EM CASOS LIMÍTROFES: uma análise das incertezas de falsos positivos e falsos negativos

Avante
REVISTA ACADÊMICA DA POLÍCIA CIVIL DE MINAS GERAIS

Américo Rafael Ramos Fonseca
http://lattes.cnpq.br/2357456592702201 – https://orcid.org/0009-0005-0968-9531
americo.fonseca@policiacivil.mg.gov.br
Polícia Civil de Minas Gerais, Itabira, MG, Brasil

Jeferson Aderbal Fonseca
http://lattes.cnpq.br/4996298427367851 – https://orcid.org/0009-0001-4352-6569
coronelfonseca@icloud.com
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

RESUMO
A determinação de excesso de velocidade em sinistros de trânsito envolve incertezas de medição e informações incompletas, dificultando conclusões definitivas. Nesse contexto, surge o problema de como decisões técnicas e jurídicas podem ser comprometidas quando a estimativa de velocidade é feita com base em dados incompletos e/ou medições incertas. O objetivo deste trabalho é demonstrar, por meio de simulações de Monte Carlo, como essas incertezas podem ser incorporadas ao cálculo da velocidade pré-colisão, especialmente em casos limítrofes, nos quais a velocidade estimada encontra-se muito próxima ao limite legal. Na metodologia, adotou-se a geração de dados simulados (*mock data*) para contemplar variações em parâmetros como ângulo de declive/aclive, coeficiente de atrito e distância de frenagem, resultando em uma distribuição de probabilidade para a velocidade inicial. Os resultados indicam que, mesmo quando grande parte das simulações sugere excesso de velocidade, há risco de falsos positivos se não forem consideradas as limitações e a dispersão dos valores medidos. Conclui-se que, para evitar julgamentos precipitados, é essencial avaliar o grau de incerteza intrínseco ao modelo, buscando condenações apenas além da dúvida razoável.

Palavras-chave: Simulações de Monte Carlo; Incertezas de medição; Precisão e acurácia; Informações incompletas; Além da dúvida razoável; Distribuição de probabilidade; Sinistros de trânsito.

EVALUATION OF SPEEDING IN TRAFFIC ACCIDENTS USING MONTE CARLO SIMULATIONS IN BORDERLINE CASES: an analysis of uncertainties and the risk of false positives and false negatives

ABSTRACT
The determination of speeding in traffic accidents involves measurement uncertainties and incomplete information, making definitive conclusions difficult. In this context, the problem arises of how technical and legal decisions may be compromised when the speed estimate is based on incomplete data and/or uncertain measurements. The objective of this study is to demonstrate, through Monte Carlo simulations, how these uncertainties can be incorporated into the calculation of pre-collision speed, especially in borderline cases where the estimated speed is very close to the legal limit. In the methodology, simulated data (mock data) generation was adopted to account for variations in parameters such as slope angle, friction coefficient, and braking distance, resulting in a probability distribution for the initial speed. The results indicate that even when a significant portion of the simulations suggest speeding, there is a risk of false positives if the limitations and dispersion of measured values are not considered. It is concluded that, to avoid premature judgments, it is essential to assess the intrinsic uncertainty of the model, ensuring convictions occur only beyond a reasonable doubt.

Keywords: Monte Carlo simulations; Measurement uncertainties; Precision and accuracy; Incomplete information; Beyond a reasonable doubt; Probability distribution; Traffic accidents.

DOI: https://doi.org/10.70365/2764-0779.2025.140

Recebido em: 10/03/2025.
Aceito em: 16/04/2025.

1 INTRODUÇÃO

Sinistros de trânsito envolvendo suspeita de excesso de velocidade são situações de grande relevância, tanto para as ciências forenses quanto para a esfera judicial, pois envolvem aspectos técnicos como escolha de modelos mecânicos, medições de distâncias de frenagem, inclinações de pista, coeficientes de atrito e legais a exemplo de responsabilização civil ou penal. Ainda que avanços tecnológicos facilitem a identificação e a medição de vestígios, há fatores que comprometem a coleta de dados de modo abrangente, a exemplo da existência de informações incompletas, cuja determinação não foi possível realizar, além de incertezas de medições inerentes a qualquer esforço metrológico. Medições em laboratórios já sofrem com limitações, porém, em cenários reais, agravam-se devido a condições adversas (iluminação precária, risco de vida em rodovias movimentadas, locais inidôneos e outros), urgência na liberação da via e possibilidade de novos sinistros decorrentes do primeiro.

Nessa conjuntura, identifica-se uma lacuna quanto ao emprego consistente de técnicas de simulação para estimar a probabilidade de eventos dificilmente mensuráveis. Especificamente, simulações de Monte Carlo emergem como metodologia robusta que pode lidar com os casos limítrofes, em que as velocidades estimadas se aproximam dos limites legais, causando controvérsias na decisão de condenação penal ou cível. Este trabalho, portanto, utiliza um modelo cinemático simples (massa pontual em plano inclinado sob ação da gravidade e atrito dinâmico) para gerar *mock data* a partir de distribuições de erro gaussianas e triangulares, representando incertezas sobre parâmetros como inclinação (e.g. medida por inclinômetros em pontos específicos, com possíveis falhas metodológicas) e coeficiente de atrito (medido com *dragsled* que não reproduz as condições tribológicas das interações dos pneumáticos com a via). Em casos reais, tais fatores tornam-se mais críticos devido à baixa possibilidade de revisitação do local sob as mesmas condições, poucas repetições de medições e a urgência de liberar vítimas ou retomar o fluxo de veículos.

Diante disso, o objetivo principal deste artigo é apresentar uma aplicação de simulações de Monte Carlo em sinistros de trânsito para quantificar o risco de falsos positivos em acusações de excesso de velocidade, viabilizando uma análise que considere o princípio de "além da dúvida razoável". Espera-se que esta abordagem contribua para a engenharia forense ao demonstrar como incertezas de medição e informações incompletas podem ser incorporadas em modelos quantitativos, suprindo a necessidade de considerações demasiadamente conservadoras na avaliação

CC BY

pericial. Por fim, a estrutura do artigo discute as bases teóricas que fundamentam o método adotado, apresenta os procedimentos de simulação implementados, exibe os resultados junto às discussões estatísticas e, por fim, conclui destacando as implicações e recomendações para casos forenses.

2 DESENVOLVIMENTO

Nos últimos anos, tornou-se evidente a necessidade de aplicar metodologias quantitativas para estimar a probabilidade de ocorrência de determinados fenômenos em sinistros de trânsito. A análise de excesso de velocidade, em particular, costuma ser embasada em valores pontuais — por exemplo, o coeficiente de atrito extraído de tabelas — sem levar em conta as inúmeras variáveis que influenciam o resultado, nem a dispersão inerente aos parâmetros medidos (Tumbas; Smith, 1988). Essas circunstâncias podem conduzir a conclusões imprecisas ou até conflitantes, especialmente quando o valor estimado de velocidade pré-colisão se aproxima do limite legal. Assim, o presente estudo propõe o uso de simulações de Monte Carlo para incorporar as incertezas de medição e as informações incompletas, de modo a oferecer uma análise estatística mais robusta.

O desenvolvimento a seguir discute, inicialmente, o uso de simulações de Monte Carlo como abordagem para modelar incertezas em variáveis como o ângulo de inclinação da via, o coeficiente de atrito dinâmico e a distância de frenagem. Em seguida, aborda-se o papel da precisão e da acurácia em análises forenses, demonstrando como erros sistemáticos e ruídos aleatórios podem influenciar a taxa de falsos positivos e falsos negativos. Posteriormente, discute-se a natureza do coeficiente de atrito dinâmico como uma grandeza dependente da interação entre múltiplos fatores, apresentando o contexto de "informações incompletas" que caracteriza essa variável. Por fim, são tratados os chamados casos limítrofes e suas implicações legais, enfatizando a importância de se quantificar as incertezas para evitar julgamentos equivocados ou condenações indevidas.

2.1 Simulações de Monte Carlo e Incertezas de Medição

A técnica de Monte Carlo consiste em amostrar inúmeras vezes distribuições de probabilidade dos parâmetros envolvidos no acidente (ângulo de inclinação da via, coeficiente de atrito dinâmico entre pneumáticos e a via, distância de frenagem etc.), refletindo de forma mais realista as variações e incertezas de medição presentes em casos de sinistros. Essa abordagem, aliada a dados experimentais, permite identificar a dispersão e a tendência central dos valores prováveis de cada variável. Consequentemente,

CC BY

avaliações forenses embasadas nessa metodologia buscam quantificar margens de erro e reduzir o risco de conclusões precipitadas (Kroese *et al.*, 2011).

Essas incertezas de medição, aplicadas ao estudo sob análise, variam em função de fatores como:

- Inclinação da via (θ), que pode ser registrada com inclinômetros, porém sofre influência do ponto escolhido pelo perito, do posicionamento exato do aparelho e até de condições locais.
- Coeficiente de atrito (μ), medido com *dragsled* em condições que não replicam exatamente as características tribológicas do pneu do veículo envolvido (temperatura, desgaste, composição do pneu etc.) ou até extraído de tabelas.
- Distância de frenagem (d_s), frequentemente aferida em condições de iluminação adversa ou sob risco iminente de novos sinistros, o que dificulta medições repetidas (Tumbas; Smith, 1988).

A reunião desses fatores resulta em um cenário de informações incompletas, que torna a precisão e a acurácia das medições menos garantidas. Nesse sentido, a adoção de simulações de Monte Carlo ajuda a incorporar a dispersão inerente a cada parâmetro, fornecendo distribuições de probabilidade e permitindo inferir quão robusta é a análise final de velocidade.

2.2 Precisão, Acurácia e Erros

No contexto das análises de velocidade, precisão se relaciona à dispersão dos valores estimados, enquanto acurácia (ou exatidão) remete à proximidade entre a estimativa média e o valor "verdadeiro", conforme Silva e Mendonça (2024). Em processos forenses, é imprescindível quantificar o quanto as medições podem ter sido realizadas de maneira limitada (poucas repetições, condições incertas, metodologias rápidas) e como essas limitações causam impacto nas estimativas de velocidade.

A capacidade de um sistema de medição (ou modelo) em aproximar-se do valor real indica sua acurácia. Já a capacidade de repetir medições com baixos desvios padrão indica sua precisão (Silva; Mendonça, 2024). Quando as medições são realizadas em ambientes adversos – como locais de sinistro com risco de novos acidentes ou interrupção de tráfego –, a probabilidade de erros de medição (desde erros sistemáticos a ruídos aleatórios) aumenta significativamente.

Como apontado em estudos sobre classificadores e determinação de fonte, a noção de exatidão também envolve a taxa de falsos positivos e falsos

CC BY

negativos (Silva; Mendonça, 2024). Por exemplo, se um parâmetro de velocidade ou frenagem apresenta elevada variabilidade, isso pode incorrer tanto em erro tipo I (falso positivo: conclusão de que havia excesso de velocidade quando não havia) quanto em erro tipo II (falso negativo: concluir que não havia excesso de velocidade quando havia, de fato).

2.3 O Coeficiente de Atrito Dinâmico e Informações Incompletas

O coeficiente de atrito dinâmico (μ) é uma grandeza adimensional, mas não se trata de uma propriedade de um único meio: antes, ele mensura a dissipação energética na interação entre duas superfícies. Conforme explicam os princípios da tribologia, esse coeficiente depende de variados fatores das superfícies no momento da interação, tais como suas geometrias, temperaturas, cargas aplicadas, velocidade relativa, materiais e até a presença ou não de um filme fluido entre as interfaces (Neale, 1996).

No caso de pneumáticos, a pressão manométrica (calibragem) dos pneus do veículo influencia diretamente o atrito medido (Gillespie, 2021). Assim, o valor de μ medido em laboratório ou com dispositivos como o *dragsled* não necessariamente reproduz com fidelidade as condições reais de um sinistro de trânsito (Neale, 1996; Gillespie, 2021). Fatores como desgaste desigual da banda de rodagem, características do solo (pavimento seco, molhado, empoeirado) e alterações de carga dinâmica durante a frenagem completam o rol de fontes de incerteza.

Portanto, há informações incompletas no momento de estimar μ. Nem sempre é possível conhecer, por exemplo, a pressão exata dos pneus ou a temperatura do pavimento na hora do sinistro, e mesmo variações aparentemente pequenas podem gerar dispersões relevantes no resultado final de velocidade. A adoção de simulações de Monte Carlo, que permitem modelar μ por meio de distribuições de probabilidade (e.g., triangular ou beta), fornece uma visão estatística mais apropriada, contemplando cenários de grande incerteza e evitando a falsa impressão de um μ único e universal.

2.4 Casos Limítrofes e Falsos Positivos

Em análises forenses, casos limítrofes — em que o valor simulado da velocidade pré-colisão se encontra muito próximo ao limite legal da via — são especialmente críticos, pois uma ligeira variação (eventualmente dentro da incerteza de medição) pode mudar o resultado final de "abaixo" para "acima" do limite. Esse tipo de cenário exige atenção redobrada do perito, pois qualquer erro sistemático pode conduzir a um falso positivo (erro tipo I) — considerar que houve excesso de velocidade quando, na realidade, não

CC BY

houve.

Importante esclarecer que, conforme se extrai da Lei n.º 9.503/1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro (Brasil, 1997), o excesso de velocidade é a infração administrativa de ultrapassar o limite de velocidade estabelecido para uma via[1]. Contudo, a punição a essa infração varia de acordo com seu grau, que é determinado pelo percentual de excesso de velocidade[2], bem como por eventual consequência[3].

No mesmo diapasão, o Decreto-Lei n.º 2.848/1940, que institui o Código Penal (Brasil, 1940), trata, dentre outros crimes que possam ocorrer em razão do excesso de velocidade nas vias públicas, do crime de homicídio[4], tendo, anteriormente, diferenciado os casos de crimes dolosos e culposos[5]. Tal contextualização é importante porque entende-se que condenar alguém por prática de crime relacionado ao excesso do limite de velocidade pode ter consequências severas, razão pela qual se propõe uma segurança estatística ou, ao menos, uma quantificação do grau de incerteza envolvido.

Diante disso, métodos que integrem simulações de Monte Carlo e análise de incertezas de medição, levando em conta precisão e acurácia, fornecem uma visão estatística sólida, mesmo em cenários com dados parciais ou sujeitos a ruído.

Em síntese, essa fundamentação teórica reforça a relevância de considerar tanto os parâmetros do modelo (e.g., coeficiente de atrito, distância de frenagem, inclinação) quanto a avaliação estatística da dispersão (precisão) e do viés (acurácia), o que, caso não observados, tendem a aumentar o risco de equívocos na determinação de velocidade e, consequentemente, de produzir falsos positivos ou falsos negativos nos laudos

[1] Art. 218. Transitar em velocidade superior à máxima permitida para o local, medida por instrumento ou equipamento hábil, em rodovias, vias de trânsito rápido, vias arteriais e demais vias: (Redação dada pela Lei nº 11.334, de 2006) (Vide ADI nº 3951)
I - quando a velocidade for superior à máxima em até 20% (vinte por cento): Infração – média; Penalidade – multa;
II - quando a velocidade for superior à máxima em mais de 20% (vinte por cento) até 50% (cinqüenta por cento): Infração – grave; Penalidade – multa;
III - quando a velocidade for superior à máxima em mais de 50% (cinqüenta por cento): Infração – gravíssima; Penalidade - multa (três vezes) e suspensão do direito de dirigir.

[2] Art. 311. Trafegar em velocidade incompatível com a segurança nas proximidades de escolas, hospitais, estações de embarque e desembarque de passageiros, logradouros estreitos, ou onde haja grande movimentação ou concentração de pessoas, gerando perigo de dano:
Penas - detenção, de seis meses a um ano, ou multa.

[3] Art. 302. Praticar homicídio culposo na direção de veículo automotor:
Penas - detenção, de dois a quatro anos, e suspensão ou proibição de se obter a permissão ou a habilitação para dirigir veículo automotor.

[4] Art. 121. Matar alguém: Pena - reclusão, de seis a vinte anos. [...]
§ 3º Se o homicídio é culposo: Pena - detenção, de um a três anos.

[5] Art. 18 - Diz-se o crime:
I - doloso, quando o agente quis o resultado ou assumiu o risco de produzi-lo;
II - culposo, quando o agente deu causa ao resultado por imprudência, negligência ou imperícia

CC BY

periciais.

3 METODOLOGIA

A condução de investigações forenses envolvendo sinistros de trânsito requer a adoção de metodologias quantitativas para respaldar a análise de velocidade pré-colisão. Nesse contexto, demonstrar com rigor o impacto das incertezas inerentes aos parâmetros de frenagem assume papel crucial, especialmente quando se discute a possibilidade de condenar alguém por excesso de velocidade. Nesta seção, detalha-se o modelo físico aplicado, à seleção de distribuições de probabilidade mais adequadas às variáveis de interesse e os procedimentos de simulação adotados para gerar resultados estatisticamente robustos. Em seguida, apresentam-se estudos de caso baseados em *mock data*[6] que ilustram as variações significativas na estimativa de velocidade inicial em função de escolhas distintas para o coeficiente de atrito (μ) e demais parâmetros.

3.1 Modelo de Velocidade e Parâmetros

O modelo físico de frenagem abrange o ângulo da via (θ), o coeficiente de atrito (μ), a distância de frenagem (d_s), a aceleração gravitacional (g) e um sinal que define se a inclinação da via é positiva ou negativa (aclive ou declive, respectivamente):

$$v_0 = \sqrt{2gd_s(\mu\cos(\theta) \pm \sin(\theta))} \quad (1)$$

No modelo computacional, θ e d_s são tratados com distribuições normais (assumindo um número suficiente de medições para caracterizar média e desvio-padrão), enquanto μ é representado com distribuição triangular (definindo $\mu_{min}, \mu_{peak}, \mu_{máx}$). Essa escolha reflete tanto a natureza de certos parâmetros, mais bem estudados por medições frequentes, quanto a ignorância maior acerca do coeficiente de atrito (Magalhães; Lima, 2023), que sofre influências diversas de natureza tribológica (Neale, 1996).

O coeficiente admensional de atrito dinâmico em situações cotidianas pode estar em intervalos amplos, como demonstrado na Tabela 1, adaptada de Wallingford *et al.* (1990), que representa coleta de dados dos valores para superfícies secas da interação de pneumáticos veiculares com a via.

[6] *Mock data* – dados simulados criados artificialmente para representar cenários reais ou hipotéticos, utilizados com o objetivo de testar modelos, metodologias ou hipóteses em situações controladas, especialmente quando os dados reais são inexistentes, incompletos ou de difícil acesso.

CC BY

Tabela 1 – Coeficientes de atrito para o cimento Portland seco, asfalto seco ou piche.

Superfície da Estrada	Coeficiente de Atrito (< 30 mph)	Coeficiente de Atrito (> 30 mph)
Cimento Portland - Novo, Afiado	0.80 - 1.20	0.70 - 1.00
Cimento Portland - Trafegado	0.60 - 0.80	0.60 – 0.75
Cimento Portland - Polido pelo Tráfego	0.55 - 0.75	0.50 - 0.65
Asfalto ou Piche - Novo, Afiado	0.80 – 1.20	0.65 – 1.00
Asfalto ou Piche - Trafegado	0.60 - 0.80	0.55 - 0.70
Asfalto ou Piche - Polido pelo Tráfego	0.55 – 0.75	0.45 - 0.65
Asfalto ou Piche - Excesso de Piche	0.50 - 0.60	0.35 - 0.60

Fonte: Adaptado de Wallingford *et al*. (1990).

Interessante notar que, por exemplo, caso a análise de um sinistro seja feita considerando uma superfície asfaltada nova, em um intervalo de velocidade menor que 30 mph (milhas por hora, aproximadamente 48,28 km/h), o valor do coeficiente de atrito entre a via e o pneumático pode estar entre 0,8 e 1,2 (um intervalo igual a 0,4 unidade), o que pode acusar excesso de velocidade ou não, a depender do valor utilizado dentro desse intervalo. Além disso, mesmo que um coeficiente de atrito seja medido *in loco* – por exemplo utilizando-se um *dragsled* – não há qualquer garantia que o valor aferido seja o mesmo – ou parecido – com o percebido pelos pneumáticos dos veículos envolvidos no incidente sob estudo. Dessa forma, qualquer escolha de valor pode ser considerada arbitrária.

Muitas vezes, de forma a contornar essa situação, utiliza-se o menor valor das tabelas correspondentes a via (seu material e condição), de modo a ser conservador nos cálculos, evitar questionamentos acerca da veracidade da análise e minimizar o risco de falsos positivos. Entretanto, esse tipo de abordagem pode gerar excesso de resultados falsos negativos, eximindo as responsabildades do(s) condutore(s) envolvido(s). Sendo assim, percebe-se a patente necessidade da inserção da ignorância das variáveis na conjectura, aumentando a transparência e fornecendo subsídios adicionais para o judiciário na tomada de decisões.

3.2 Simulações e *Mock Data*

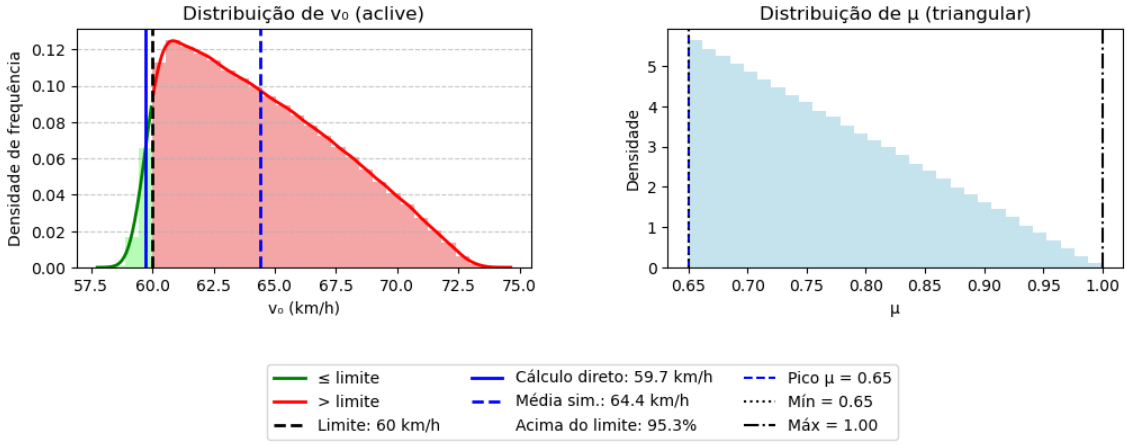
Realizou-se simulações computacionais com dados hipotéticos simulados (*mock data*), ou seja, dados gerados artificialmente para representar possíveis cenários enfrentados por peritos em seu cotidiano, especialmente quando dados reais são inexistentes ou incompletos. Cada iteração computacional simula valores de θ e d_s de acordo com suas respectivas distribuições normais e sorteia μ numa distribuição triangular. Escolheu-se distribuições triangulares para μ por estas representarem bem

CC BY

cenários de ignorância (Magalhães; Lima, 2023). Em seguida, calculou-se a velocidade inicial (v_0 em km/h) considerando energia potencial gravitacional, força de atrito e inclinação (aclive ou declive). Esse processo, repetido N vezes (por exemplo, 10^6), gera uma distribuição de probabilidade para v_0. Finalmente, o percentual de casos acima de um certo limite (por exemplo, 60 km/h) é tomado como a probabilidade de exceder a velocidade permitida, considerando as incertezas.

Consideremos o caso específico a seguir, em que foram realizadas 10^6 (um milhão de) simulações, considerando-se uma inclinação média da via em aclive (subida) de $3°$ com um desvio padrão de $0{,}5°$, uma distância de frenagem de 21 metros com um desvio padrão de 0,2 metro, coeficiente de atrito entre 0,65 e 1,00 e velocidade limite da via de 60 km/h.

Figura 1 – Simulação da distribuição de velocidades considerando uma distribuição triangular de μ com pico em 0,65 e intervalo (0,65, 1,00).



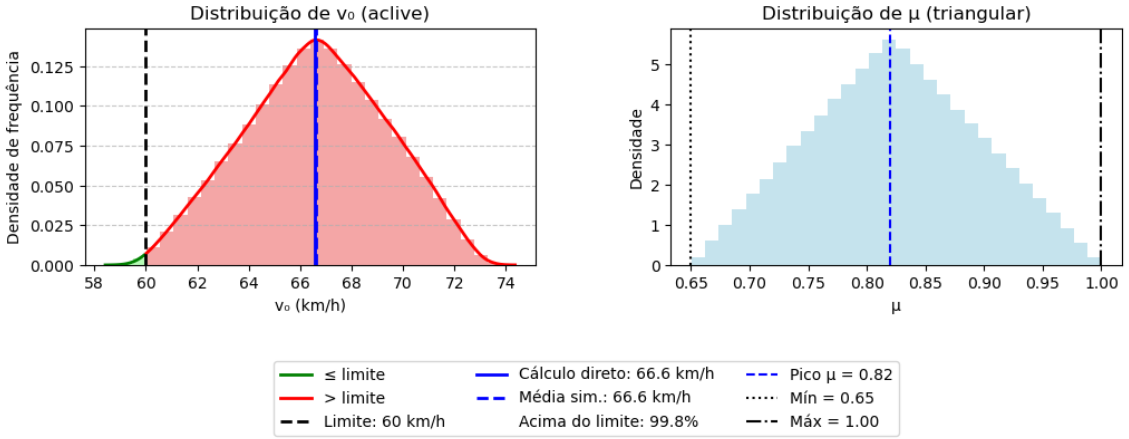
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Caso fosse utilizado o valor de $\mu = 0{,}65$, valor mínimo da tabela para o coefience de atrito para pista de asfalto em condições novas, percebe-se que o resultado da velocidade do condutor seria $v_0 = 59{,}7\ km/h$. Entretanto, utilizando uma distribuição triangular com pico em $\mu = 0{,}65$, com um viés para o valor mínimo do intervalo (como uma nova versão da abordagem conservadora), o valor médio de v_0 obtido pelas simulações é de $64{,}4\ km/h$. Ademais, dos um milhão de simulações realizadas, 95,3 % indicam excesso de velocidade do condutor.

Os resultados sugerem que, caso a análise fosse realizada de forma conservadora, com o valor de $\mu = 0{,}65$, o veículo não estava trafegando acima da velocidade máxima permitida. Entretanto, o modelo estatístico indica que a probalidade de que estava trafegando acima da velocidade máxima permitida é de 95,3%.

Caso o valor de μ_{peak} fosse considerado como a média do intervalo, ou seja, $\mu_{peak} = 0{,}82$ e todas as outras variáveis fossem mantidas, o resultado seria:

Figura 2 – Simulação da distribuição de velocidades considerando uma distribuição triangular de μ com pico em 0,82 e intervalo (0,65, 1,00).



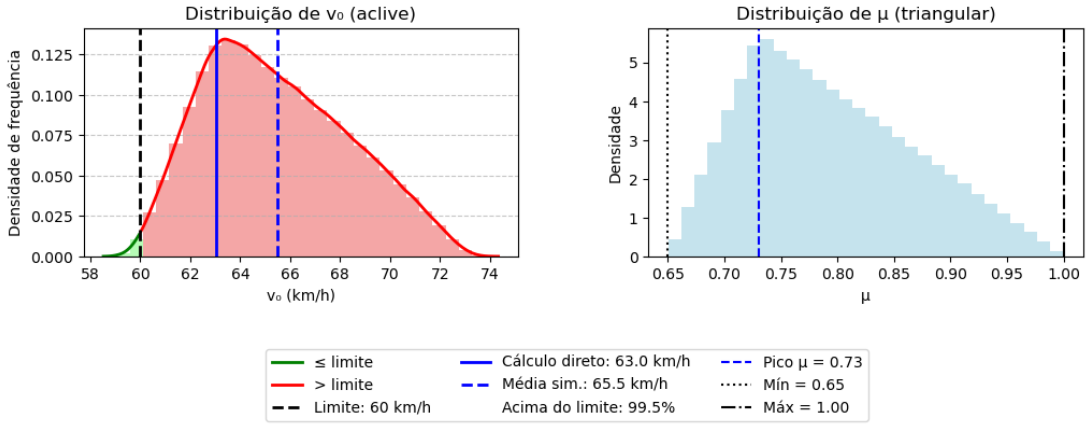
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Neste caso, os resultados indicam que 99,8% dos cenários sugerem excesso de velocidade e 0,2% de chances de estar abaixo da velocidade máxima permitida, o que possibilita uma análise completa dos cenários, levando em consideração as incertezas associadas. Entretanto, surge a questão de como realizar a escolha do pico da distribuição de μ. Uma medida híbrida, por exemplo, poderia ser adotada, com medições do coeficiente no local e utilizando esse valor como o máximo da distribuição.

Sendo assim, considerando um terceiro caso, em que medições *in situ* do coeficiente de atrito foram realizadas com uma média de $\bar{\mu}_{medido} = 0{,}73$, por exemplo. Nesta situação, é possível também incorporar esse resultado às análises, considerando o pico da distribuição triangular da densidade de frequências como $\mu_{peak=}\bar{\mu}_{medido} = 0{,}73$.

Nesse caso, os resultados indicam 99,5% de chance de que o veículo trafegava acima da velocidade máxima permitida (e 0,5% de chance do contrário), como representado na Figura 3.

Figura 3 – Simulação da distribuição de velocidades considerando uma distribuição triangular de μ com pico em 0,73 e intervalo (0,65, 1,00).



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

3.3 Limitações Práticas

Apesar dos exemplos com *mock data*, a coleta de dados em perícias reais enfrenta problemas de iluminação inadequada, risco de novos sinistros e necessidade de retomar a via com brevidade, o que reduz a possibilidade de medições repetidas. Fatores como mudanças climáticas ao revisitar o local e falhas metodológicas (pontos de medição mal posicionados ou inclinações aferidas sob condições precárias) tornam os parâmetros de entrada ainda mais incertos. Por conseguinte, os resultados podem apresentar dispersões maiores na distribuição final de velocidades, evidenciando a importância de adotar procedimentos estatísticos que acomodem esses cenários de elevada variabilidade.

4 CONCLUSÃO

As simulações de Monte Carlo demonstram-se uma ferramenta valiosa para analisar sinistros de trânsito que envolvam suspeita de excesso de velocidade, incluindo casos limítrofes. Elas permitem incorporar informações incompletas e incertezas de medição, fornecendo uma distribuição de probabilidade para a velocidade inicial e permitindo avaliar tanto a precisão e a acurácia de eventuais conclusões quanto o risco de falsos positivos em julgamentos criminais ou cíveis.

Em casos reais, as condições adversas de coleta, segurança e tempo agravam a qualidade e a quantidade de dados disponíveis. Desta forma, qualquer estimativa resultante deve ser analisada criticamente, levando-se em conta as possíveis "falhas metodológicas" (erro humano, limitações instrumentais) e a necessidade de agilidade na liberação de vias e corpos. A alta variabilidade do coeficiente de atrito e a medição pontual da inclinação

são exemplos de fatores que podem introduzir incertezas que não são facilmente quantificáveis.

Em última análise, a técnica de Monte Carlo não substitui a necessidade de um trabalho pericial meticuloso, mas fornece subsídios quantitativos para que decisões não sejam tomadas unilateralmente com base em valores pontuais. Ao se observar, por exemplo, que a maior parte das simulações indica excesso de velocidade, ainda se deve refletir sobre casos limítrofes e sobre a proporção residual que, embora menor, poderia sugerir inocência. Nesse sentido, o método contribui para evitar julgamentos precipitados, consolidando a ideia de condenar apenas além da dúvida razoável.

CC BY

REFERÊNCIAS

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Diário Oficial da União, Brasília, 5 out. 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 08 mar. 2025.

BRASIL. **Decreto-Lei n.º 2.848, de 7 de dezembro de 1940**, que institui o Código Penal. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del2848.htm. Acesso em: 08 mar. 2025.

BRASIL. **Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997**, que institui o Código de Trânsito Brasileiro. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503.htm. Acesso em: 08 mar. 2025.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Warrendale, PA: SAE INTERNATIONAL, 2021. DOI: 10.4271/9781468601770.

KROESE, D. P.; TAIMRE, T.; BOTEV, Z. I. **Handbook of Monte Carlo Methods**. New York: JOHN WILEY & SONS, 2011. ISBN 978-0-470-17793-8.

MAGALHÃES, Marcos Nascimento; LIMA, Antonio Carlos Pedroso de. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 7. ed. São Paulo: Edusp, 2023. ISBN 978-85-314-0677-5.

NEALE, M. J. **Tribology Handbook**. 2. ed. Woburn, MA: Elsevier, 1996. DOI: 10.1016/B978-0-7506-1198-5.X5000-0.

SILVA, Adelino Pinheiro; MENDONÇA, Jean Michel Barboza. Medidas de exatidão e precisão em classificadores baseados em razão de verossimilhança**. Avante: Revista Acadêmica da Polícia de Minas Gerais**, *[S. l.]*, v. 1, n. 5, 2024. DOI: 10.70365/2764-0779.2024.41. Disponível em: https://revistaavante.policiacivil.mg.gov.br/index.php/avante/article/view/41. Acesso em: 9 mar. 2025.

TUMBAS, N. S.; SMITH, R. A**. Measuring protocol for quantifying vehicle damage from an energy basis point of view.** Warrendale, PA: SAE INTERNATIONAL, 1988. 28 p. (SAE Technical Paper, 880072). DOI: 10.4271/880072.

WALLINGFORD, J. G.; GREENLEES, B.; CHRISTOFFERSEN, S. **Tire-roadway friction coefficients on concrete and asphalt surfaces applicable for accident reconstruction.** SAE Technical Paper Series, 1990. DOI: 10.4271/900103.