

Incerteza na precificação de projetos de engenharia civil: extensão probabilística por simulação de Monte Carlo

Uncertainty in civil engineering design pricing: a probabilistic extension using Monte Carlo simulation

Marcos Antonio Müller Neto¹

Maicon Andersom de Souza²

Michele Macedo Lopes³

RESUMO

A formação do preço de projetos de Engenharia Civil costuma produzir um valor pontual, embora horas técnicas, produtividade, custos diretos e eventos de risco estejam sujeitos a variação. Este artigo desenvolve uma extensão probabilística de um modelo rastreável anteriormente publicado, com o objetivo de quantificar a incerteza conjunta e converter o preço em distribuição de resultados. Realizou-se estudo aplicado, quantitativo baseado em simulação, com 100.000 iterações de Monte Carlo. O cenário preservou apenas os valores modais do exemplo determinístico original para permitir comparação; os intervalos, as distribuições triangulares, as probabilidades dos eventos e as correlações foram definidos exclusivamente para demonstração metodológica. O preço determinístico de R\$16.699,41 correspondeu aproximadamente ao percentil 31 da distribuição. A mediana foi R\$17.639,73, enquanto os níveis P80 e P90 atingiram R\$19.407,96 e R\$20.380,89. Em 68,77% das simulações, o preço necessário superou o valor determinístico. A correlação de postos indicou maior influência das horas do engenheiro civil, das horas do engenheiro sênior, do risco associado aos dados de entrada e das horas de modelagem. Conclui-se que a simulação não define honorários de mercado, mas evidencia a probabilidade de insuficiência de um preço e permite associar decisões comerciais a níveis explícitos de confiança.

Palavras-chave: simulação de Monte Carlo; precificação; projetos de engenharia; análise de risco; Engenharias.

ABSTRACT

Civil engineering design pricing usually produces a point estimate, although technical hours, productivity, direct costs, and risk events are subject to variation. This article develops a probabilistic extension of a previously published traceable model to quantify joint uncertainty and convert price into a distribution of outcomes. An applied, quantitative, simulation-based study was conducted using 100,000 Monte Carlo iterations. The scenario retained only the modal values of the original deterministic example to enable comparison; ranges, triangular

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Avantis – Uniavan.

² Professor orientador do Centro Universitário Avantis – Uniavan.

³ Bióloga coordenadora - Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional.

distributions, event probabilities, and correlations were defined solely for methodological demonstration. The deterministic price of BRL 16,699.41 corresponded approximately to the 31st percentile of the distribution. The median was BRL 17,639.73, while the P80 and P90 levels reached BRL 19,407.96 and BRL 20,380.89. In 68.77% of the simulations, the required price exceeded the deterministic value. Rank correlation indicated that civil engineer hours, senior engineer hours, input-data risk, and modeling hours had the greatest influence. The simulation does not determine market fees; instead, it reveals the probability that a price will be insufficient and enables commercial decisions to be associated with explicit confidence levels.

Keywords: Monte Carlo simulation; pricing; engineering design; risk analysis; Engineering.

1 INTRODUÇÃO

A precificação de serviços de projeto envolve uma decisão anterior ao consumo efetivo dos recursos. No momento da proposta, o prestador conhece o escopo contratado apenas na extensão permitida pelos documentos de entrada, pelas reuniões iniciais e pelas premissas disponíveis. As horas necessárias, a produtividade da equipe, o número de revisões e a ocorrência de interferências ainda não são observados; portanto, o preço é formado sob incerteza, mesmo quando sua memória de cálculo é detalhada.

A centralidade das horas técnicas na formação do custo encontra respaldo em estudos específicos sobre serviços de projeto. Koo, Shin e Lee (2017), ao examinarem dados de 54 projetos, estruturaram a estimativa de serviços de projeto e engenharia associados ao BIM a partir de horas de trabalho discriminadas por fase, disciplina e item de serviço. A evidência não autoriza transportar coeficientes entre organizações, mas sustenta que o esforço profissional e sua decomposição constituem base observável para estimar serviços intelectuais de engenharia.

Müller Neto e Souza (2026) propuseram um modelo rastreável para converter escopo, horas por categoria profissional, custo da capacidade prática, custos diretos, riscos, tributos e margem empresarial em preço de venda. O estudo substituiu multiplicadores genéricos por parcelas economicamente demonstráveis e apresentou aplicação determinística acompanhada de sensibilidade univariada. Os próprios autores delimitaram, entretanto, que a alteração de uma variável por vez não representa a incerteza conjunta nem as dependências entre entradas, recomendando avaliação probabilística posterior.

Essa limitação é relevante porque um valor esperado não descreve toda a distribuição de resultados. Dois cenários podem apresentar a mesma média e, ainda assim, possuir dispersões e probabilidades de excedência muito diferentes. Da mesma forma, a soma dos valores esperados de eventos discretos não informa ao decisor a frequência com que nenhum

evento, apenas um evento ou vários eventos ocorrerão simultaneamente. A análise de risco precisa, por isso, distinguir estimativa pontual, variabilidade inerente, eventos contingentes e incerteza sobre as próprias premissas (Curto *et al.*, 2022).

A simulação de Monte Carlo oferece um procedimento para propagar distribuições de entrada por meio de um modelo matemático e gerar uma distribuição de saídas. Em cada iteração, os valores fixos são substituídos por amostras compatíveis com intervalos, probabilidades e dependências previamente definidos. O resultado não é um preço único, mas uma função empírica da qual podem ser obtidos média, mediana, dispersão, percentis e probabilidades de excedência (Helton et al., 2006; AACE International, 2022).

No contexto de projetos de Engenharia Civil, a aplicação probabilística permite responder a uma pergunta diferente daquela tratada pelo modelo-base. Em vez de perguntar apenas como compor o preço, pergunta-se: como a variabilidade conjunta das horas técnicas, do custo da capacidade, dos custos diretos e dos eventos de risco altera a distribuição do preço de venda e os níveis de confiança associados à decisão comercial?

O objetivo geral deste artigo é desenvolver e demonstrar uma extensão probabilística do modelo de precificação de Müller Neto e Souza (2026), utilizando simulação de Monte Carlo para representar a incerteza conjunta das entradas. Como objetivos específicos, pretende-se: definir distribuições ilustrativas para horas, custos horários, custos diretos e impactos de risco; incorporar dependência entre as horas das categorias profissionais; comparar o preço determinístico com os percentis da distribuição simulada; identificar as entradas de maior influência monotônica; e discutir a utilização e os limites dos níveis P50, P80 e P90 na formação de propostas.

A contribuição é metodológica e incremental. O artigo não apresenta uma nova tabela de honorários, não estima valores médios do setor e não valida o modelo em empresas. A novidade consiste em transformar a formulação determinística já publicada em um procedimento de propagação de incertezas, documentando premissas, dependências, critérios de leitura e condições de uso. Todos os intervalos e resultados monetários são hipotéticos e servem apenas para tornar o método reproduzível.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estimativas pontuais e distribuições de custo

Uma estimativa pontual representa o custo ou preço por um único número. Essa forma é necessária para orçamento, proposta e contrato, mas não registra, sozinha, a incerteza das premissas que lhe deram origem. O GAO (2020) inclui a análise de sensibilidade e a análise de risco entre as etapas necessárias para que uma estimativa seja considerada crível, bem documentada e útil à decisão. A credibilidade não decorre apenas da exatidão aritmética: exige explicitar o intervalo de resultados possíveis e a posição do valor escolhido dentro desse intervalo.

No modelo determinístico de precificação, o custo técnico é calculado a partir da soma dos produtos entre horas e custos horários; em seguida, incorporam-se custos diretos e riscos, e a base é convertida em preço segundo as incidências de tributos e margem (Müller Neto; Souza, 2026). O cálculo é rastreável, mas cada entrada continua sendo uma previsão. Se as horas previstas forem tratadas como valores corretos, a precisão aparente da fórmula pode ocultar a incerteza substantiva do escopo e da produtividade.

A decomposição do esforço por categoria e etapa também facilita a retroalimentação do modelo. No estudo de Koo, Shin e Lee (2017), o uso de horas históricas permitiu construir coeficientes para serviços padronizados e não padronizados, preservando a possibilidade de adaptação a requisitos específicos. Para a precificação probabilística, essa lógica é relevante porque transforma registros de horas realizadas em evidência para estimar distribuição, dispersão e dependência, em vez de utilizar apenas um valor médio institucional.

A distinção entre valor determinístico e distribuição probabilística não significa que um deles seja dispensável. O ponto-base organiza o escopo, a memória de cálculo e a negociação; a distribuição testa o comportamento do modelo quando as premissas variam em conjunto. A decisão comercial pode, então, ser expressa por um percentil ou por uma probabilidade de insuficiência, em vez de depender exclusivamente de um adicional arbitrário sobre o preço-base.

2.2 Incerteza inerente, eventos de risco e dupla contagem

A ISO 31000:2018 define risco em relação ao efeito da incerteza sobre objetivos e orienta sua integração aos processos de decisão, enquanto a IEC 31010:2019 apresenta técnicas para identificar, analisar e avaliar riscos em diferentes contextos (ISO, 2018; IEC,

2019). Na precificação, essa integração exige reconhecer que nem toda variação possui a mesma natureza. A duração de uma atividade pode variar continuamente; uma revisão extraordinária pode ocorrer ou não; e a própria faixa atribuída a uma entrada pode refletir conhecimento incompleto.

Curto *et al.* (2022) discute incertezas aleatórias, estocásticas e epistêmicas na determinação de reservas. A incerteza aleatória está associada à variabilidade inerente; a estocástica pode representar a ocorrência probabilística de eventos; e a epistêmica decorre do conhecimento insuficiente sobre o sistema ou seus parâmetros. Embora as classificações variem entre autores, a separação é útil porque impede que todas as fontes sejam convertidas em um único percentual de contingência.

A AACE International (2022) recomenda que o modelo probabilístico mantenha vínculo explícito entre riscos e impactos. Intervalos de três pontos podem representar variabilidade inerente em quantidades, produtividade ou preços, enquanto eventos específicos devem ser tratados por ocorrência e impacto. A combinação é híbrida: distribuições contínuas descrevem as entradas variáveis e eventos Bernoulli representam situações que podem não ocorrer em uma determinada execução.

A modelagem separada da ocorrência e da severidade possui precedente na engenharia de custos. Touran (2003) apresentou um modelo probabilístico de contingência que considera a natureza aleatória das ordens de mudança, seus impactos em custo e prazo, o nível de confiança definido pelo decisor e a possível correlação entre eventos. Embora seu objeto seja a execução de obras, a contribuição metodológica é aplicável ao presente problema: eventos residuais não devem ser convertidos automaticamente em um percentual fixo, mas representados por frequência, impacto e dependência compatíveis com sua natureza.

Esse desenho também exige controle de dupla contagem. Se a faixa de horas já inclui o retrabalho previsível decorrente de revisões ordinárias, o mesmo efeito não deve reaparecer como evento discreto. O evento probabilístico deve representar apenas uma condição residual, incerta e não absorvida pela faixa-base. O valor monetário esperado continua útil para verificar a média teórica de um evento, mas a simulação preserva a assimetria entre a não ocorrência e os diferentes níveis de impacto (Shrivastava, 2014).

2.3 Simulação de Monte Carlo, distribuições e dependência

Na simulação de Monte Carlo, o modelo é executado repetidamente com valores amostrados das distribuições de entrada. A repetição produz uma amostra da variável de saída

e permite estimar estatísticas e percentis sem exigir solução analítica fechada. A técnica é amplamente utilizada em gerenciamento de projetos para quantificar os efeitos de incertezas em custo e prazo e oferecer indicadores probabilísticos de desempenho (Kwak; Ingall, 2007).

A escolha das distribuições deve refletir dados observados ou julgamento documentado. Quando existem séries históricas suficientes, podem ser ajustadas distribuições empíricas ou paramétricas e avaliados erros de aderência. Quando não existem dados, a distribuição triangular é uma simplificação operacional baseada em três pontos — mínimo, valor mais provável e máximo. Keefer e Bodily (1983) demonstram que aproximações de três pontos podem representar de forma compacta variáveis contínuas, mas seu desempenho depende da variável e dos momentos que se pretende preservar. Assim, a facilidade do formato triangular não elimina a subjetividade: ele concentra probabilidade em torno do modo e pressupõe limites finitos, devendo ser substituído quando a experiência revelar caudas, assimetrias ou multimodalidade diferentes (Vose, 2008).

Quando os três pontos forem obtidos por julgamento especializado, a licitação deve ser tratada como procedimento de produção de dados, e não como conversa informal. O'Hagan *et al.* (2006) recomendam definir com precisão a quantidade incerta, decompor o problema, registrar as evidências consideradas e reduzir vieses como ancoragem e excesso de confiança. Para serviços de engenharia, isso implica indicar a classe de projeto, o estágio de maturidade do escopo, o significado operacional dos limites e o profissional responsável pela estimativa, mantendo as premissas auditáveis.

A dependência entre entradas precisa ser considerada quando variáveis respondem a uma causa comum. Em um projeto, a insuficiência de definição do escopo pode elevar simultaneamente as horas de coordenação, cálculo e modelagem. A hipótese de independência, nessas condições, reduz artificialmente a probabilidade de variações conjuntas. A AACE International (2022) inclui correlação entre as principais considerações da simulação por faixas, e Helton *et al.* (2006) ressalta que a propagação deve preservar as relações relevantes entre entradas.

A inclusão de correlação também requer prudência. Matrizes arbitrárias podem ampliar ou reduzir a dispersão sem base observacional. Quando os coeficientes não são estimados a partir de contratos concluídos, devem ser tratados como cenários de dependência e submetidos a análise comparativa. O objetivo não é produzir uma aparência de precisão estatística, mas tornar explícita uma premissa que, em modelos determinísticos, costuma permanecer implícita.

As cópulas oferecem uma forma de separar as distribuições marginais da estrutura de dependência, permitindo combinar horas com marginais não normais sem impor uma distribuição multivariada única a todas as entradas (Nelsen, 2006). Entretanto, a cópula normal utilizada neste estudo é uma hipótese parcimoniosa e não representa dependência de cauda. Torre *et al.* (2019) mostram que estruturas gaussianas ou a independência podem distorcer probabilidades extremas quando a dependência real é mais complexa. Por isso, a escolha da cópula deve ser reavaliada quando houver dados suficientes e quando a cauda superior for determinante para a decisão.

2.4 Níveis de confiança e sensibilidade

Os percentis descrevem posições na distribuição simulada. O P50 é o valor para o qual aproximadamente metade das simulações resulta em preço igual ou inferior; no P80, essa proporção é 80%; no P90, 90%. Em estimativas de custo, o nível de confiança representa a probabilidade de o resultado realizado permanecer abaixo do valor adotado, dadas as premissas do modelo (GAO, 2020). O percentil não é garantia contratual, porque eventos excluídos, mudanças de escopo e erros de modelagem permanecem fora da distribuição.

A escolha do percentil é uma decisão de governança e apetite a risco. Utilizar P50 implica aceitar maior frequência de excedência do que utilizar P80; por outro lado, percentis elevados podem reduzir a competitividade se as faixas forem conservadoras ou se o contrato permitir revisão de preço. Por isso, a leitura deve ser integrada às cláusulas de escopo, à política de mudanças, à possibilidade de compartilhamento de riscos e à estratégia comercial.

A análise de incerteza informa quanto a saída varia; a análise de sensibilidade procura identificar quais entradas explicam essa variação. Saltelli *et al.* (2019) criticam análises que alteram um fator por vez porque elas percorrem apenas corredores do espaço multidimensional e não capturam adequadamente interações. Em modelos predominantemente monotônicos, correlações de postos constituem diagnóstico descritivo acessível, embora não substituam índices de sensibilidade baseados em variância quando há forte não linearidade, interações ou dependência complexa.

A interpretação torna-se mais delicada quando as entradas são dependentes. Xu e Gertner (2008) distinguem a contribuição própria de uma entrada daquela transmitida por sua correlação com outras variáveis; Mara e Tarantola (2012) propõem índices de sensibilidade baseados em variância capazes de separar parcelas independentes e dependentes. Consequentemente, um coeficiente de Spearman elevado no presente estudo deve ser lido

como associação monotônica total no cenário, e não como efeito causal isolado ou fração exclusiva da variância do preço.

2.5 Elicitação, verificação e validade do modelo

A qualidade de uma simulação depende de três camadas distintas: a formulação conceitual, a implementação computacional e a correspondência com o sistema real. Sargent (2013) diferencia verificação — exame de se o modelo computacional foi implementado conforme sua especificação — e validação — avaliação de se o modelo possui exatidão suficiente para o uso pretendido. Uma rotina pode reproduzir perfeitamente suas equações e, ainda assim, produzir decisões inadequadas se distribuições, exclusões ou relações de dependência não representarem o contexto observado.

Para modelos alimentados por julgamento, a validade dos dados de entrada exige rastreabilidade da eliciação. O'Hagan *et al.* (2006) assinalam que probabilidades subjetivas devem ser obtidas por protocolo estruturado, com definição inequívoca das quantidades, preparação dos especialistas e documentação das justificativas. Em ambiente organizacional, a calibração pode combinar apontamentos de horas, registros de revisões, ocorrências de riscos e julgamento técnico, preservando a origem de cada parâmetro e a data-base de sua adoção.

A validação deve ser proporcional ao uso. Um modelo demonstrativo pode ser verificado por testes das equações, estabilidade numérica e reprodução com semente fixa; um modelo destinado a aprovar propostas requer também comparação retrospectiva e prospectiva com contratos concluídos. A taxa observada de excedência deve ser confrontada com o percentil adotado: se propostas aprovadas no P80 forem excedidas com frequência muito superior a 20%, as distribuições, dependências, exclusões ou o próprio modelo precisam ser revistos.

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento e relação com o modelo publicado

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, quantitativa e metodológica, desenvolvida por simulação computacional. O objeto não é uma amostra de empresas, mas o comportamento probabilístico de uma equação de precificação quando suas entradas são

tratadas como variáveis aleatórias. A unidade de análise é cada iteração simulada do preço de venda.

O estudo utiliza como ponto de partida o modelo publicado por Müller Neto e Souza (2026). A relação entre os trabalhos é declarada de forma expressa: o artigo anterior desenvolveu a arquitetura determinística; o presente artigo não apresenta essa arquitetura como contribuição original, mas executa a extensão probabilística indicada entre as limitações e pesquisas futuras. Os valores mais prováveis do cenário foram mantidos apenas para permitir comparação direta com o preço-base de R\$16.699,41.

Não houve coleta de dados primários, pesquisa de mercado ou acesso a registros contábeis de escritórios. Os limites, probabilidades e correlações foram construídos como premissas didáticas. Consequentemente, os resultados possuem validade interna apenas para o cenário formulado e não devem ser interpretados como honorários recomendados, distribuição setorial ou evidência de desempenho preditivo.

3.2 Formulação probabilística

Para cada iteração s , o custo técnico das horas é calculado pela soma do produto entre as horas técnicas HT e o custo horário da capacidade prática CHP de cada categoria profissional j . A estrutura conserva o princípio do custeio baseado em tempo, no qual o consumo da capacidade é determinado pelo tempo exigido e pelo custo unitário da capacidade disponibilizada (Kaplan; Anderson, 2004).

$$CTH_s = \sum (HT_{j,s} \times CHP_{j,s})$$

Os dois eventos residuais são simulados por uma variável de ocorrência O , com valores zero ou um, multiplicada por um impacto I amostrado de uma distribuição triangular. O custo de risco da iteração corresponde à soma dos eventos efetivamente materializados.

$$R_s = O_{1,s} \times I_{1,s} + O_{2,s} \times I_{2,s}$$

A base de custos da iteração reúne o custo técnico, os custos diretos e o custo dos riscos. Não se incluiu custo operacional específico adicional porque, como no cenário-base publicado, a estrutura recorrente foi considerada incorporada ao CHP .

$$BC_s = CTH_s + CD_s + R_s$$

Tributos T e margem M foram mantidos fixos em 8,65% e 15%, respectivamente, porque representam decisões ou condições definidas no cenário, não incertezas operacionais. O preço de cada iteração foi calculado por dentro, mantendo-se $T + M < 1$.

$$PV_s = BC_s \div [1 - (T + M)]$$

Essa escolha separa propagação de incerteza e decisão comercial. Caso regime tributário ou margem também sejam incertos, suas distribuições poderiam ser incorporadas; contudo, a variação do denominador alteraria a interpretação e deveria ser sustentada por hipóteses específicas. O PMI (2020) recomenda que premissas, métodos e bases de estimativa sejam documentados de forma consistente com a informação disponível.

3.3 Premissas e distribuições de entrada

A Tabela 1 apresenta as distribuições contínuas. Os modos reproduzem o exemplo determinístico publicado; mínimos e máximos são premissas novas, assimétricas à direita, formuladas para representar maior possibilidade de consumo adicional de horas do que de redução. Os custos horários variam em intervalos menores, coerentes com a hipótese de que a capacidade prática é conhecida com maior estabilidade do que o esforço do escopo.

Tabela 1 – Distribuições ilustrativas das horas, custos horários e custos diretos

Entrada	Distribuição	Mín.	Modo	Máx.	Unidade
Horas – engenheiro civil sênior	Triangular	16	20	28	h
Horas – engenheiro civil	Triangular	36	44	58	h
Horas – projetista/BIM	Triangular	30	36	48	h
Horas – coordenação administrativa	Triangular	6	8	12	h
Entrada	Distribuição	Mín.	Modo	Máx.	Unidade
CHP – engenheiro civil sênior	Triangular	170	180	195	R\$/h
CHP – engenheiro civil	Triangular	100	110	120	R\$/h
CHP – projetista/BIM	Triangular	65	70	78	R\$/h
CHP – coordenação administrativa	Triangular	50	55	60	R\$/h
Custos diretos	Triangular	450	600	900	R\$

Fonte: elaboração dos autores (2026). Valores exclusivamente hipotéticos; os modos das horas e do CHP reproduzem o cenário de Müller Neto e Souza (2026).

Os eventos da Tabela 2 foram mantidos conceitualmente compatíveis com o artigo-base, mas seus impactos passaram a variar. A probabilidade de cada evento foi aplicada

por sorteio de Bernoulli; quando o evento não ocorreu, seu custo foi zero. Quando ocorreu, o impacto foi amostrado entre mínimo, modo e máximo.

Tabela 2 – Eventos residuais utilizados na simulação

Evento	Prob.	Impacto	Mín. (R\$)	Modo (R\$)	Máx. (R\$)
Inconsistência não detectável nos dados de entrada	30%	Triangular	900	1.500	2.600
Interferência técnica incerta com revisão complementar	20%	Triangular	800	1.500	2.400

Fonte: elaboração dos autores (2026). Premissas exclusivamente hipotéticas.

As horas das três categorias técnicas receberam correlação positiva de 0,50 entre si, enquanto as horas de coordenação administrativa receberam correlação de 0,25 com cada categoria técnica. A premissa representa o efeito compartilhado de alterações na definição do escopo: um aumento do trabalho de engenharia tende a produzir aumento de modelagem e coordenação. As demais entradas foram amostradas independentemente. Como os coeficientes não provêm de dados reais, foi executado também um cenário contrafactual com horas independentes.

A correlação foi imposta por cópula normal: vetores normais multivariados foram transformados em probabilidades uniformes e, em seguida, nas marginais triangulares especificadas. Essa construção separa as marginais da estrutura de dependência e introduz associação monotônica entre as horas, conforme a lógica de cópulas descrita por Nelsen (2006). O procedimento não pretende estimar causalidade e deve ser substituído por correlações e estruturas de dependência calibradas com dados históricos quando houver apontamento de horas por contrato.

Para aplicação empírica, recomenda-se um protocolo de calibração em duas etapas. Primeiro, dados de contratos comparáveis devem ser estratificados por disciplina, porte, fase e maturidade do escopo, evitando misturar populações heterogêneas. Segundo, lacunas devem ser complementadas por elicitação estruturada, com definição operacional do mínimo, do valor mais provável e do máximo, identificação do especialista, registro da evidência e revisão por pares (O'Hagan *et al.*, 2006). No presente estudo, esse protocolo é apenas recomendado, pois as faixas permanecem deliberadamente hipotéticas.

3.4 Execução, indicadores e verificação

Foram executadas 100.000 iterações com semente pseudoaleatória 20260824. Em cada iteração, mostraram-se horas, custos horários, custos diretos, ocorrências e impactos; calcularam-se CTH, R, BC e PV; e armazenou-se o resultado. A quantidade de iterações foi verificada comparando-se P50, P80 e P90 em amostras cumulativas de 1.000 a 100.000 execuções.

Os resultados foram descritos por média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação e percentis. O nível P80 foi interpretado como o valor sob o qual se situam 80% das saídas simuladas, condicionado às premissas. Calculou-se também a proporção de iterações em que o preço excedeu o valor determinístico.

A influência das entradas foi avaliada pela correlação de postos de Spearman entre cada entrada simulada e o preço. O coeficiente é adequado como medida descritiva de associação monotônica e não depende de normalidade. Como algumas horas foram correlacionadas entre si, os coeficientes incorporam influência própria e influência compartilhada; por isso, não devem ser lidos como decomposição causal nem como percentuais de contribuição à variância.

Os cálculos foram implementados em Python 3, com bibliotecas NumPy, SciPy, pandas e Matplotlib. A memória de cálculo preservou a semente, as distribuições e as premissas, permitindo reprodução numérica do cenário. A verificação computacional compreendeu a reprodução do preço determinístico pela equação-base, a estabilidade cumulativa de P50, P80 e P90 e a comparação contrafactual entre horas independentes e correlacionadas. Esses procedimentos verificam a implementação, mas não constituem validação empírica do modelo, distinção necessária segundo Sargent (2013). Não foram realizados testes de hipótese, pois a amostra simulada não representa observações de uma população de empresas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

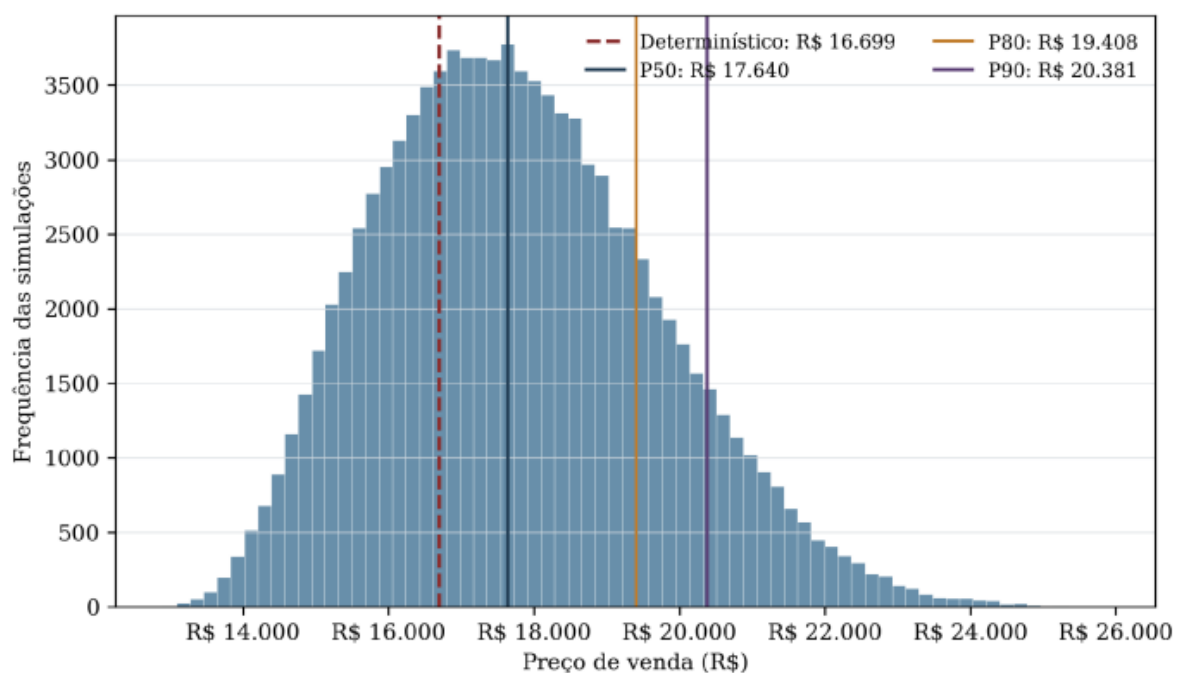
4.1 Distribuição do preço e níveis de confiança

A simulação produziu preço médio de R\$17.783,31 e mediana de R\$17.639,73. A diferença entre média e mediana indica assimetria positiva moderada, decorrente dos limites superiores mais amplos e dos eventos de risco. O desvio-padrão foi R\$1.918,17 e o coeficiente de variação atingiu 10,79%. A Tabela 3 resume os principais indicadores.

Tabela 3 – Indicadores da distribuição simulada do preço de venda

Indicador	Resultado	Interpretação no cenário
Preço determinístico	R\$ 16.699,41	Referência pontual do artigo-base
Média	R\$ 17.783,31	Valor médio das 100.000 iterações
Mediana / P50	R\$ 17.639,73	50% das saídas abaixo ou iguais
Desvio-padrão	R\$ 1.918,17	Dispersão absoluta
Coefficiente de variação	10,79%	Dispersão relativa à média
P10	R\$ 15.388,54	10% das saídas abaixo ou iguais
P80	R\$ 19.407,96	80% das saídas abaixo ou iguais
P90	R\$ 20.380,89	90% das saídas abaixo ou iguais

Fonte: elaboração dos autores (2026), com base em 100.000 iterações e premissas hipotéticas.

Figura 1 – Distribuição simulada e níveis de confiança do preço de venda

Fonte: elaboração dos autores (2026). Valores exclusivamente hipotéticos.

O valor determinístico posicionou-se aproximadamente no percentil 31 da distribuição. Em 68,77% das iterações, o preço necessário foi superior a R\$16.699,41. Esse resultado não prova que o preço-base esteja incorreto; demonstra que, diante das faixas assimétricas adotadas, o valor pontual absorve menos incerteza do que a mediana e os percentuais superiores.

A Figura 1 evidencia que o P50 é 5,63% superior ao preço determinístico, o P80 é 16,22% superior e o P90 é 22,05% superior. Esses acréscimos não constituem percentuais

transferíveis a outros projetos. Eles resultam das distribuições, probabilidades, impactos e correlações específicas do cenário. Alterar os limites ou retirar um evento modifica toda a distribuição.

O P80 de R\$19.407,96 significa que 80% das saídas do modelo ficaram nesse valor ou abaixo e que 20% o excederam. Não significa que o contrato tenha 80% de garantia de sucesso, porque a simulação não inclui alterações deliberadas de escopo, inadimplência, eventos extremos não identificados, erro tributário ou falhas contratuais. O nível de confiança é sempre condicional ao conjunto de riscos modelados (GAO, 2020).

Na prática, o percentil pode orientar uma decisão, mas não substitui a proposta comercial. Um prestador pode adotar um valor próximo ao P50 quando o escopo está maduro e o contrato permite remuneração adicional por mudanças; pode exigir proteção maior quando o escopo é preliminar e o preço é global fixo; ou pode compartilhar a incerteza por etapas, limites de revisão e gatilhos de reequilíbrio. O modelo torna a escolha explícita, sem afirmar que um percentil seja universalmente correto. Essa vinculação entre contingência e nível de confiança é coerente com a abordagem probabilística de Touran (2003), na qual a reserva depende da exposição modelada e da confiança escolhida, e não de um adicional invariável.

4.2 Efeito da dependência entre horas

A hipótese de correlação alterou principalmente a dispersão e a cauda superior. A média permaneceu praticamente estável porque as distribuições marginais não mudaram; entretanto, o desvio-padrão aumentou 14,55% em relação ao cenário de horas independentes. O P90 passou de R\$20.060,65 para R\$20.380,89, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre horas independentes e correlacionadas

Cenário	Média	Desvio-padrão	P50	P80	P90
Horas independentes	R\$ 17.771,92	R\$ 1.674,45	R\$ 17.582,91	R\$ 19.201,59	R\$ 20.060,65
Horas correlacionadas	R\$ 17.783,31	R\$ 1.918,17	R\$ 17.639,73	R\$ 19.407,96	R\$ 20.380,89

Fonte: elaboração dos autores (2026).

O aumento da cauda decorre da maior frequência de variações conjuntas. Quando as horas são independentes, uma categoria pode aumentar enquanto outra diminui, produzindo compensações. Com dependência positiva, condições desfavoráveis de escopo afetam várias categorias na mesma direção. A AACE International (2022) alerta que o tratamento da

correlação se torna mais relevante à medida que aumenta o número de distribuições atribuídas ao modelo.

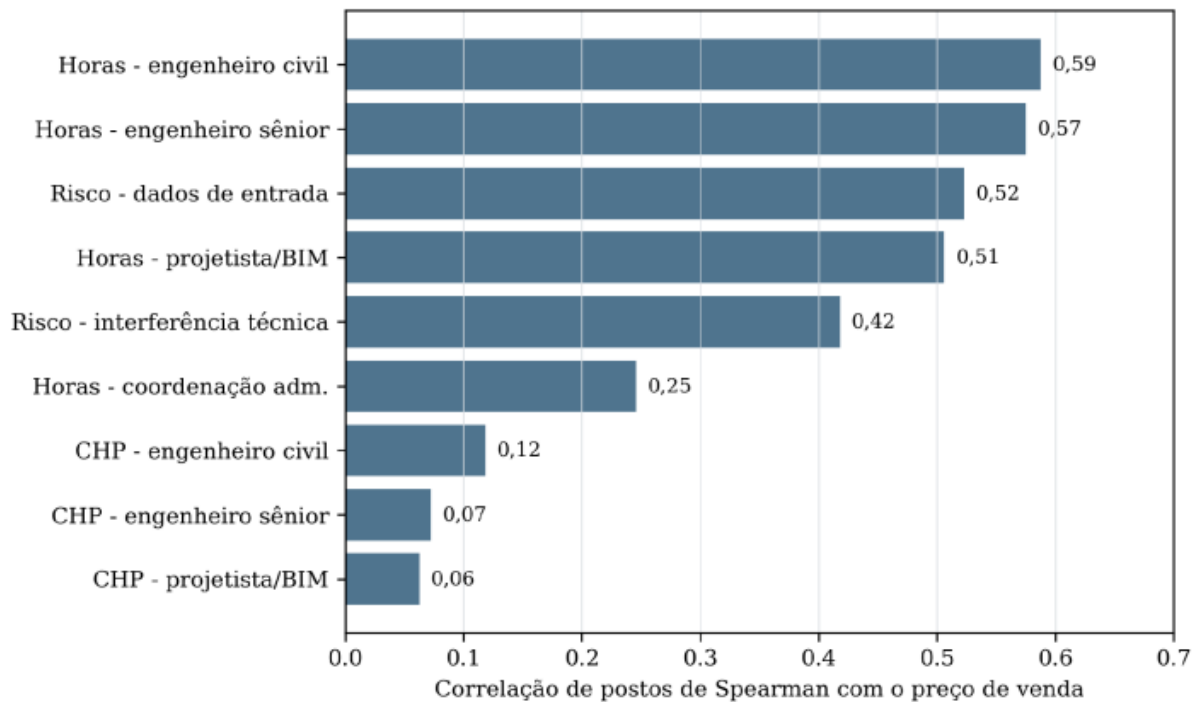
A comparação também mostra que a média, isoladamente, é insuficiente para avaliar o efeito da dependência. Os dois cenários diferem apenas R\$11,39 na média, mas R\$243,72 no desvio-padrão e R\$320,24 no P90. Uma decisão baseada apenas no valor esperado poderia ignorar a ampliação da cauda que interessa aos contratos com baixa tolerância à excedentes. O resultado é compatível com Xu e Gertner (2008), para quem a correlação altera tanto a propagação da incerteza quanto a interpretação da importância das entradas.

A diferença observada também delimita o alcance da cópula normal. Ela permite testar dependência monotônica sem alterar as marginais, mas não demonstra que a dependência real dos serviços de engenharia seja gaussiana. Estruturas com dependência de cauda podem produzir probabilidades de excedência distintas; por isso, modelos orientados a contratos reais devem comparar famílias de cópulas e avaliar aderência, sobretudo quando a decisão se concentra em P90 ou percentis superiores (Torre *et al.*, 2019).

4.3 Entradas de maior influência

A análise por postos indicou maior associação do preço com as horas do engenheiro civil ($\rho = 0,59$), as horas do engenheiro sênior ($\rho = 0,57$), o risco relativo aos dados de entrada ($\rho = 0,52$) e as horas do projetista/BIM ($\rho = 0,51$). O risco de interferência técnica apresentou $\rho = 0,42$. As variações do CHP tiveram influência inferior porque seus intervalos foram deliberadamente mais estreitos.

Figura 2 – Correlação de postos entre entradas e preço simulado



Fonte: elaboração dos autores (2026). Os coeficientes são descritivos do cenário hipotético.

A ordenação não representa importância setorial. Ela depende da amplitude atribuída a cada entrada, do custo horário associado, da probabilidade dos riscos e da correlação entre as horas. Se a faixa do CHP fosse ampliada ou se outro evento fosse incluído, o ranking poderia mudar. Além disso, como as horas técnicas estão correlacionadas, parte da associação de cada categoria com o preço é compartilhada.

Apesar dessas restrições, o diagnóstico é operacionalmente útil. O cenário sugere que o investimento inicial em definição do escopo, estimativa de horas e qualidade dos dados de entrada pode reduzir mais a incerteza do que o refinamento excessivo de parcelas pequenas. Essa interpretação é coerente com a recomendação de direcionar a análise às entradas capazes de alterar materialmente o resultado, sem confundir sensibilidade matemática com causalidade (Saltelli *et al.*, 2019). Em uma validação futura, a correlação de postos deve ser complementada por métodos que distingam contribuição própria e contribuição dependente, como os discutidos por Mara e Tarantola (2012), especialmente se a política de decisão utilizar a sensibilidade para priorizar coleta de dados.

4.4 Aplicação, governança e limitações

A extensão probabilística não elimina a memória determinística. Ao contrário, depende de sua qualidade. Escopo, estrutura analítica do trabalho, categorias, custos de

capacidade, incidências e riscos precisam estar definidos antes da atribuição de distribuições. A simulação aplicada a uma base incompleta apenas propaga omissões com aparência quantitativa.

Para utilização organizacional, cada contrato encerrado deve registrar horas planejadas e realizadas, custos horários vigentes, revisões ordinárias, eventos de retrabalho, mudanças de escopo e margem efetiva. A série histórica permite substituir intervalos subjetivos por distribuições empíricas, testar diferenças entre disciplinas e estimar correlações. Esse princípio é consistente com Koo, Shin e Lee (2017), que utilizaram dados de projetos para decompor horas por serviço, fase e disciplina. O processo também deve distinguir falha de estimativa e serviço adicional: mudanças solicitadas pelo cliente não devem ser absorvidas como variabilidade normal quando o contrato prevê revisão de escopo.

Os percentis podem ser incorporados a uma política de aprovação de propostas. Projetos com escopo maduro e cláusulas claras podem aceitar nível de confiança inferior; projetos com preço fixo, dados frágeis ou elevada criticidade podem exigir percentil superior ou tratamento contratual específico. O nível escolhido, a data-base, as distribuições e as exclusões devem ser registrados para que a margem pretendida não seja confundida com reserva de risco.

Este estudo apresenta seis limitações principais. Primeiro, todos os dados são hipotéticos e não representam mercado. Segundo, as distribuições triangulares simplificam caudas e podem subestimar eventos extremos. Terceiro, a matriz de correlação foi assumida, não estimada. Quarto, a cópula normal não representa dependência de cauda. Quinto, apenas dois eventos discretos foram incluídos e não houve interação entre eles. Sexto, tributos e margem foram mantidos fixos, e o modelo não inclui resposta do mercado, negociação, desconto, inadimplência ou erro de modelo.

A estabilidade numérica não compensa essas limitações substantivas. Entre 25.000 e 100.000 iterações, P50 variou menos de R\$13, P80 menos de R\$30 e P90 menos de R\$19; portanto, a amostra foi suficiente para o cenário computacional. Contudo, aumentar o número de iterações não torna corretos os intervalos de entrada. Como observam Helton *et al.* (2006), a qualidade da análise de incerteza depende tanto da amostragem quanto da caracterização das entradas e da estrutura do modelo.

Pesquisas futuras devem aplicar o procedimento retrospectivamente a contratos concluídos, comparando preço, horas realizadas e margem efetiva. Estudos de caso múltiplos podem calibrar distribuições por disciplina, porte e maturidade do escopo; testes prospectivos podem avaliar a taxa de excedência dos percentis adotados; e métodos globais baseados em

variância podem examinar interações de forma mais rigorosa. A validação deve preservar transparência sobre dados excluídos, alterações contratuais e projetos interrompidos e seguir uma política explícita de uso pretendido, verificação e validação (Sargent, 2013).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo desenvolveu uma extensão probabilística de um modelo rastreável de precificação de projetos de Engenharia Civil, estabelecendo uma contribuição distinta da formulação determinística publicada anteriormente. A simulação converteu horas, custos e riscos em distribuição de preços, permitindo comparar o valor pontual com níveis explícitos de confiança.

No cenário hipotético, o preço determinístico de R\$16.699,41 situou-se aproximadamente no percentil 31 e foi excedido em 68,77% das iterações. A mediana foi R\$17.639,73, o P80 atingiu R\$19.407,96 e o P90, R\$20.380,89. A dependência positiva entre horas ampliou a dispersão e a cauda superior sem alterar materialmente a média, mostrando porque correlações relevantes não devem ser ignoradas.

As horas do engenheiro civil, as horas do engenheiro sênior, o risco associado aos dados de entrada e as horas de modelagem apresentaram as maiores correlações com o preço. O resultado reforça a prioridade da definição do escopo, da estimativa de esforço e da qualidade das informações recebidas. Contudo, os coeficientes descrevem apenas o cenário construído e não constituem parâmetros de mercado.

Conclui-se que a simulação de Monte Carlo pode fortalecer a decisão comercial ao revelar a probabilidade de insuficiência de um preço e ao separar valor-base, variabilidade e eventos contingentes. O método não escolhe automaticamente o preço, não substitui negociação e não legitima adicionais arbitrários. Sua utilidade depende de distribuições documentadas, controle de dupla contagem, dependências justificadas e atualização por dados reais.

A principal continuidade de pesquisa é a validação empírica. Até que sejam incorporados contratos concluídos, o procedimento deve ser apresentado como demonstração metodológica. Essa delimitação preserva a integridade científica, permite citar o modelo anterior como fundamento e estabelece um novo objeto de publicação: não mais a criação da fórmula, mas a quantificação probabilística da incerteza que a fórmula determinística não representa.

REFERÊNCIAS

- AACE INTERNATIONAL. *RP 118R-21: cost risk analysis and contingency determination using estimate ranging for inherent risks with Monte Carlo simulation*. Morgantown, WV: AACE International, 2022. Disponível em: <https://source.aacei.org/2022/11/08/new-aace-recommended-practice-fills-gap-in-quantitative-risk-analysis-maturity-modelnew-rp-118r-21-cost-risk-analysis-and-contingency-determination-using-estimate-ranging-for-inherent-risks/>. Acesso em: 24 ago. 2026.
- CURTO, David; ACEBES, Fernando; GONZÁLEZ-VARONA, José M.; POZA, David. Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves. *International Journal of Production Economics*, v. 253, art. 108626, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108626>.
- GAO. U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. *Cost Estimating and Assessment Guide: best practices for developing and managing program costs*. Washington, DC: GAO, 2020. (GAO-20-195G). Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-20-195g>. Acesso em: 24 ago. 2026.
- HELTON, J. C.; JOHNSON, J. D.; SALLABERRY, C. J.; STORLIE, C. B. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 91, n. 10-11, p. 1175-1209, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.017>.
- IEC. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 31010:2019: risk management – risk assessment techniques*. 2. ed. Geneva: IEC, 2019. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/72140.html>. Acesso em: 24 ago. 2026.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 31000:2018: risk management – guidelines*. 2. ed. Geneva: ISO, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/65694.html>. Acesso em: 24 ago. 2026.
- KAPLAN, Robert S.; ANDERSON, Steven R. Time-driven activity-based costing. *Harvard Business Review*, v. 82, n. 11, p. 131-138, 150, nov. 2004.
- KEEFER, Donald L.; BODILY, Samuel E. Three-point approximations for continuous random variables. *Management Science*, v. 29, n. 5, p. 595-609, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.29.5.595>.
- KOO, Bonsang; SHIN, Byungjin; LEE, Ghang. A cost-plus estimating framework for BIM related design and engineering services. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 21, n. 7, p. 2558-2566, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1808-y>.
- KWAK, Young Hoon; INGALL, Lisa. Exploring Monte Carlo simulation applications for project management. *Risk Management*, v. 9, n. 1, p. 44-57, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.rm.8250017>.
- MARA, Thierry A.; TARANTOLA, Stefano. Variance-based sensitivity indices for models with dependent inputs. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 107, p. 115-121, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.08.008>.
- MÜLLER NETO, Marcos Antonio; SOUZA, Maicon Andersom de. Quanto deve custar um projeto de engenharia? Desenvolvimento de um modelo de precificação baseado em horas técnicas, custos operacionais, complexidade e responsabilidade profissional. *Revista FT*, v. 30, n. 161, p. 1-22, 2026. DOI: <https://doi.org/10.69849/mrxdz926>.

Disponível em: <https://www.revistaft.com/ft/article/view/2061>. Acesso em: 24 ago. 2026.

NELSEN, Roger B. *An introduction to copulas*. 2nd ed. New York: Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-28678-0>.

O'HAGAN, Anthony; BUCK, Caitlin E.; DANESHKHAH, Alireza; EISER, J. Richard; GARTHWAITE, Paul H.; JENKINSON, David J.; OAKLEY, Jeremy E.; RAKOW, Tim. *Uncertain judgements: eliciting experts' probabilities*. Chichester: Wiley, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470033312>.

PMI. PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *Practice standard for project estimating*. 2nd ed. Newtown Square, PA: PMI, 2020. Disponível em: <https://www.pmi.org/standards/for-estimating>. Acesso em: 24 ago. 2026.

SALTELLI, Andrea; ALEKSANKINA, Ksenia; BECKER, William; FENNELL, Pamela; FERRETTI, Federico; HOLST, Niels; LI, Sushan; WU, Qiongli. Why so many published sensitivity analyses are false: a systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, v. 114, p. 29-39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012>.

SARGENT, Robert G. Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v. 7, n. 1, p. 12-24, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>.

SHRIVASTAVA, Narendra K. A model to develop and use risk contingency reserve. In: PMI GLOBAL CONGRESS 2014 – NORTH AMERICA, 2014, Phoenix. *Proceedings [...]*. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2014. Disponível em: <https://www.pmi.org/learning/library/model-risk-contingency-reserve-9310>. Acesso em: 24 ago. 2026.

TORRE, Emiliano; MARELLI, Stefano; EMBRECHTS, Paul; SUDRET, Bruno. A general framework for data-driven uncertainty quantification under complex input dependencies using vine copulas. *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 55, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2018.08.001>.

TOURAN, Ali. Calculation of contingency in construction projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 50, n. 2, p. 135-140, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2003.810824>.

VOSE, David. *Risk analysis: a quantitative guide*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

XU, Chonggang; GERTNER, George Z. Uncertainty and sensitivity analysis for models with correlated parameters. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 93, n. 10, p. 1563-1573, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.06.003>.