

Aplicação de simulação de Monte Carlo para análise de cenários de dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração

Tiago Alves ^{1*} 
Henrique José Avelar ¹ 

Resumo

Este trabalho aborda o desafio do dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração, e a avaliação dos custos operacionais. Utilizou-se simulação de Monte Carlo para gerar cenários de variabilidade em parâmetros operacionais, como tempos de ciclo, distância de transporte e disponibilidade de frota, e análises estatísticas para avaliar o impacto no custo por tonelada lavrada. Os resultados de duas simulações, aplicadas a dados reais, demonstraram que o Cenário 01 (com equipamentos de menor porte) apresentou um custo médio de R\$6,62/ton, significativamente inferior ao Cenário 02 (com equipamentos de maior porte) de R\$8,21/ton, com um nível de confiança de 95%. Este estudo ressalta a importância da análise da variabilidade na tomada de decisão estratégica para otimizar a rentabilidade e oferece uma ferramenta acessível para o planejamento de frotas em mineração.

Palavras-chave: Mineração; Dimensionamento de frota; Estatística; Monte Carlo.

Application of Monte Carlo simulation for scenario analysis in fleet sizing for loading and hauling operations in mining

Abstract

This work addresses the challenge of fleet sizing for loading and hauling in mining, and the evaluation of operational costs. Monte Carlo simulation was used to generate variability scenarios for operational parameters, such as cycle times, hauling distance, and fleet availability, alongside statistical analyses to assess the impact on the cost per ton mined. The results from two simulations, applied to real data, demonstrated that Scenario 01 (with smaller-sized equipment) presented an average cost of R\$6.62/ton, significantly lower than Scenario 02 (with larger-sized equipment) at R\$8.21/ton, with a 95% confidence level. This study emphasizes the importance of variability analysis in strategic decision-making to optimize profitability and offer an accessible tool for fleet planning in mining.

Keywords: Mining; Fleet sizing; Statistic; Monte Carlo.

1 Introdução

No setor de mineração, os investimentos frequentemente ultrapassam centenas de milhões de dólares, resultando em elevado capital imobilizado em ativos. Nesse contexto, a otimização dos gastos e investimentos é essencial para garantir a viabilidade econômica do empreendimento [1]. Dentre os principais componentes de custo, os equipamentos de carregamento e transporte respondem por aproximadamente 60% das despesas operacionais em uma mina [2], o que reforça a importância de um dimensionamento eficiente e tecnicamente fundamentado.

O mercado dispõe de diversas ferramentas e metodologias para a elaboração de estudos de dimensionamento de frotas,

como modelos de simulação computacional, lógica fuzzy [3], o método AHP (*Analytical Hierarchy Process*) [4] e softwares especializados. Porém, muitas dessas soluções apresentam limitações de acesso, seja por seu alto custo, aplicação restrita a etapas específicas do processo produtivo ou dificuldades de usabilidade por parte dos usuários.

Diante disso, este trabalho propõe uma ferramenta acessível e intuitiva, com rotinas automatizadas, capaz de compor cenários de dimensionamento de frotas e realizar análises comparativas em uma única plataforma. Para demonstrar a aplicação da metodologia, foram analisados dois cenários distintos de dimensionamento desenvolvidos com

¹Centro Federal de Educação Tecnológica, Araxá, MG, Brasil.

*Autor correspondente: tiago.alves@mail.com
E-mails: hjavelar@cefetmg.br



2176-1523 © 2025 Alves et al. Publicado pela ABM. Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

a mesma abordagem, mas com equipamentos de diferentes portes. A comparação dos resultados foi realizada por meio de simulação com o método de Monte Carlo [5], permitindo o tratamento estatístico das variáveis envolvidas e fornecendo suporte robusto à tomada de decisão.

O dimensionamento adequado de uma frota tem início com a definição das premissas no planejamento de lavra. Devem ser considerados fatores econômicos, operacionais, ambientais e de segurança, buscando o melhor desempenho em produtividade com o menor custo possível [6]. É no plano de produção que se identificam os principais parâmetros que influenciam na escolha dos equipamentos, como volume de material a ser movimentado, distância de transporte, características do material, perfil topográfico, tipos de materiais, entre outros. No entanto, mesmo com dados bem definidos, existem incertezas associadas à variabilidade do processo [7]. Assim, o uso de simulações permite comparar alternativas de forma mais realista. Por meio da introdução de parâmetros variáveis, a simulação representa incertezas com maior fidelidade, gerando uma base de dados adequada para análises estatísticas conclusivas [8].

2 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se um extenso banco de dados de sistemas de despacho, manutenção e telemetria de frota, obtido a partir de diversas empresas atuantes em operações de mina a céu aberto. Os dados foram anonimizados com o objetivo de preservar a confidencialidade das informações fornecidas. Apesar disso, os dados mantêm a representatividade necessária para refletir as condições reais do processo produtivo.

Esse banco de dados foi utilizado como base para estimar os parâmetros de produtividade dos equipamentos, horas efetivamente trabalhadas, e custos de referência, servindo de entrada para a modelagem e simulação dos cenários analisados. As principais variáveis consideradas na precificação do minério lavrado incluíram: tempo fixo do ciclo produtivo de operação dos equipamentos, distância média de transporte, velocidade média, carga transportada por ciclo, disponibilidade física e utilização da frota.

Para o tratamento estatístico dos dados, foram calculadas a média e o desvio-padrão das variáveis.

Também foram realizados testes de normalidade para verificar a aderência à distribuição gaussiana, validando sua aplicação. A inclusão do valor de aquisição dos equipamentos garantiu uma visão mais abrangente do impacto financeiro de cada cenário.

A análise comparativa foi conduzida com base em dois cenários predefinidos, que diferem quanto ao porte dos equipamentos.

O dimensionamento das frotas foi realizado com base na metodologia clássica de cálculo de produtividade do par de equipamentos (carregamento e transporte), conforme práticas consolidadas na engenharia de minas.

As simulações de variabilidade no custo foram conduzidas por meio do método de Monte Carlo, utilizando parâmetros estatísticos obtidos a partir do plano de produção da Tabela 1. Essa abordagem permitiu a análise probabilística dos custos, fornecendo uma base consistente para a tomada de decisão frente às incertezas do processo.

2.1 Dimensionamento de frotas

O dimensionamento das frotas foi realizado com base em dois cenários, compostos por pares de equipamentos de diferentes portes, para comparar seus desempenhos operacionais e econômicos. Nos cenários, a quantidade de equipamentos foi determinada a partir dos índices de horas trabalhadas e da produtividade horária, com a mesma quantidade de horas calendário.

2.1.1 Cálculo de horas trabalhadas

As horas trabalhadas (HT) foram obtidas a partir da decomposição das horas calendário (HC) e das horas de manutenção (HM). Considerou-se um período de cinco anos, com regime de operação (24 h/dia), totalizando 43.800 horas calendário por equipamento. As HT foram calculadas utilizando os indicadores de disponibilidade física (DF) e utilização física (UF), conforme as Equações 1 e 2 respectivamente:

Tabela 1. Plano de produção

Período	Material	Massa (ton)	Distância (Km)	Material	Massa (ton)	Distância (Km)
2025	Minério	47,363,636	3.31	Estéril	12,945,476	1.70
2026	Minério	26,831,455	2.83	Estéril	10,352,017	2.81
2027	Minério	46,115,478	2.39	Estéril	21,716,760	3.74
2028	Minério	52,606,700	3.26	Estéril	32,489,664	4.48
2029	Minério	55,823,428	2.27	Estéril	31,555,054	5.05
2030	Minério	56,054,399	2.38	Estéril	26,926,099	5.40
2031	Minério	51,090,305	2.05	Estéril	26,441,912	6.08
2032	Minério	50,732,460	2.15	Estéril	26,311,981	5.10
2033	Minério	50,550,380	2.55	Estéril	25,780,251	6.27
2034	Minério	50,359,362	1.89	Estéril	25,912,970	5.81
2035	Minério	50,173,865	2.05	Estéril	26,295,978	5.97

$$\frac{DF = HC - HM}{HC} \quad (1)$$

$$UF = \frac{HT}{HC - HM} \quad (2)$$

Assim, as horas trabalhadas são representadas pelo produto das horas calendário, disponibilidade física e utilização física.

$$HT = HC \times DF \times UF \quad (3)$$

2.1.2 Cálculo de produtividade horária

A produtividade horária dos equipamentos foi calculada considerando a compatibilidade entre carregamento e transporte. Buscando maior eficiência, considerou-se que o carregador deve completar a carga do caminhão em três a cinco ciclos. O ciclo de carregamento inclui: deslocamento vazio, escavação e enchimento da concha, deslocamento cheio e descarga no caminhão. O tempo total de carregamento depende da densidade do material, volume da concha, taxa de enchimento, e capacidade do caminhão. Esse tempo afeta a produtividade horária dos dois equipamentos, justificando sua avaliação conjunta. A forma de cálculo da produtividade horária dos equipamentos de carregamento e transporte foi estratificada conforme Equações 4 e 5:

$$PH_{Transporte} = \frac{CargaMédia}{\left(\frac{DMT \times 2}{Velocidade} + \frac{TempoFixo}{60} \right)} \times (1 - HTNE) \quad (4)$$

Onde:

PH Transporte: é a produtividade horária da frota de transporte. É a produção que os equipamentos realizam por hora trabalhada, na unidade de toneladas por hora (ton/h). Carga Média: é a capacidade de carga que os equipamentos de transporte irão transportar a cada ciclo na unidade de toneladas (ton).

DMT: é a distância média de transporte entre os pontos de origem e destino do transporte na unidade de quilômetros (km). Velocidade: é a velocidade média de deslocamento dos equipamentos de transporte entre os pontos de origem e destino de transporte, na unidade de quilômetros por hora (km/h).

Tempo Fixo: são os tempos que compõem o ciclo de trabalho do equipamento, que não variam conforme a velocidade ou distância de transporte. São os tempos de manobra na carga e descarga, o tempo de carregamento, e o tempo de descarga, na unidade de minutos (min).

HTNE: são as horas trabalhadas não efetivas. É o percentual de perda de produtividade composto pelas horas trabalhadas não produtivas apresentado em percentual (%). Nas bases de dados dos sistemas de despacho analisadas este percentual contempla as horas trabalhadas não produtivas e horas trabalhadas de atraso operacional como por exemplo filas na carga e descarga.

$$PH_{Carga} = \frac{CargaMédia}{Tempo de Ciclo Total de Carregamento 60} \times (1 - HTNE) \quad (5)$$

Onde:

PH Carga: é a produtividade horária da frota de carga. É a produção que os equipamentos realizam por hora trabalhada na unidade de toneladas por hora (ton/h).

Carga Média: é a capacidade de carga que os equipamentos de transporte irão transportar a cada ciclo na unidade de toneladas (ton).

Tempo de Ciclo Total de Carregamento: é o tempo total entre o início de um carregamento e o próximo carregamento. Neste estão considerados os tempos de carregamento e o tempo de troca/manobra do equipamento de transporte na unidade de minutos (min).

HTNE: são as horas trabalhadas não efetivas. É o percentual de perda de produtividade composto pela soma das horas trabalhadas não produtivas em percentual (%). Nas bases de dados dos sistemas de despacho analisadas este percentual contempla as horas trabalhadas não produtivas e horas trabalhadas de atraso operacional. Encontram-se nessa categoria ocorrências como aguardando caminhão, limpeza de praça, segurança de taludes, entre outros.

2.1.3 Cálculo da quantidade de equipamentos

A quantidade de equipamentos necessária foi calculada dividindo-se a movimentação planejada pela capacidade de cada equipamento, conforme Equação 6:

$$Quantidade \ de \ Equipamentos = \frac{Movimentação \ Planejada}{Produtiv. \ Horária \ do \ Equipamento \times HT \ do \ equipamento} \quad (6)$$

2.2 Composição de gastos

A composição dos gastos dos cenários foi realizada considerando os fatores abaixo:

Valores de Aquisição da Frota: foram considerados valores de mercado para equipamentos novos. O Estudo contempla o valor da depreciação anual dos equipamentos no período de estudo analisado, sendo o valor de aquisição do equipamento dividido pela sua vida útil.

Gasto com Diesel: foi considerado um valor unitário para o litro diesel, multiplicado pela quantidade de diesel necessária. A quantidade de diesel necessária foi calculada multiplicando-se a quantidade de horas trabalhadas necessárias pela taxa horária de consumo dos equipamentos. Os manuais indicam uma faixa de consumo associada à aplicação (fator de carga do motor), mas neste trabalho foi considerado o consumo realizado pelos equipamentos conforme dados cedidos pelas empresas do setor de mineração.

Gasto de Manutenção: foram considerados gastos médios de manutenção por hora trabalhada do equipamento.

Estes gastos foram apurados nas informações obtidas nos bancos de dados cedidos pelas empresas de mineração, e contemplam lubrificantes, peças, pneus, serviços e mão de obra de manutenção. O gasto total de manutenção foi calculado multiplicando-se a quantidade de horas trabalhadas pelo valor horário de manutenção.

Gasto com Equipe de Operação: foram considerados os índices de absenteísmo/ausência das equipes, quantidade de equipamentos, quantidade de turmas/regime de trabalho, disponibilidade física da frota e valor anual estimado para os cargos. O valor anual também foi estimado com base em valores de mercado informado nas bases de dados cedidas pelas empresas de mineração. O gasto total contempla as equipes considerando as posições operacionais, de gestão e administrativas.

A variável de resposta avaliada no estudo foi o custo minério lavrado em cada cenário. Para tanto, foram considerados os gastos totais para cumprimento da movimentação total do plano de produção do período, divididos pela quantidade de minério lavrado no mesmo plano. Não foram considerados outros gastos indiretos nesta composição de custos.

Foram elaborados dois cenários de dimensionamento de frotas e composição de custos conforme os procedimentos apresentados acima, considerando os equipamentos de carregamento e transporte mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários de dimensionamento de frotas

	Cenário 01	Cenário 02
Equipamento de Carga	Escavadeira Hidráulica CAT374F	Escavadeira Hidráulica CAT 390D
Equipamento de Transporte	Caminhão Scania G440	Caminhão CAT 775G

Tabela 3. Variáveis preditoras

Sigla	Variável
ATR.CG	Atraso do Ciclo de Carregamento (%)
ATR.TR	Atraso do Ciclo de Transporte (%)
CG.MD	Carga Média (ton)
DF.CG	Disponibilidade Física de Carregamento (%)
DF.TR	Disponibilidade Física de Transporte (%)
DMT	Distância Média de Transporte (km)
HTNP.CG	Hora Trabalhada não Produtiva de Carregamento (%)
HTNP.TR	Hora Trabalhada não Produtiva de Transporte (%)
T.CG.MN	Tempo de Carregamento (min)
T.FX.TR	Tempo Fixo de Transporte (min)
UF.CG	Utilização Física de Carregamento (%)
UF.TR	Utilização Física de Transporte (%)
VEL	Velocidade Média de Transporte (km/h)

Tabela 4. Sumário do modelo obtido por regressão múltipla

Cenário	S	R2	R2(aj)	R2(pred)
Cenário 01	0.0596803	98.37%	98.37%	98.37%
Cenário 02	0.0742007	98.20%	98.20%	98.20%

Foram realizadas vinte mil simulações nos cenários, variando-se o tempo fixo, distância de transporte, velocidade média de transporte, carga média, disponibilidade física e utilização física de frota.

As simulações foram realizadas variando simultânea e aleatoriamente os índices dos fatores selecionados, utilizando o Microsoft Excel®, com a fórmula INV.NORM.N (ALEATÓRIO();“média”;“desvio padrão”).

Esta fórmula retorna o inverso da distribuição cumulativa normal para a média específica e o desvio-padrão, apresentando um panorama geral de uma rotina de operação.

Com os dados das simulações procedeu-se a uma regressão linear múltipla, obtendo-se um modelo matemático relacionando as variáveis preditoras e o custo do minério lavrado (variável resposta). Com o modelo de regressão linear múltipla pôde-se, a partir da tabela de ANOVA, mensurar a contribuição percentual de cada variável preditora no custo do minério lavrado, o que nos apresenta quais variáveis mais influenciam no processo. Com as bases de dados da simulação dos dois cenários foi possível também realizar o teste-t para duas amostras, validando se as médias são estatisticamente distintas dentro de um determinado intervalo de confiança.

De modo a facilitar a composição das informações nos gráficos, foram utilizadas algumas siglas para identificar as variáveis preditoras conforme a Tabela 3.

3 Resultados e discussões

A partir dos dados das simulações, utilizando-se a ferramenta Minitab, foram realizadas as análises estatísticas para realização da validação dos dados e comparação entre os resultados.

Na Tabela 4 são apresentados os dados do sumário do modelo obtido a partir da análise de regressão múltipla.

O percentual apresentado em R2 demonstra o quanto das variações do modelo são explicadas pelas variáveis preditoras que o compõe, sendo que os altos valores apresentados indicam uma robusta capacidade de predição do modelo.

A partir da regressão múltipla também foi possível obter as equações das regressões dos cenários que permitem a simulação dos resultados, variando os índices conforme o desvio padrão utilizado montagem da base de dados simulados.

As equações de regressão são apresentadas na Tabela 5.

A ANOVA traz várias grandezas estatísticas interrelacionadas, porém serão destacados apenas alguns resultados de ordem prática e que aqui são importantes. Os resultados dos cenários analisados são apresentados na Tabela 6, juntamente com o Valor-P das variáveis preditoras que demonstram influência na variável resposta.

Tabela 5. Equações dos cenários para simulação

Equação de Regressão	
Cenário 01	Custo =
	8.7714 + 0.6214 UF.TR + 1.7559 DF.TR + 4.214 HTNP.TR + 3.089 ATR.TR - 0.189273 CG.MD- 0.109566 VEL + 0.78488 DMT + 0.16382 T.FX.TR - 2.3097 UF.CG - 1.6896 DF.CG+ 4.3212 HTNP.CG + 2.9841 ATR.CG + 1.73855 T.CG.MN
Cenário 02	Custo =
	11.4580 + 2.1083 UF.TR + 2.5497 DF.TR + 4.93 HTNP.TR + 0.89 ATR.TR - 0.125790 CG.MD- 0.155254 VEL + 0.93968 DMT + 0.17239 T.FX.TR - 4.0715 UF.CG - 3.0501 DF.CG+ 5.4069 HTNP.CG + 3.9632 ATR.CG + 1.47025 T.CG.MN

Nota-se que no Cenário 02, a variável de Atraso no Ciclo de Transporte se mostrou não significativa para o modelo a nível de 5% de significância, devido aos valores utilizados na simulação.

Também através do Minitab foram gerados os sumários gráficos dos cenários 1 e 2, resumidos na Figura 1, com a estratificação da variável resposta. Destacam-se as médias e intervalos de confiança que validam estatisticamente a diferença entre as médias.

O teste-t para duas amostras, apresentado na Figura 2, é conclusivo na constatação da real diferença de custo entre os cenários de frota conforme as premissas adotadas. Para o cenário analisado conclui-se que, a um nível de confiança de 95%, o custo por tonelada de cada cenário se difere entre 1,57 e 1,59 R\$/ton, sendo o cenário 01 o de menor custo.

Tabela 6. Tabelas ANOVA dos cenários analisados

Análise de Variância Cenário 01					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	13	4301.12	330.855	92891.52	0.000
UF.TR	1	2.77	2.766	776.52	0.000
DF.TR	1	20.93	20.929	5876.16	0.000
HTNP.TR	1	0.09	0.089	25.08	0.000
ATR.TR	1	0.05	0.047	13.23	0.000
CG.MD	1	713.12	713.124	200218.06	0.000
VEL	1	102.54	102.544	28790.48	0.000
DMT	1	168.68	168.678	47358.42	0.000
T.FX.TR	1	28.11	28.113	7892.99	0.000
UF.CG	1	33.90	33.903	9518.62	0.000
DF.CG	1	20.71	20.712	5815.07	0.000
HTNP.CG	1	31.56	31.562	8861.54	0.000
ATR.CG	1	16.18	16.180	4542.60	0.000
T.CG.MN	1	158.97	158.971	44632.94	0.000
Erro	19986	71.18	0.004		
Total	19999	4372.30			
Análise de Variância Cenário 02					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	13	6004.87	461.913	83896.51	0.000
UF.TR	1	31.39	31.388	5700.87	0.000
DF.TR	1	31.18	31.181	5663.33	0.000
HTNP.TR	1	0.12	0.120	21.78	0.000
ATR.TR	1	0.00	0.004	0.72	0.395
CG.MD	1	177.69	177.691	32273.75	0.000
VEL	1	168.54	168.541	30611.91	0.000
DMT	1	241.62	241.622	43885.46	0.000
T.FX.TR	1	32.72	32.721	5943.00	0.000
UF.CG	1	105.76	105.756	19208.34	0.000
DF.CG	1	45.24	45.241	8217.06	0.000
HTNP.CG	1	49.08	49.083	8914.80	0.000
ATR.CG	1	28.58	28.580	5190.87	0.000
T.CG.MN	1	251.37	251.372	45656.34	0.000
Erro	19986	110.04	0.006		

Relatório Resumo Para Custo

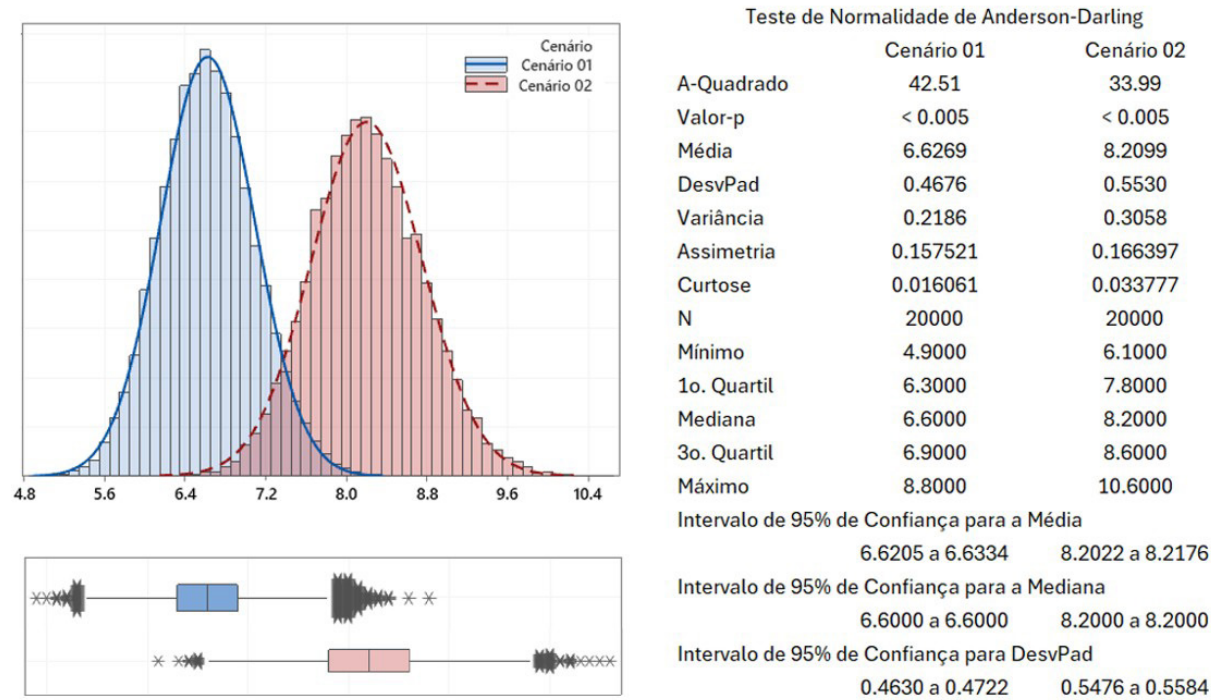


Figura 1. Sumário gráfico do cenário 01.

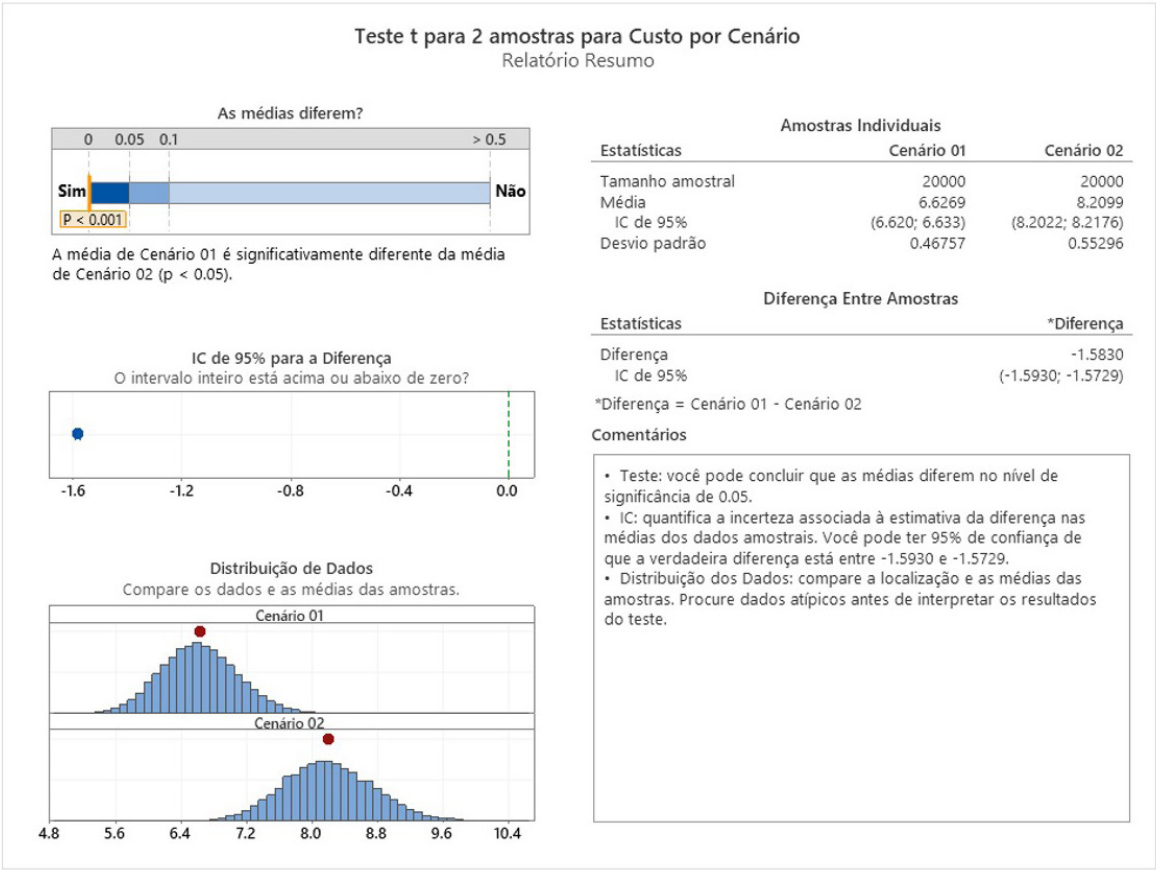


Figura 2. Resultado do teste-t para duas amostras para Custo por Cenário.

4 Conclusão

Este estudo demonstrou a aplicabilidade e a eficácia da simulação de Monte Carlo como uma metodologia robusta para o dimensionamento e a análise comparativa de frotas de carregamento e transporte em operações de mineração a céu aberto. Ao abordar a intrínseca variabilidade dos parâmetros operacionais, o trabalho forneceu uma base numérica e estatisticamente sustentada para a tomada de decisões estratégicas, superando as limitações de abordagens determinísticas.

Os resultados obtidos a partir da simulação de vinte mil iterações, utilizando dados reais de operações de minas, revelaram uma distinção clara entre os cenários propostos. O Cenário 01, caracterizado pelo uso de equipamentos de menor porte, apresentou um custo médio por tonelada lavrada de R\$6,62, significativamente inferior ao R\$8,21/tonelada observado no Cenário 02, que empregou equipamentos de maior porte. A análise estatística, corroborada pelo

teste-t para duas amostras, confirmou esta diferença como estatisticamente significativa (entre R\$1,57 e R\$1,59 por tonelada, com 95% de confiança), validando a importância da escolha do porte da frota para a rentabilidade do negócio.

A principal contribuição deste trabalho reside na validação de uma ferramenta acessível e intuitiva que integra a simulação estocástica e a análise estatística para o planejamento de frotas. Esta abordagem permite que profissionais da mineração avaliem os impactos da incerteza nos custos operacionais e definam estratégias mais resilientes, otimizando o retorno sobre o investimento e a performance geral da operação.

Para pesquisas futuras, recomenda-se investigar a integração de outros fatores de risco, como flutuações de mercado e eventos não planejados, na simulação. Além disso, a exploração de modelos de otimização e o desenvolvimento de uma interface de usuário mais interativa para a ferramenta podem ampliar ainda mais seu potencial de aplicação prática e científica.

Referências

- 1 Borges TC. Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2013.
- 2 Miranda-Junior IS. Diretrizes fundamentais para um estudo de avaliação econômica de empreendimentos de mineração: um estudo bibliográfico [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2011.
- 3 Bozorgebrahimi E, Hall RA, Blackwell GH. Equipment size effects on open pit mining performance. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2003;112:93-171.
- 4 Bascetin A, Oztas O, Kanli AI. A new development software for equipment selection in mining engineering. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2006;106:16-44.
- 5 Rubinstein RY, Kroese DP. Simulation and the Monte Carlo Method. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2007.
- 6 Jesus L. Dimensionamento de equipamentos de mina e custos operacionais. São Paulo: Baraúna; 2013.
- 7 Amaral M. Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto [dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.
- 8 Andrade EL. Introdução a pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisões. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos; 2004.

Recebido em: 21 Abr. 2025

Aceito em: 21 Jun. 2025

Editor responsável:

André Carlos Silva 