

USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL A EVENTOS DISCRETOS PARA DETERMINAR A FROTA ÓTIMA DE CAMINHÕES EM MINERAÇÃO

Luis Henrique Nery Januario ¹
Júlio César de Souza ²

Resumo

Este trabalho investiga o uso da simulação computacional a eventos discretos com o software ProModel, como ferramenta de apoio a tomada de decisão quanto ao dimensionamento da frota e utiliza para o estudo os dados da Mineração Civil Ltda., empresa de agregados para construção civil. O desenvolvimento do trabalho seguiu a metodologia tradicional de simulação dinâmica, como a definição do problema, coleta de dados, criação do modelo, validação e execução. O critério de validação considerado foi a comparação da produção real com a simulada, considerando um erro tolerável de 5%. O modelo validado permitiu simular vários cenários com diferentes números de caminhões e avaliar o sistema quanto ao tamanho da frota, eficiência do britador e os critérios do regime operacional. Foi possível verificar que a menor frota que permite maximizar o britador se compõe de 3 caminhões e que o modelo pode ser utilizado para dimensionar e maximizar qualquer sistema de carregamento e transporte, mudando apenas os dados operacionais.

Palavras-chave: Carregamento e transporte; Frota de caminhões; Simulação; Teste qui-quadrado.

USE OF COMPUTATIONAL SIMULATION TO DISCRETE EVENTS TO DETERMINE THE GREAT FLEET OF MINING TRUCKS

Abstract

This work investigates the use of computational simulation to discrete events with the software ProModel, as a tool to support decision making regarding the truck fleet dimensioning and uses the data from Civil Mineração Ltda., a company of aggregates for civil construction. The development of the work followed the traditional methodology of dynamic simulation as problem definition, data collection, model creation, validation and execution. The validation criterion considered was the comparison of the actual production with the simulated one, considering a tolerable error of 5%. The validated model allowed us to simulate several scenarios with different numbers of trucks and to evaluate the system in terms of fleet size, crusher efficiency and operational criteria. It was possible to verify that the smallest fleet that allows to maximize the crusher consists of 3 trucks and that the model can be used to dimension and to maximize any system of loading and transport, changing only the operational data.

Keywords: Loading and transport; Fleet of trucks; Simulation; Chi-square test.

I INTRODUÇÃO

A primeira aplicação das técnicas de simulação foi na área militar, tendo como objetivo principal o planejamento através de linguagens formais, como o Fortran e Pascal, Gavira [1].

Para que as empresas de mineração mantenham as finanças equilibradas, sobretudo em época de crise política

e econômica, além da expertise dos gestores, é importante incluir na gestão programas que visem a redução de custos. Essa necessidade de barateá-lo propicia e estimula o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas ferramentas e métodos que auxiliem a tomada de decisão no planejamento das operações de mineração.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Laboratório de Planejamento de Lavra – LAPLA, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. E-mail: luishneryj@gmail.com

²Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil.



Segundo Pinto et al. [2] trabalhos de extração mineral são caracterizados por serem atividades de alto custo de investimento, em que o processo de tomada de decisão possui uma elevada complexidade devido às características estocásticas do sistema.

Nas empresas de pequeno porte e pedreiras, é comum a ausência de ferramentas de análise e planejamento de lavra que ajudem a melhorar a performance, utilização e disponibilidade da frota. Erros no dimensionamento e alocação dos equipamentos podem levar a empresa a superestimar ou subestimar a frota de equipamentos, o que pode gerar diminuição de produtividade e aumento de custos.

Seguindo esta linha, fez-se necessário criar um modelo computacional no ProModel que fosse capaz de reproduzir os dados originais de produção da mina e de determinar o número ótimo de caminhões que permitisse um maior aproveitamento do britador primário e conseqüentemente maior produtividade de modo a proporcionar redução de custos.

A criação do modelo seguiu as fases tradicionais de modelamento com seis passos básicos, como consta em Law e Kelton [3]:

- Definição dos objetivos do estudo;
- Coleta dos dados;
- Criação e verificação do modelo de simulação;
- Determinação da duração da simulação;
- Validação da performance do modelo;
- Análise dos resultados e sua apresentação

A validação do modelo foi realizada com os dados brutos dos tempos e movimentos dos caminhões, pois a intenção da validação era verificar se a modelagem podia representar o sistema real, dentro de uma tolerância aceitável. O dimensionamento ocorrerá na última etapa, ou seja, após a validação do modelo e com os dados brutos ajustados. Segundo Barbosa [4], os dados brutos não representam os tempos normais do ciclo operacional (taxas de probabilidades maiores que 40%), por sofrerem influências das diversas condições de operação na mina. Essas interferências presentes nos dados poderiam comprometer os resultados para realizar o dimensionamento, se não se procedesse ao ajuste estatístico dos dados.

De acordo com Bernasek e Shwiff [5] um modelo é considerado válido se a média de produção simulada estiver dentro do erro tolerável de até 5%, em relação a produção real. Para fins de validação do modelo, escolheu-se arbitrariamente o mês de maio/2014 cuja produção real da britagem primária na Pedreira foi de 35.382,0 t e o processamento efetivo do britador 154,5 horas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletados na empresa entre 42 a 46 dados brutos de tempos de ciclos, por cronometragem, para os caminhões CB 04, CB 05 e CB 06 durante o período de dezembro de 2016 a março de 2017, divididos em 6 elementos de ciclos e o tempo de processamento do britador primário.

Os dados foram introduzidos no programa ProModel para a realização do teste χ^2 , no intuito de obter a curva de distribuição padrão de maior aderência para representar os dados. Este teste serve para avaliar quantitativamente a relação entre o resultado de um experimento e a distribuição esperada para o fenômeno. Isto é, ele nos diz com quanta certeza os valores observados podem ser aceitos como regidos pela teoria em questão. A Tabela I mostra as distribuições padrão com maior aderência aos dados do caminhão CB 04 e suas respectivas expressões matemáticas. Essas expressões representam as funções densidade de distribuição padrão que o ProModel irá utilizar a título de reconhecimento estocástico do tempo. Por exemplo, o programa irá entender que o carregamento do caminhão leva um tempo segundo uma distribuição normal cuja média é 2,84 min e desvio padrão de 0,83 min.

De fato, como pode ser notada, a curva de distribuição de probabilidade padrão representada pela Lognormal é a de melhor aderência aos dados de entrada (input) dos elementos *subida* e *manobra carregada* (Figura 1).

2.1 Construção do Modelo

O modelo foi construído selecionando os seguintes elementos:

Locais: um elemento fixo de para representar o britador primário e o local de lavra;

Entidades: representa a “rocha fragmentada” a ser transportada pelo caminhão até o britador;

Tabela I. Expressão matemática para os elementos de ciclo do caminhão CB 04

Elementos do ciclo	Distribuição	Expressão matemática
Subida	Lognormal	$I.+L(2.03, 1.4)$
Manobra carrg.	Lognormal	$L(0.493, 8.24e-002)$
Descarga	Lognormal	$L(0.583, 0.273)$
Descida	Lognormal	$I.+L(1.45, 0.97)$
Manobra descg	Lognormal	$L(0.791, 0.312)$
Carregamento	Normal	$N(2.84, 0.833)$

Variável: calcular a produção e processar lógicas para controlar as filas de caminhões representada por *var 1* e *2*.

Comandos: comando “*inc*” para quantificar o material britado, “*Graphic*” para mudar as posições dos caminhões, “*wait until*” para controle de fila dos caminhões durante o carregamento e descarga e “*wait*” para processamento do britador. O tempo que o britador leva para processar o material é em média 5,0 min.

Recurso: utilizou-se como recurso 03 caminhões para transportar o material da lavra até o britador. A tonelagem efetiva por ciclo de cada caminhão foi obtida, considerando a eficiência de 83,0% e as disponibilidades mecânicas operacionais de cada equipamento:

- Caminhão CB 04 (t/ciclo): 17,59
- Caminhão CB 05 (t/ciclo): 12,73
- Caminhão CB 06 (t/ciclo): 18,51

Processos: Neste modelo, a entidade “rocha fragmentada”, que se encontra no local “lavra”, espera os caminhões para carregá-los. O carregamento leva os tempos segundo as expressões matemáticas de distribuição (carregamento). Os caminhões carregados transportam a entidade até o britador primário por um período de tempo, também, descritos pelas curvas de distribuição (tempo de subida), descarrega e retorna ao local “lavra”. A Figura 2 mostra o fluxograma típico do processo.

2.2 Validação do Modelo

Foram realizadas 10 replicações para a simulação com duração de 154,50 horas (horas reais trabalhadas do britador). Com os resultados da produção simulada construiu-se a tabela de frequência a fim de calcular a média e verificar o erro em relação à produção real. A Figura 3 mostra a execução do modelo e as produções simuladas.

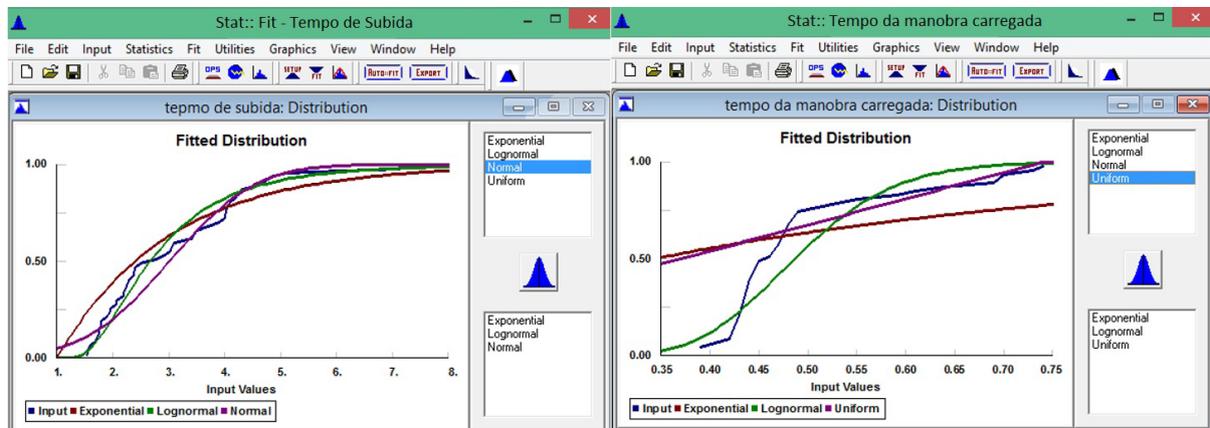


Figura 1. Curvas de distribuição acumulada dos tempos input e padrão dos elementos subida e manobra carregada (CB 04).

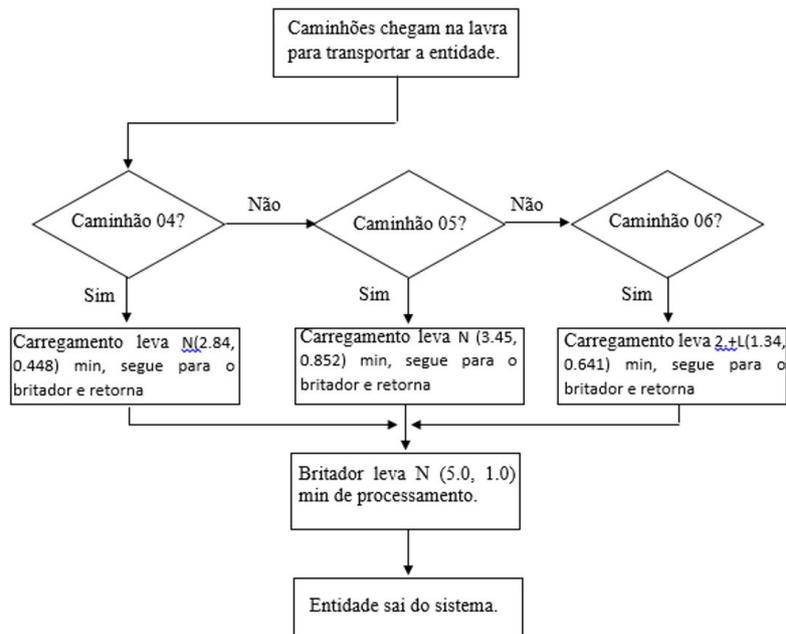
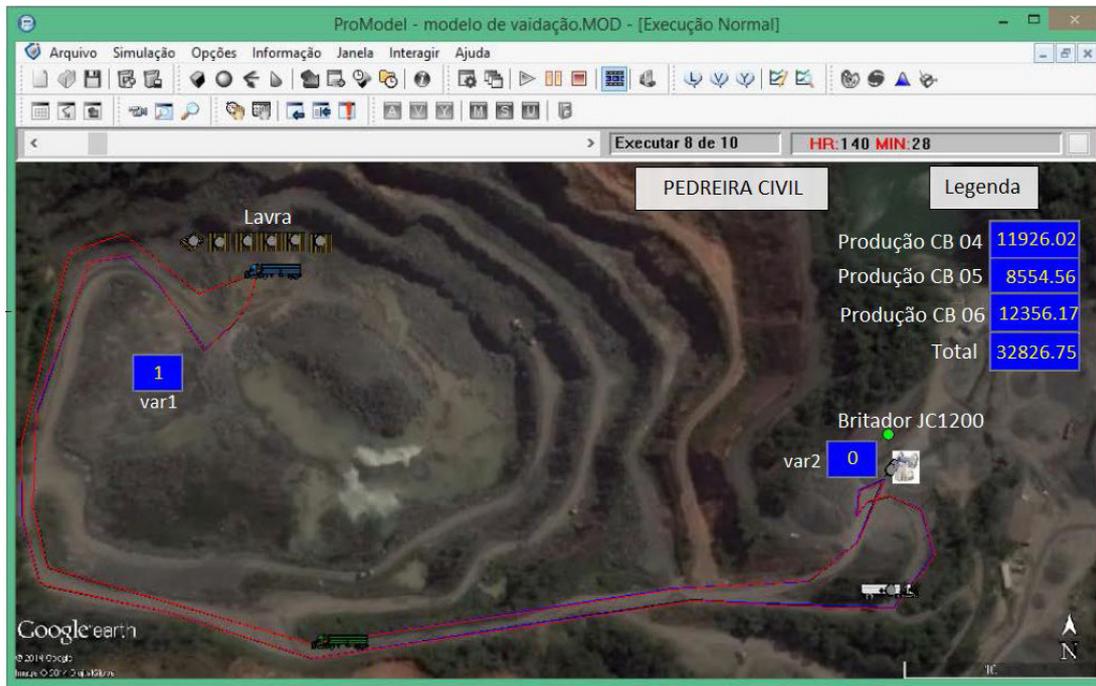


Figura 2. Fluxograma típico do modelo.



Replicações	Produção (t)
1	36255,99
2	36208,75
3	36195,35
4	35886,87
5	35950,02
6	35876,65
7	35446,9
8	36098,36
9	35962,76
10	36071,3

Figura 3. Execução do modelo e resultados da produção simulada.

A tabela de frequência foi construída levando em consideração nível de confiança de 95% e (n-1) grau de liberdade obtendo-se *t* de *student* 2,262, que permitiu calcular a média e erro (36.008,77 t e 1,77%), dentro da tolerância de 5%.

Mesmo que os trabalhos de simulação tenham sido bem conduzidos, não há possibilidade de validação absoluta, ou seja, existem circunstâncias do sistema real, que podem acontecer e que não foram previstas no simulador.

O principal objetivo da validação, já que não existe fórmula que ajude a se concluir se o modelo é ou não válido, seria o de se determinar a utilidade do modelo ou não. Desta forma se o modelo atende aos objetivos que foram propostos, mesmo que não tenha semelhança absoluta com o sistema real que foi simulado, o modelo será útil e vai dar respostas que ajudem nas tomadas de decisões. Segundo Law e Kelton [3], é preferível se considerar o quanto o

modelo está de acordo com o sistema modelado, do que se referir à sua absoluta validade ou invalidade.

2.3 Ajustes dos Tempos

Segundo Barbosa [4], a taxa de probabilidade é um parâmetro que mede a eficiência de transporte, calculada como a relação entre a amplitude e a média aritmética dos tempos de ciclos.

Entende-se que os principais motivos pelos quais se elevaram as taxas de probabilidade foram fatores operacionais como as constantes buscas dos caminhões por materiais para “forrar” (espalhar material terroso no piso da mina para nivelar o piso) a praça; paradas dos equipamentos durante o percurso decorrentes de falhas mecânicas; demora em descarregar no britador, espera na fila durante o carregamento etc.

Para evitar o comprometimento dos resultados da simulação para a realização do dimensionamento da frota, será considerado um sistema no qual os problemas citados acima serão minimizados por meio de ajustes estatísticos. É uma maneira de se fazer o controle tomando como referência a taxa de probabilidade, que deve ser menor ou igual a 40%.

O processo consiste na exclusão de dados utilizando-se duas regras:

- 1 - Excluem-se os tempos que são maiores ou iguais ao dobro e/ou menores ou iguais a metade da média aritmética;
- 2 - Aplica-se, na ausência da regra 1, a exclusão dos tempos que mais se afastarem da média aritmética.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA SIMULAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados das simulações de quatro diferentes situações analisadas que divergem entre si no tocante as seguintes características: tempos de ciclos, capacidade efetiva por ciclo e número de caminhões basculantes utilizados. Na realização destas simulações, o tempo de processamento variou em função dessas características.

A simulação computacional do modelo, em cada uma das situações analisadas, termina quando o britador primário conclui o processamento de 3.000,0 t (produção padrão requerida da planta de beneficiamento para cada turno de trabalho de 9,0 horas).

Nota-se que o tempo de turno de 9 h é atendido quando o modelo é simulado utilizando-se três ou quatro

caminhões basculantes. Fazendo-se uso de um ou dois caminhões basculantes o tempo de processamento na simulação ultrapassa o tempo requerido por turno de 9,0 horas, além da redução da taxa de utilização (Tabela 2).

Portanto, é notável que dispendo de uma frota de caminhões maior do que dois, o tempo de processamento da simulação para obter a produção de 3.000,00 t e a utilização do britador se mantém próximos, ou seja, o sistema atinge um estágio no qual a produtividade é maximizada. Por outro lado, quando a operação é realizada com dois caminhões já se percebe uma mudança nessas variáveis (redução da utilização e expressivo aumento do tempo de processamento) que se eleva quando a operação passa a ser realizada com um caminhão apenas. Logo o número ótimo de caminhões deve ser aquele do estágio de produtividade máxima que demanda da menor frota, ou seja, 03 caminhões (Figura 4). Este número corresponde exatamente àquele atualmente disposto na configuração de trabalho da Mineração Civil Ltda.

4 CONCLUSÕES

A simulação computacional do modelo foi capaz de determinar a frota ótima de caminhões que maximiza a utilização do britador em função do tempo adequado de turno de trabalho e de prever os impactos de produção e econômicos no sistema quando o número da frota for alterado. Dessa forma, tem-se uma visão global do carregamento e transporte, sendo possível selecionar o número de caminhões, respeitando as restrições operacionais como horas de turno e produção diária-mensal.

O modelo computacional permite viabilizar uma configuração na qual se proporcione menores custos com o transporte, visto que não há necessidade de se ter 4 caminhões na mina para realizar o transporte de minério pois a frota de três atinge o estado ótimo de produtividade.

Futuramente, quando a distância média de transporte ou os ciclos operacionais aumentarem com o avanço da mina, o modelo poderá ser utilizado para estudar a possibilidade da aquisição de mais caminhões.

O modelo é aplicável a quaisquer frotas de carregamento e transporte, independente do seu porte e volume de produção, bastando alterar as expressões matemáticas, originadas da base de dados, representados pelos valores de tempo e movimentos dos caminhões basculantes, para realizar o dimensionamento da frota.



Figura 4. Representação gráfica do número de caminhões em função da utilização do britador primário.

Tabela 2. Resultado do Relatório da simulação

Opção	Nº de caminhões	Capacidade	Tempo de simulação (h)	Utilização do britador (%)
A	1	30,0 t	24,32	50,41
B	2	30,0 t	12,15	97,63
C	3	2 (30,0) e 1 (24,0 t)	8,95	98,90
D	4	3 (30,0) e 1 (24,0 t)	8,80	98,88

REFERÊNCIAS

- 1 Gavira MO. Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento [dissertation]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2003.
- 2 Pinto LR, Saliby E. Simin – Sistema para simulação a eventos discretos utilizando Borland Deplhi. Anais do 3º Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha; dezembro, 1999; Escola de Guerra Naval (EGN). Rio de Janeiro: SPOLM; 1999.
- 3 Law AM, Kelton W. Simulation modeling and analysis. 1st ed. New York: Mc Graw-Hill; 1982.
- 4 Barbosa FJ. Representatividade da Amostra nos Estudos de Impactos Ambientais. In: Anais do 3º Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e disposição de Resíduos – REGEO'95; 1995 Ouro Preto: UFOP/ABGE/ABMS/CBGB. Vol. II, p. 665-679.
- 5 Bernasek A, Shwiff S. Gender, Risk and Retirement. Journal of Economic Issues. 2001;35(2):345-356.

Recebido em: 17 Ago. 2017

Aceito em: 30 Abr. 2018