ROGER ROSA SILVA GONÇALVES

Simulação de lavra como ferramenta de gerenciamento operacional na mineração subterrânea de pequeno porte

São Paulo
2021

ROGER ROSA SILVA GONÇALVES

Simulação de lavra como ferramenta de gerenciamento operacional na mineração subterrânea de pequeno porte.

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de Março de 2021

Assinatura do autor: Roger Rosa Silva Gonçalves

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Gonçalves, Roger Rosa Silva
Simulação de lavra como ferramenta de gerenciamento operacional na mineração subterrânea de pequeno porte / R. R. S. Gonçalves -- versão corr. -- São Paulo, 2021.
86 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.SIMULAÇÃO DINÂMICA NA MINERAÇÃO (PLANEJAMENTO DE LAVRA; EXEQUIBILIDADE DO PLANO) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado me apoiando e dando força para superar os desafios.

Ao Prof. Giorgio de Tomi, pela sua orientação e apoio durante a elaboração desta dissertação.

Aos meus amigos Ranyere Sousa e Erbertt Barros, e a todos os colegas do NAP.Mineração/USP por todo apoio recebido durante o período em que trabalhei no laboratório.

A Profª. Ana Carolina Chieregati por todo incentivo, apoio e atenção dada ao longo do tempo em que passei no Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo/EPUSP. Agradeço a Deus por sempre estar do meu lado, me dando forças nos momentos difíceis.

RESUMO

A utilização de simulação dinâmica no planejamento de lavra possibilita maior aderência e acurácia de lavra aos planos elaborados, podendo promover mudanças na visão de empresas sobre a gestão diária da operação da mina. Custo de aquisição, treinamento e coleta de dados são os principais motivos apresentados pelas empresas, principalmente de pequeno/médio porte, de não utilizarem a simulação dinâmica. No entanto, o avançar das tecnologias de coleta de informações e de modelagem tem resultado na redução desses custos. Além disso, os ganhos gerados por um planejamento preciso e acurado podem ser maiores que os custos. O objetivo desta pesquisa foi validar o plano de lavra por meio da aplicação da simulação dinâmica para analisar o sistema de transporte de uma mina subterrânea de metais não-ferrosos, localizada no estado de Minas Gerais, bem como os atuais procedimentos de coleta do empreendimento. Foram levantadas informações operacionais como os indicadores de desempenho nas frentes de desenvolvimento produtivo, no período de três meses. A operação de transporte da mina foi simulada em plataforma especializada e foi possível conhecer pontos críticos do sistema produtivo, bem como propor soluções, validando o plano de lavra em confronto com os dados simulados.

Palavras-chave: Simulação dinâmica na mineração; Validação do plano de lavra; Mina subterrânea.

ABSTRACT

The use of dynamic simulation in the mining planning allows greater assertiveness and accuracy of the mining plan, which can promote changes in the vision of companies on the daily management of mine operation. Cost of acquisition, training and data collection are the main reasons presented by companies, mainly small / medium sized companies, not to use dynamic simulation. However, costs have been falling in recent decades with the advancement of information gathering and modeling technology. In addition, the gains from assertive and accurate planning can outweigh the costs. The present study is based on the application of dynamic simulation in an underground non-ferrous metal mine located in the northwest of Minas Gerais, in order to validate the mining plan. Operational information was collected as the performance indicators on the productive development fronts for three months. The methodology of current mining collection was also analyzed. In order to improve the indicators and methodology that are calculated, we used the simulation of the unit operations of the productive development plan in a specialized platform. It is expected that from the simulation it is possible to know more about the system, critical points and propose solutions, allowing to validate the mining plan in comparison with the simulated data and to suggest adjustments in the execution of the operations.

Keywords: Dynamic simulation in mining; Validation of the mining plan; Underground mine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de um sistema de processamento de correspondência..... 18
Figura 2: Demonstração do uso de valores médios..... 20
Figura 3: Complexidade e aplicabilidade da simulação..... 21
Figura 4: Metodologia de simulação..... 36
Figura 5: Procedimento para análise e modelagem por meio da simulação..... 39
Figura 6: Identificação da distribuição estatística ou probabilística..... 46
Figura 7: Futuro modelo de mina com operação autônoma..... 57
Figura 8: Layout de mina do futuro e suas principais particularidades..... 59
Figura 9: Modelo conceitual para aplicação do modelo proposto..... 62
Figura 10: Modelo de simulação..... 64
Figura 11: Boxplot dos dados originais referentes à quantidade de toneladas transportadas por viagem pelos caminhões..... 66
Figura 12: Boxplot dos dados após tratamento referente à quantidade de toneladas transportadas por viagem pelos caminhões..... 67
Figura 13: Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de dezembro..... 70
Figura 14: Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de janeiro..... 71
Figura 15: Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de fevereiro..... 72
Figura 16: Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 1..... 76
Figura 17: Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 2..... 77
Figura 18: Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 3..... 77
Figura 19: Análise da utilização física para os 3 cenários avaliados..... 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Histórico de produção da mina: Dezembro, Janeiro e Fevereiro..... 69
Tabela 2: Análises estatísticas referentes ao mês de Dezembro..... 70
Tabela 3: Análises estatísticas referentes ao mês de Janeiro..... 71
Tabela 4: Análises estatísticas referentes ao mês de Fevereiro..... 72
Tabela 5: Cenários e objetivos 73
Tabela 6: Comparativo entre as movimentações simuladas em cada cenário e as movimentações planejadas para o Mês 4..... 78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 Objetivo 9
1.2 Questões de pesquisa 11
2 REVISÃO DA LITERATURA 12
2.1 Simulação 12
2.2 Classificação dos modelos de simulação 16
2.2.1 Modelo de simulação determinística ou estocástica 16
2.2.2 Modelo simulação com tempo discreto ou tempo contínuo 16
2.2.3 Modelo de simulação de estado discreto ou estado contínuo 17
2.2.4 Modelo de simulação de tempo invariante ou variante 17
2.3 Quando utilizar a simulação 17
2.4 Vantagens e desvantagens de utilização da simulação 22
2.5 Aplicação da simulação computacional na mineração 25
2.6 Simulação da operação de lavra 31
2.7 Etapas de um estudo de simulação 35
2.8 Modelagem dos dados de entrada 41
2.8.1 Coletas dos dados 43
2.8.2 Tratamento dos dados 44
2.8.3 Inferência 45
2.9 Componentes básicos de um modelo de simulação 47
2.10 O software arena 52
2.11 Simulação a eventos discretos 54
2.12 Internet das coisas na mineração 56
3 CASO DE APLICAÇÃO 60
4 METODOLOGIA 62
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 74
5.1. CENÁRIOS 1 e 2- Verificação da movimentação de material com quatorze caminhões, sete equipamentos de carregamento, um ponto de descarga na PDE e um no britador 74
5.2. CENÁRIO 3- Verificação da movimentação de material com dezesseis caminhões, sete máquinas de carregamento, um ponto de descarga na PDE e um ponto no britador 74
6 CONCLUSÕES 79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81

1 INTRODUÇÃO

A aplicação da técnica de simulação à eventos discretos torna possível que se tenha uma ideia preliminar dos resultados a serem obtidos caso o plano de lavra previsto venha a ser executado. Dessa forma, a sua aplicação pode ser usada para contornar conflitos evidenciados e auxiliar na tomada de decisão pela gerência de planejamento.

Segundo Martins (2013), a simulação é uma técnica muito utilizada, isto por ser caracterizada como uma ferramenta clara, poderosa e moldável, essencialmente devido a potencialização da capacidade de processamento dos computadores e softwares, que permitem o estudo de sistemas vistos como complexos.

Muitas vezes, é trabalhoso efetuar estudos físicos com determinados sistemas específicos, devido a aspectos financeiros e operacionais, como por exemplo alterar a configuração de uma técnica de fabricação de uma companhia para verificar os resultados obtidos a partir dessa mudança. Para tal situação, a aplicação de um modelo de simulação torna-se fundamental, uma vez que o mesmo permite testar diversos cenários, com intuito de avaliar o comportamento do sistema quando ocorre mudanças nas variáveis de um problema.

A simulação de processos industriais obteve um papel de destaque desde que as empresas passaram a fazer uso da computação como ferramenta de suporte à tomada de decisão com o simples objetivo de alcançar melhorias em suas atividades. Isto se deve ao fato da mesma ser vista como uma fonte de benefícios em competitividade apta a analisar os processos, aperfeiçoá-los e possivelmente colocá-los em execução.

Segundo Sturgul (2000), engenheiros de minas tem se interessado cada vez mais em usar computadores para construir modelos de simulação de operações de mineração desde que o computador foi introduzido e aceito por essa indústria.

Assim como os demais setores da indústria, o setor mineral busca continuamente aproveitar ao máximo os recursos disponíveis, isso a partir de processos mais eficazes, instalações modernas, equipamentos mais eficientes, entre outros. Segundo

Crain (1997) em todo o mundo a simulação é aplicada em modelos de processos industriais, para a fabricação, telecomunicações, distribuição, hospitais, logísticas, mineração, entre outros sistemas de filas.

Em sistemas produtivos, quando se leva em consideração aspectos operacionais, a modelagem computacional assegura a concretização de várias atividades ligadas ao processamento industrial. Logo a aplicação de modelos na gestão de modernos sistemas produtivos torna-se algo fundamental.

Diante disso, sob esse contexto, o presente trabalho avalia os desafios em difundir a técnica de simulação de lavra em pequena mineração subterrânea, os ganhos a serem obtidos em competitividade e produção, assim como análise da inserção de tecnologias modernas sob o conceito de mineração conectada e inteligência artificial alcançadas nos últimos anos.

O foco da pesquisa é dado no sistema de transporte da mina em estudo, onde a partir de um plano de lavra mensal são designadas as restrições operacionais e as massas a serem movimentadas em cada mês. Onde busca-se avaliar a máxima capacidade produtiva a partir da simulação e verificação do histórico de movimentações de minério e estéril. Contribuindo com a potencialização da produção e competitividade, sob a perspectiva do gerenciamento operacional de lavra.

Entretanto, nota-se que existe uma lacuna entre a operação de mina e o planejamento de lavra, isto por conta dos desvios verificados entre as produções realizadas e programadas.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a exequibilidade do plano de movimentação de massas por meio de simulação dinâmica, no âmbito da mineração de pequeno porte.

A partir desses propósitos, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar um modelo de simulação computacional que caracterize o desempenho produtivo do sistema em escala real, buscando identificar ineficiências no desempenho e corrigi-los a fim de aumentar a produção da mina;

- Realizar comparações com os resultados obtidos a partir do modelo do sistema em ambiente real com o histórico de movimentações executadas na mina, para validação do modelo de simulação;

- Avaliar 3 cenários de movimentação de material, com o intuito de ampliar a produção atual da mina, aumentar a utilização dos equipamentos de transporte e prever a capacidade produtiva do sistema;

- Pesquisar os possíveis desafios em difundir o uso da simulação de lavra e validar a sua aplicação na pequena mineração;

O tema é relevante porque:

- Existem desafios de aplicar a simulação como uma ferramenta diária na operação de lavra, devido ao pouco conhecimento de metodologias voltadas a modelagem de lavra, além de aspectos financeiros e operacionais;

- Existe uma ampla competitividade entre as empresas no mercado de negócios, muitas destas optam por largar esse setor por conta de decisões tomadas de forma equivocada, as quais na grande maioria das vezes mostram-se otimistas, mas não retratam a realidade. Geralmente devido a seleção e escolha incorreta da técnica para auxílio na tomada de decisão;

- Permite avaliar vários cenários futuros da operação de lavra antes que este seja aplicado em ambiente real, além de identificar inconsistências de dados;

- Não existem estudos inerentes a simulação de lavra em pequenas minerações.

1.2 Questões de pesquisa

O trabalho busca responder as seguintes questões:

- A simulação de lavra pode ser utilizada na pequena mineração? E quais são os desafios para a sua disseminação?

- Como melhorar os índices de produtividade e competitividade utilizando simulação de lavra na pequena mineração?

- Como incorporar os desenvolvimentos tecnológicos do século XXI no dia-dia da simulação de lavra?

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo sumariza os aspectos inerentes a modelagem e simulação, bem como sua aplicação na indústria de mineração.

2.1 Simulação

Segundo Marin (2009), pode-se dizer de maneira geral que a simulação reproduz uma determinada operação ou um método em ambiente real, sendo possível a partir dessa avaliar várias estratégias de execução.

Conforme Law e Kelton (2010), os sistemas do mundo real é muito complexo em sua grande maioria para que seja possível que modelos realistas sejam estudados de forma analítica, assim esses modelos precisam ser avaliados através de simulação computacional.

Ainda segundo os autores se categoriza sistemas para serem de dois tipos, os discretos e contínuos. Os sistemas discretos são caracterizados por as variáveis de estado alterarem rapidamente em pontos separados no tempo. Um exemplo clássico de um sistema discreto, seria um banco, onde as variáveis de estado, por exemplo, a quantidade de clientes no banco só altera quando um cliente chega ou quando parte. Em um sistema contínuo, as variáveis de estado variam sem interrupção, ou seja, de forma contínua em relação ao tempo. O avião se movimentando pelo ar seria um exemplo de um sistema contínuo, já que as variáveis de estado do sistema, como posição e velocidade, podem variar constantemente em relação ao tempo. Na prática poucos sistemas são absolutamente discretos ou contínuos, mas como um tipo de mudança predomina para a maioria dos sistemas, normalmente é possível classificar um sistema como sendo discreto ou contínuo.

Para Chwif e Medina (2010), a técnica de simulação é capaz de ser dividida em dois grandes grupos, em computacional e não-computacional, onde a primeira necessita de computadores para ser executada, e a última, como o próprio nome indica, dispensa essa necessidade, como por exemplo, protótipo em escala reduzida.
Usualmente inúmeros textos clássicos inerentes a simulação apresentam uma série de definições do que se trata a simulação. Chwif e Medina (2010), a fim de não tornar

as coisas repetitivas fizeram uma apresentação diferente do que é a simulação, discutiram o que não é simulação em vez de defini-la, isso com base no que o senso comum acha sobre a simulação.

- A simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização: A simulação por si só não é uma ferramenta de otimização, com capacidade de identificar uma solução ótima. Na verdade, é uma ferramenta de análise de cenários;
- A simulação não é uma bola de cristal: A técnica simulação não é capaz de adivinhar o futuro, o que ela é capaz de presumir, com certa segurança é o desempenho de um sistema baseado em dados de entradas específicos e respeitando um grupo de premissas;
- A simulação não é um modelo matemático: Não existe um grupo de equações que disponibilizados os valores de entrada, gerem resultados em relação o desempenho do sistema. Não se pode reduzir a técnica de simulação a um simples cálculo ou a uma fórmula matemática;
- A simulação não substitui o pensamento inteligente: a simulação não é capaz, assim como não pode substituir a presença do ser humano durante o processo de tomada de decisão;
- A simulação não é uma técnica de último recurso: A simulação atualmente é uma das técnicas mais aplicadas na Pesquisa Operacional e na Ciência da Administração. Porém no passado era considerada uma técnica de último recurso, quando todas as outras falhassem;
- A simulação não é uma panaceia que irá resolver todas os problemas: Em muitos casos ela não deve ser aplicada. Entretanto se o problema a ser analisado apresentar um nível de complexidade alto, for dinâmico e apresentar aleatoriedade, a simulação é a melhor escolha.

A possibilidade de aplicação da simulação é muito ampla, além de ser um recurso de análise de diversos problemas, permite ter uma melhor compreensão sobre um sistema e auxílio na tomada de decisão.

Law e Kelton (2000), mencionam que as áreas de aplicação para a simulação são numerosas e diversas. Os autores listam abaixo alguns tipos específicos de problemas nos quais a simulação é considerada uma ferramenta útil e poderosa.

- Projeto e análise de sistemas de manufatura;

- Determinar políticas de pedido para um sistema de estoque;

- Projeto de sistemas de comunicação e protocolos de mensagens;

- Projeto e operação de instalações de transporte, como autoestradas, aeroportos, metrôs ou portos;

- Avaliação de projetos para organizações de serviços, como hospitais, agências dos correios ou restaurantes fast food;

- Analisar sistemas financeiros ou econômicos.

Segundo Mosef apud Botter (2002) “a simulação é o processo de elaborar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, como o propósito de compreender o comportamento do sistema, ou avaliar várias estratégias para a operação do mesmo”.

Conforme Miyagi (2002), simulação é compreendida como a reprodução do funcionamento de uma operação ou sistema real e envolve o desenvolvimento de uma “história artificial” de um sistema que não depende necessariamente do uso de computadores para a análise de suas características.

Pereira (2004), comenta que a simulação pode ser usada para estudar sistemas ainda em fase inicial, antes que sejam efetivamente implementados, além de servir como ferramenta para investigar os efeitos provocados a partir de mudanças e avaliar e validar o desempenho de novos sistemas.

A simulação, segundo Pegden et al. (1990), é entendida como um processo amplo que abrange não apenas a construção de modelos, mas todo a técnica experimental, procurando:

- Detalhar o desempeno do sistema;
- Criar teorias e suposições levando em consideração observações efetuadas;
- A partir do modelo prever o comportamento futuro do sistema, ou seja, os impactos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos utilizados em sua operação.

Segundo Knights e Bonates (1999), simulação compreende modelar um problema para possibilitar a experimentação e teste de alternativas e de formas de ação. Isso dá uma ótima visão dos problemas, permitindo soluções ótimas ou quase ótimas, sem a despesa envolvida na experimentação em sistema real, ou seja, é possível testar todas as alternativas existentes antes que um sistema real seja colocado em operação.

Robinson (2004) apud Schmidt (2014), comenta que a simulação é uma abordagem experimental para a modelagem, bem como uma ferramenta de análise, onde usuário entra com os dados (inputs) e o modelo gera cenários com a previsão dos resultados. Logo, o usuário do modelo continua a explorar cenários alternativos até que ele obtenha entendimento necessário ou identifique qual a forma de melhorar o sistema real. Assim, ele obtém um cenário ideal que o auxiliará na tomada de decisões.

De maneira geral, a simulação fornece informações úteis para tomada de decisão, nos mais diversos segmentos e situações, permitindo que estas sejam testadas antes de serem aplicadas em escala real. A técnica tem sido largamente utilizada em: manufatura, manuseio de materiais, sistemas militares, controle de tráfego, treinamento de pilotos e motoristas, sistemas de planejamento e projeto de minas e vários sistemas com forte estrutura de filas (Schmidt,2014).

2.2 Classificação dos modelos de simulação

No mundo real poucos sistemas estão livres da influência de variáveis aleatórias ou imprevisíveis no ambiente. De maneira similar aos modelos em geral os modelos de simulação também podem ser divididos. Algumas das classificações mais importantes estão descritas na sequência (PAGE, 1994; PEGDEN, 1995; LAW e KELTON, 2000).

2.2.1 Modelo de simulação determinística ou estocástica

Modelos de simulação determinístico ignoram a aleatoriedade (não contém componentes probabilísticos), assumindo que essa não é importante para a tomada de decisão. Em modelos determinísticos, a saída é estabelecida quando o conjunto de grandezas de entradas e relacionamento no modelo tiver sido especificado, ou seja, esse modelo possui um conjunto de entradas já conhecidas que resultaram em um único conjunto de saídas. Modelos de simulação estocástico são desenvolvidos a partir uma ou mais variáveis aleatórias como entrada. As entradas produzem saídas aleatórias, um conjunto de possíveis saídas segundo uma determinada distribuição de valores, dessa forma viabiliza somente uma suposição do desempenho real do sistema. Sendo necessária diversas execuções da simulação para a constituição da média simulada dos resultados e fornecer uma estimativa do desempenho do sistema esperado.

2.2.2 Modelo simulação com tempo discreto ou tempo contínuo

Um modelo que descreve alterações no estado do sistema como ocorrendo somente em pontos isolado no tempo, é chamado de discreto. Em um modelo de tempo discreto o tempo corre em saltos. O relógio do modelo prossegue regularmente, deslocando de um tempo para o outro, isto é, quando mudanças de estados ocorre na ocorrência de eventos, como uma central de atendimento telefônico, que tem seu cenário alterado com o evento de chegada de ligações. No modelo com tempo contínuo, o modelo trata da variação temporal de estado como um fenômeno que decorre continuamente no tempo, como o aquecimento de um metal. Nesse tipo de modelo o

tempo é estabelecido para fluir continuadamente, o relógio do modelo prossegue suavemente para valores cada vez maiores.

2.2.3 Modelo de simulação de estado discreto ou estado contínuo

Em modelos de estado discreto, as variáveis assumem um grupo de variáveis discretas. Já em modelos de estado contínuo, os períodos variantes podem ser mostrados pelos números reais ou intervalos deles.

2.2.4 Modelo de simulação de tempo invariante ou variante

Esses modelos são os mais comuns. O modelo é caracterizado como invariante no tempo se as regras de interação forem independentes no tempo, ou seja, seus parâmetros não variam ao longo do tempo. Nos modelos variantes acontece o oposto levando em consideração os modelos invariantes. O tempo pode ser claramente exposto como um fundamento de regra de interação. Como no caso de um sistema de transferência de calor do tipo casco e tubos, onde o coeficiente de transferência térmica entre o casco e o tubo apresentação variação ao longo do tempo.

2.3 Quando utilizar a simulação

Chwif e Medina (2010), apresentam de maneira simples e coerente sobre quando se deve utilizar a simulação. Para isso os autores citam alguns métodos para análise de sistemas:

- Contas de padeiro: se faz pequenos cálculos, baseados geralmente em médias e valores aproximados;

- Planilhas eletrônicas: utilizadas para cálculos mais complexos;

- Métodos da programação matemática e métodos analíticos: se destacam os métodos de otimização (linear, inteira, mista, entre outros) e os métodos analíticos, como teoria das filas. Muitos desses métodos podem ser utilizados por

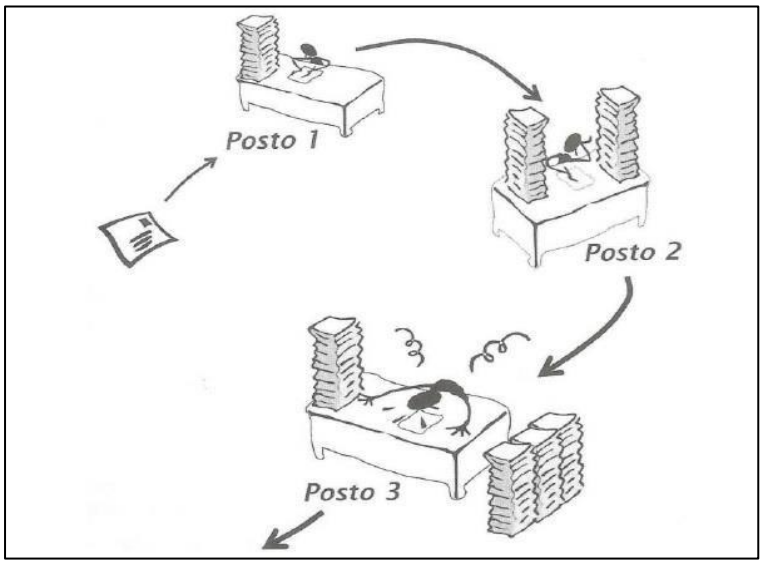
meio de planilhas eletrônicas através da utilização de solvers ou solucionadores apropriados;

- Simulação: é construído um modelo de simulação o qual é implementado a partir de um simulador.

Um “método” muito citado é o “valor arbitrário” ou, como geralmente é chamado, “uma estimativa”, em outras palavras, tomadas de decisão de sistemas complexos com base na intuição e experiência, pode levar a resultados desastrosos em grande parte das vezes.

Para ilustrar os métodos descritos anteriormente, Chwif e Medina (2010) utilizam o sistema de processamento de correspondências, composto por três postos de trabalho, conforme a Figura 1. As chegadas consecutivas de correspondências são exponencialmente distribuídas com tempos como média de 10 minutos. O tempo de processamento no posto 1 foi de 9 minutos em média, com desvio-padrão de 2 minutos, segundo uma distribuição normal. No posto 2, o tempo de processamento segue uma distribuição triangular simétrica, com o menor valor igual 8 minutos e o maior valor igual a 10 minutos. No posto 3 os tempos de processamento são uniformemente distribuídos no intervalo entre 8 e 10 minutos.

Figura 1 - Exemplo de um sistema de processamento de correspondência.



Fonte: CHW IF E MEDINA (2010).

O exemplo tem como propósito descobrir o tempo médio que cada correspondência permanece no sistema, os resultados alcançados para cada método estão descritos na sequência.

- Método de contas de padeiro: tempo total de processamento é de 27. Este método considera apenas as médias e não leva considera a formação de filas nos postos.

- Planilhas eletrônicas: tempo mínimo que a correspondência permanece é de 17 minutos, máximo de 37 minutos e médio de 27 minutos. Este modelo leva em consideração o melhor e a pior situação, e assume a não formação de filas.

- Métodos da programação matemática e métodos analíticos: a partir do uso da Teoria de Filas, o resultado total de espera no sistema foi de 300 minutos. Este considera a formação de fila em série, mas para simplificar, todos os tempos de atendimento são considerados como uma distribuição exponencial (como a taxa de chegada), que dentre as apresentadas é a pior curva em termos de variabilidade (maior coeficiente de variação, razão entre o desvio padrão e a média).

- Simulação: tempo médio total do sistema é de 77 minutos e máximo de 244 minutos. Este modelo considera a variabilidade do sistema como distribuição exponencial nos tempos.

A diferença dos resultados é explicada pelo tratamento dada à variabilidade em cada solução.

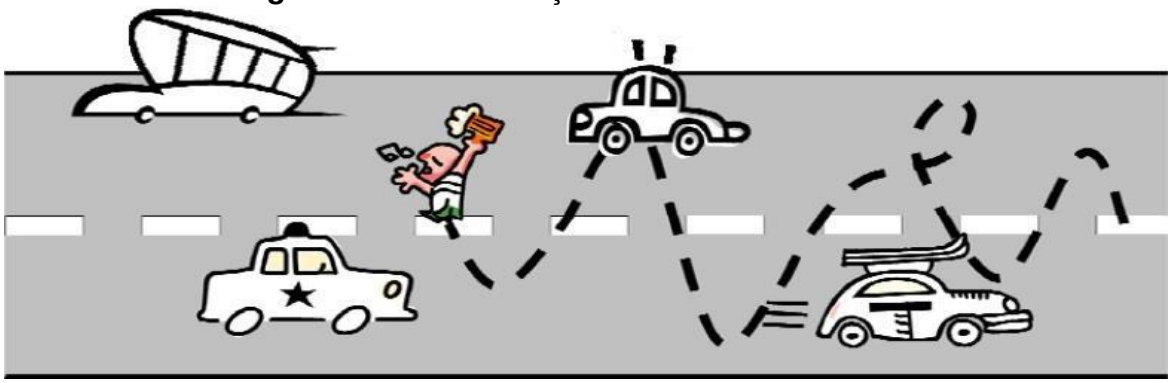
A grande diferença entre os métodos, principalmente entre os métodos das “contas de padeiro” e “planilhas eletrônicas” em relação aos métodos das Teorias das Filas e da simulação é explicada pelo fato de nos dois primeiros métodos ter levado em conta valores médios, que mascara o desempenho real do sistema, ou seja, pelo tratamento dado à variabilidade em cada solução.

A grande diferença entre os métodos, principalmente entre os métodos das “contas de padeiro” e “planilhas eletrônicas” em relação aos métodos das Teorias das Filas e

da simulação é explicada pelo fato de nos dois primeiros métodos ter levado em conta valores médios, que mascara o desempenho real do sistema, ou seja, pelo tratamento dado à variabilidade em cada solução.

A Figura 2 ilustra o perigo das médias: considere um bêbado andando na média sobre o meio fio de uma avenida de mão dupla. De acordo com sua posição “média”, o bêbado está vivo, mas “na média” o bêbado está morto.

Figura 2 - Demonstração do uso de valores médios.



Fonte: CHWIF E MEDINA (2010).

Ainda segundo Chwif e Medina (2010), pode se fazer algumas observações relevantes com relação a aplicabilidade das ferramentas de simulação. Caso o problema for estático, ou seja, se os estados do sistema não se modificam com o tempo, na prática a simulação de eventos não apresenta nenhuma aplicação.

Quando o problema for determinístico, quer dizer, não exibe conduta aleatória, o uso da simulação pode ser feito, mas essa será evidentemente subutilizada. Este seria um caso típico de “matar uma mosca com uma bala de canhão”, o que não significa que seria proibido de aplicar a simulação com os valores constantes. Na prática, esta seria uma das técnicas de verificação e validação de modelos de simulação.

Por fim se o problema for dinâmico, apresentar complexidade e aleatoriedade, a escolha mais aconselhável é a aplicação da técnica de simulação, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Complexidade e aplicabilidade da simulação.

Fonte: CHWIF e MEDINA (2010).

Para análise de sistemas complexos em maneira geral, que oscilam no tempo, a técnica de simulação é a ferramenta adotada. A simulação é aplicada em outras situações como (MCGINTY, 2001):

1. Inexequibilidade e gastos excessivamente altos da análise do processo em ambiente real;

2. Situações onde um existe um modelo matemático pode ser construído, porém impossível ou obscuro de ser solucionado de forma analítica;

3. Validação do modelo matemático descritivo do sistema é impossível ou o custo é extremamente alto;

4. Quando outros métodos de análises, como programas lineares ou modelos de planilhas falham.

Segundo Banks e Gibson (1997), a técnica de simulação não deve ser aplicada em situações onde:

1. O problema pode ser solucionado através de “análises de senso comum”;

2. A solução do problema é feita analiticamente por meio de modelo de estado de filas estacionárias, modelo probabilísticos, entre outros;

3. Realizar um experimento no sistema real é mais simples;

4. O custo da simulação supera os potenciais ganhos ou prevenção de custo;

5. Existe uma lacuna de recursos apropriados:

   a. Recurso humano com experiência suficiente para entender o problema;

   b. Analista competente;

   c. Tempo satisfatório para que os resultados do modelo sejam úteis;

   d. Hardware;

   e. Software;

   f. Verba.

6. As perspectivas do projeto por algum motivo não podem ser atingidas;

7. O sistema apresente um comportamento excessivamente complexo;

8. Fatores humanos, tecnológicos, além dos operacionais podem ser extremamente difíceis ou impossíveis de modelar.

2.4 Vantagens e desvantagens de utilização da simulação

Como já mencionado a simulação é um método amplamente utilizado e cada vez mais popular para estudar sistemas complexos. Porém, apesar de ser uma excelente ferramenta de análise é necessário conhecer as suas vantagens e desvantagens. Algumas características boas e ruins da simulação, além de alguns erros comuns cometidos em estudos de simulação que podem prejudicar ou até arruinar um projeto

foram listadas por Law e Kelton (2000). A seguir algumas das possíveis vantagens da simulação.

- A grande maioria de complexos sistemas do mundo real com elementos estocásticos não pode ser descrita por um modelo matemático que possa ser avaliado analiticamente. Dessa forma, a simulação é frequentemente o único tipo de investigação possível.

- Propostas de projetos de sistemas alternativos (ou políticas operacionais alternativas para um único sistema) podem ser comparados por meio da simulação para ver o que melhor atende a um requisito especificado.

- A metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam, ainda, na forma de esquemas ou rascunhos.

- Pode-se em uma simulação manter um controle muito melhor sobre as condições experimentais do que seria geralmente possível quando se experimenta o próprio sistema.

- A simulação permite estudar um sistema com um longo período de tempo, por exemplo, um sistema econômico em tempo comprimido ou alternativamente para estudar o funcionamento detalhado de um sistema em tempo expandido.

Simulação não é simulação sem seus inconvenientes. A seguir algumas das possíveis desvantagens.

- Cada execução de um modelo de simulação estocástico produz apenas estimativas das características verdadeiras de um modelo para um conjunto específico de parâmetros de entrada. Assim, várias execuções independentes do modelo provavelmente serão necessárias para cada conjunto de parâmetros de entrada a serem estudados. Por essa razão, os modelos de simulação geralmente não são tão bons em otimização quanto na comparação de um número fixo de projetos de sistemas alternativos especificados. Por outro lado, um modelo analítico, se

apropriado, pode muitas vezes produzir com facilidade as características verdadeiras desse modelo para uma variedade de conjuntos de parâmetros de entrada. Assim, se um modelo analítico "válido" estiver disponível ou puder ser facilmente desenvolvido, geralmente será preferível a um modelo de simulação.

- Modelos de simulação costumam ser caros e demorados para serem desenvolvidos.

- O grande volume de números produzidos por um estudo de simulação ou o impacto persuasivo de uma animação realista frequentemente cria uma tendência para colocar maior confiança nos resultados de um estudo do que se justifica. Se um modelo não é uma representação "válida" de um sistema em estudo, os resultados da simulação, por mais impressionantes que sejam, fornecerão pouca informação útil sobre o sistema atual.

Dessa forma quando se decide se a simulação é ou não apropriada no estudo de uma determinada situação, algumas das vantagens e desvantagens mencionadas acima devem ser levadas em consideração, assim como todas as particularidades da situação específica em estudo. Por fim, deve-se notar que em alguns estudos, tanto modelos simulados quantos analíticos podem ser úteis. Em particular a simulação pode ser usada para verificar a validade dos objetivos necessários em um modelo analítico. Por outro lado, um modelo analítico pode sugerir alternativas razoáveis para investigar em um estudo de simulação.

Existem várias armadilhas que podem ser encontradas ao longo do caminho para a conclusão bem-sucedida de um estudo de simulação, mesmo considerando que a escolha de se usar a técnica de simulação tenha sido feita com prudência.

- Não ter no início do estudo de simulação um conjunto bem definido de objetivos.

- Nível impróprio de detalhes do modelo.

- Tratar um estudo de simulação como se fosse basicamente um exercício complicado em programação de computadores.

- Uso indiscriminado de softwares comerciais de simulação que podem conter erros ou cujas complexas instruções macro podem não estar bem documentadas e podem não implementar a lógica de modelagem desejada.

- Confiança nos simuladores que tornam a simulação acessível a "qualquer pessoa".

- Mau uso de animação.

- Não contabilizar corretamente as fontes de aleatoriedade no sistema atual.

- Uso de distribuições arbitrárias (por exemplo, normal ou uniforme) como entrada para a simulação.

- Analisar os dados de saída de uma simulação usando fórmulas estatísticas que pressupõem independência.
- Fazer uma única replicação de um projeto de sistema específico e tratar as estatísticas de saída como as "respostas verdadeiras".
- Comparando projetos de sistemas alternativos com base em uma replicação para cada projeto.
- Usando medidas erradas de desempenho.

2.5 Aplicação da simulação computacional na mineração

Engenheiros de minas têm se interessado em usar computadores para construir modelos de simulação de operações de mineração desde que o computador foi introduzido e aceito na indústria mineral. Com o advento dos computadores pessoais e recursos que facilitam a rápida escrita e depuração de programas, os engenheiros de minas tem tido novas ferramentas para ser assistido (Sturgul, 2000).

Pinto (1999) apud Martins (2013), cita diversos simuladores desenvolvidos para a aplicação na indústria mineral em sua tese de doutorado, ainda explica que as duas e principais restrições desses simuladores são:

1. Rigidez dos modelos “pacotes computacionais fechados”; e
2. Ausência de adaptação das linguagens existentes atualmente.

Ramos Neto e Pinto (2004), em seu estudo explica que o maior impedimento na disseminação do uso da simulação na indústria mineral se deve, fundamentalmente, ao fato de não existir no mercado de mineração um simulador específico, somado a isso a ausência de informação dos profissionais da área com relação a vasta aplicação dessa ferramenta no setor.

De acordo com Panagiotou (1999), “a aplicação de modelos de simulação para o estudo de sistemas complexos de mineração em condições reais é bem aceita hoje pelo moderno gerenciamento de minas, especialmente nas fases de projeto e planejamento de novos projetos de mineração. Ao contrário de outras indústrias, a comunidade de mineração não foi rápida em adotar estudos de simulação. A natureza dinâmica e estocástica que caracteriza praticamente qualquer sistema de mineração faz da simulação o único método confiável para manipular esses sistemas”.

Afirma ainda que sistemas de computadores de alto desempenho e baixo custo, disponíveis hoje em qualquer mina ou pedreira, e sofisticadas linguagens de modelagem de simulação que permitem a rápida construção de modelos, alterações e atualizações fáceis à medida que a operação de mineração muda, tornam os modelos de simulação uma ferramenta útil.

Sturgul (2000), menciona que muitos dos modelos encontrados na mineração são exemplos da teoria das filas, como caminhões que chegam a um equipamento de ou a um depósito. Afirma ainda que o conhecimento dos conceitos da teoria das filas é essencial para qualquer pessoa interessada em construir e entender modelos de simulação.

Gignac (1981) em seu estudo construiu um modelo de simulação híbrido, que faz uso tanto do método determinístico quanto do estocástico para o transporte de minério. O modelo teve como foco o sistema de transporte em uma mina com método de lavra sublevel stoping, onde foi levado em consideração os tempos de fila no sistema de carregamento e descarregamento, assim como a interferência do tráfego. Para dar uma melhor ideia da produtividade de cada unidade de transporte implementada, os atrasos foram registrados pelo simulador.

Sturgul (2000) desenvolveu um simulador para o sistema de transporte de matérias em superfície por meio trens. O modelo simula situações como horas trabalhadas por dia em cada unidade, números de carros no sistema, tempo de carga e descarga. Os dados de saída possuem distribuições estatísticas para cada um dos elementos que compõem o sistema (carregamento e transporte, manutenções, entre outros).

Ceciliano (2007), utilizou a técnica de simulação-otimização dentro da cadeia produtiva de minérios de ferro da companhia Samarco Mineração S/A. O estudo tinha como objetivo principal desenvolver um método de tomada de decisão e aplicar durante o processo de planejamento do negócio num período de 5 anos.

Um simulador foi desenvolvido por Mirabediny e Baafi (1998) para reproduzir as atividades de uma dragline. Por meio de um monitor de coleta de dados foram obtidos aproximadamente 100.000 ciclos para dois tipos distintos de operação. As operações da dragline foram coletadas e as funções de probabilidade que foram usadas no simulador ajustadas.

Olaleye e Adagbonyin (2011) desenvolveram um programa de simulação computacional LoadHaulPro 1.0, com objetivo de analisar o sistema de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto de granito no estado de Ondo na Nigéria e, o mesmo foi validado comparando os resultados produzidos por este com os realizados no sistema real.

Com a intenção de aumentar a produção de minério de uma determinada mina, Hollberg et al. (2002), desenvolveram um simulador que tinha como umas das funções a inclusão de uma pilha na superfície, de mais funcionários, alterações de turnos, entre

outros. O modelo elaborado pelos autores inclui mineradores contínuos, shittle car, correias alimentadoras, britadores, etc.

Merschmann (2002), criou um sistema computacional de otimização e simulação voltado ao problema de planejamento operacional de lavra denominado OTISIMIN. O sistema emprega o resultado do modelo de otimização. É considerado as metas de qualidade, assim como a minimização do número de caminhões utilizados na operação de mina no modelo de programação linear aplicado na otimização.

Para analisar a produtividade de uma operação de carregamento e transporte por caminhões fora-de-estrada em uma mina a céu aberto Tu e Hucka (1985) desenvolveram um modelo de simulação para tal objetivo. O modelo construído permite além das análises das operações dos caminhões e das carregadeiras, avaliar distintos arranjos de redes de transporte na etapa de planejamento, bem como confrontar a performance desejada de possibilidades do sistema de despacho (sequenciamento) de caminhões.

Guimarães et al. (2007) com o propósito de validar os resultados alcançados a partir da aplicação de um modelo de programação matemática na definição da execução da lavra em minas a céu aberto, desenvolveu um modelo de simulação em linguagem computacional. Para atender os objetivos desejados foi usado a técnica de programação linear por metas, tendo como base que cada frente de lavra apresenta particularidades de qualidade distintas e que o ritmo da lavra é realizado de forma proporcional em função dessas características, propiciando uma alimentação que cumpra as metas de qualidade e produção preestabelecidas.

Marin (2009) em seu estudo sugere uma metodologia para construir planos de lavra que integrem a incerteza em parâmetros operacionais por meio da utilização da técnica de simulação. Para isso a metodologia é testada em um estudo de caso em uma operação de carregamento de transporte onde teve aplicação da simulação. Os resultados validaram os privilégios da aplicação da técnica de simulação estocástica para a definição de produção, bem como na identificação de potenciais de utilização no sentido de integrar a incerteza geológica e automação do processo de simulação.

Akkoyun e Careddu (2015) em estudo recente, apresentam um sistema de simulação computacional de operação de mina como ferramenta educacional para engenheiros de minas. O sistema foi desenvolvido com a utilização de simulação de eventos discretos e trabalha sobre um modelo de uma mina real a céu-aberto, de Magnesita, com mais de 100 variáveis operacionais relacionadas às operações unitárias de lavra.

Tarshizi et al. (2015) descrevem em estudo, um sistema de simulação de operações de lavra utilizando simulação de eventos discretos. O sistema proposto inclui elementos de animação visual, para facilitar a visualização de gargalos operacionais e também para apoiar a tomada de decisões sobre impactos ambientais da operação. A simulação foi realizada sobre dados de uma mina hipotética de carvão a céu-aberto.

Schunnesson et al. (2014) utilizaram a simulação de eventos discretos para comparar duas diferentes unidades de transporte de diferentes capacidades com o intuito de melhorar a produção e analisar a viabilidade das metas de produção. Segundo os autores a seleção de equipamentos de transporte em minas subterrâneas é um desafio, isto devido ao seu impacto nas taxas e custos de produção. O equipamento selecionado deve integrar uma composição ideal para o sistema e a mudança de sua composição precisa ser estudada antecipadamente via simulação.

Ahmed et al. (2016), relatam a pesquisa em modelagem de simulação de evento discretos que reproduz estocasticamente o processo de construção dos níveis de infraestrutura dentro de uma mina subterrânea. As simulações armazenam as configurações e animam os modelos do início ao fim nos estágios de desenvolvimento. O trabalho mostra que estudos de modelagem e simulação e eventos discretos mostram-se positivos em certas operações, permitindo o aumento na rapidez de seu desenvolvimento obtendo ganhos consideráveis.

Prakash et al. (2018), detalham o desenvolvimento de modelos de simulação e otimização e apresentam a implementação da estrutura em um estudo de caso de mineração de minério de ferro para verificação através de análise de cenário. O estudo apresentou uma nova abordagem ao planejamento e otimização de produção de minas a curto prazo e mostrou sua capacidade de modelar as operações de minas e fornecer decisões operacionais eficientes. A principal contribuição da abordagem de

otimização de simulação proposta no processo de planejamento de minas de curto prazo é que ela pode incorporar pequenos detalhes das operações de mineração no processo de planejamento e ajudar na tomada de decisão proativa.

Anani et al. (2017), avaliam o impacto da largura do painel sobre o custo e a produtividade de uma operação de câmaras e pilares usando simulação de eventos discretos. Um aspecto chave do projeto das minas de carvão de câmaras e pilares é a largura do painel, o que afeta os custos de mineração e a produtividade. O esforço do estudo construiu com sucesso um modelo de simulação de evento discreto que pode ser usado para facilitar o design da largura do painel. O modelo validado foi usado para avaliar o efeito da largura do painel na produtividade e nos custos unitários da mina.

Pereira et al. (2010), descrevem um simulador de operações de lava, no qual todas as operações unitárias essenciais à extração do carvão foram incluídas. O modelo computacional de simulação foi desenvolvido para a empresa Carbonífera Metropolitana S.A. no sul do Brasil, para auxílio na organização da ocupação das frentes de lavra e nas e estimativa de produção. Além de contribuir na identificação de “gargalos” no ciclo produtivo e esperas na realização das operações unitárias, o simulador mostrou-se eficiente na previsão de produção diária de carvão.

Dennis et al. (2013), aplicaram a técnica de simulação dinâmica no dimensionamento de frota e na operação existente em uma mineração subterrânea no Centro-Oeste do Brasil. Desenvolveram um modelo de simulação e a partir desse uma metodologia de gerenciamento e análise para a operação foi criada obtendo os gargalos do circuito e diminuição do OPEX. O estudo teve como inovação as vantagens em utilizar a simulação dinâmica como ferramenta para o planejamento da operação de lavra. Os resultados mostraram a importância de avaliar o sistema como um todo, o que permitiu a otimização do investimento de capital em sua totalidade proporcionando a opção de postergar investimentos de curto prazo, que tenham pouco ou nenhum benefício, para fases posteriores de expansão, alterando o cronograma de outros investimentos de capital.

2.6 Simulação da operação de lavra

Segundo Sturgul (1999) em 1961 foi realizado o primeiro simpósio sobre o uso de computadores na mineração na Universidade do Arizona em Tucson e nesse mesmo ano Rist (1961) publicou o primeiro trabalho de simulação computacional com aplicação em operações de lavra, onde o objetivo era determinar o número ideal de trens em uma mina subterrânea de molibdênio. Seu artigo foi apresentado no primeiro APCOM (Aplication of Computers and Operations Research in Mineral Industry) e posteriormente publicado em revista especializada.

A simulação no setor mineral abrange várias áreas específicas como a teoria das filas, programação, métodos de inventário, métodos de decisão probabilística e modelos de localização.

Para Marin e Tomi (2010) a simulação de lavra necessita da utilização de dados coerentes e representativos da operação de mina. Os autores desenvolveram uma metodologia aplicada a um estudo de caso de mina a céu aberto, na qual dados dos tempos de ciclo dos caminhões foram modelados para utilização em simulação de lavra. O estudo identificou a necessidade do rastreamento das causas de inconsistências de dados, para o desenvolvimento de um processo de gestão de dados incorretos da operação de lavra.

Sturgul (1999), comenta que a aplicação de simulação no processo de lavra é mais efetiva a partir da década de 90. Havia até 1995 cerca de 150 artigos sobre o assunto de simulação de sistemas de lavra publicados ou apresentados nos principais simpósios em todo o mundo. Muitos destes trabalhos era estudos de simulação de minas reais, alguns outros eram exemplos teóricos e em alguns casos era simplesmente demonstrações os softwares disponíveis e seus recursos.

Park et al. (2016) publicaram os resultados de um estudo sobre um sistema de simulação de lavra para minas subterrâneas. O sistema foi desenvolvido em linguagem de simulação GPSS/H e foi aplicado a uma mina subterrânea de Calcário na Coréia. A aplicação do sistema foi utilizada para apoiar a tomada de decisão sobre

o dimensionamento ideal da frota de caminhões e escavadeiras para diversas frentes de lavra estudadas.

Knights e Bonates (1999), Basu e Baafi (1999), Sturgul (1999) e Panagiotou (1999) desenvolveram em estudo um histórico sobre a aplicação de modelos computacionais de simulação em operações de lavra ao longo dos anos na América do Sul, Austrália, Estados Unidos e Europa. Os trabalhos analisados tiveram como objetivo a aplicação da simulação como ferramenta para:

- Auxiliar no planejamento de produção;
- Prever o desempenho de usina de processamento mineral;
- Estudar o efeito do despacho dinâmico sobre a produtividade;
- Estimar a produtividade de um sistema de transporte subterrâneo e a céu aberto;
    - Apoiar pesquisas acadêmicas;
    - Estudar problemas de filas;
    - Determinar o número ideal de equipamento de carga e transporte.

Fazendo uso do conceito de template, que são definidos como um conjunto de blocos de linguagem SIMAN reunidos em um único modelo, Ramos Neto e Pinto (2004) desenvolveram templates específicos para a indústria de mineração a partir do programa Arena. Sendo esses:

- Módulo caminhões;
- Módulo deslocamento vazio;
- Módulo deslocamento carregado;

- Módulo carga;
- Módulo descarga;
- Módulo alocação.

Segundo Marin (2009), as conclusões principais dos trabalhos pesquisados por Ramos Neto e Pinto (2004) foram:

- Utilização da técnica de simulação mostra-se claramente como muito eficiente na operação de lavra, por permitir conhecer mais sobre o sistema, resolver problemas e identificar gargalos. Porém, o processo exigi conhecimento significativo em informática para a modelagem do verdadeiro problema;
- Erros que muitas vezes são trabalhosos de serem detectados através de relatórios, são possíveis de serem encontrados com a animação do modelo, o que permite a sua validação;
- Devido aos custos, geralmente empresas de grande porte que conseguem pagar pela criação de modelos de simulação. Já as empresas de pequeno porte ainda são céticas e resistentes sobre a viabilidade do esforço;
- Devido aos progressos na visualização utilizando realidade virtual e o despendimento de equipamento informáticos de custo reduzido prevê-se o possível desenvolvimento de um modelo realista de animação tridimensional de uma mina;
- Mesmo tendo sido aplicadas tardiamente na lavra, a modelagem e simulação tem lugar garantido nas áreas de design de mina e planejamento de lavra.

Sturgul (2001) destacou as seguintes aplicações da simulação em problemas de modelagem na mineração:

- Modelagem de correias transportadoras: problema que preocupava os engenheiros era desenvolver modelos de correias transportadoras, principalmente para minas subterrâneas de carvão. O objetivo era prever o fluxo em diversos pontos de um sistema de correia e estimar a quantidade de minério nos depósitos de armazenamento. Este problema é complicado porque
  as denominadas correias de sacrifício (que suportam o impacto da queda de minério) necessitam ser substituídos com frequência.

- Operação de lavra subterrânea pelo método pilar e salão: O método de pilar e salão é um dos mais frequentes para depósitos estratificados como carvão ou potássio. O minério é extraído em “salões” e o que sobra como sustentação são os pilares. Foram desenvolvidos modelos de minas de muitos quilômetros quadrados.

- Movimentação de minério em lavra a céu aberto: o problema mais importante associados as minas a céu aberto é determinar o número ótimo de caminhões para certificar que a alimentação da usina seja constante ou quase constante. Outro ponto importante é o dimensionamento correto do número de peças de reposição, uma vez que caminhões de grande porte utilizados na mineração como os fora de estrada e outros equipamentos de grande porte não são muitos confiáveis, com confiabilidade de cerca de 70 a 80%.

- Carregamento e Transporte de uma mina a céu aberto: O uso de sistemas de despacho computadorizados, onde cada vez que um caminhão descarrega ele é enviado automaticamente para o equipamento de carga, por minerações de grande porte está cada vez mais sendo considerado, com o objetivo de economizar tempo. O primeiro sistema foi instalado na mina de cobre Tyrone no Novo México, em 1982. O modelo de simulação computacional pode ser utilizado para averiguar se a implantação do sistema realmente melhorará a eficiência.

Os softwares mais populares de simulação para as operações de mina segundo Sturgul (2001) são GPSS/H e Arena, além de ser os softwares mais aplicados nos trabalhos mais recentes pesquisados.

O GPSS/H segundo Marin (2009) faz uso da linguagem GPSS, primeira linguagem comercial de computadores dedicada à simulação de sistemas mais popular no fim dos anos 1960 e início dos anos 1970. Desde então o setor vem percebendo o valor do software de simulação em suas operações.

O Arena compreende a linguagem Siman e o pacote Cinema. A linguagem Siman foi lançada em 1982, orientada na linguagem GPSS que era utilizada em computadores de grande porte. Por ser uma linguagem designada a IBM-PC (Personal Computer ou Computador Pessoal) e compatíveis a linguagem foi considerada na época inovadora. Lançado em 1990 o pacote Cinema integrado ao SIMAN permitia apresentar uma exibição animada e em cores da execução do sistema (Marin, 2009).

A técnica de simulação está cada vez mais popular em empreendimento minerais no planejamento e análise de operações em fase inicial de projeto ou para alterar e melhorar as já existentes, permitindo aos engenheiros de planejamento de mina avaliarem como modelo de simulação se comporta antes que este seja desenvolvido e implantado de fato, com o intuito de avaliar as alternativas de cenários, obter melhorias, eliminar problemas ou justificar valores de custo.

Com a introdução da animação (apresentação visual do sistema simulado) combinada com a simulação os resultados do estudo podem ser mostrados aos gerentes de minas ou outros profissionais que mesmo não tendo grande entendimento sobre a simulação, podem ver as operações da mina de forma interativa, além de servir como ferramenta útil no convencimento gerencial de realizar investimentos ou não.

2.7 Etapas de um estudo de simulação

Após determinar que para a análise de um dado sistema, a modelagem é a técnica mais apropriada, é imprescindível desenvolver um modelo de simulação que se aplica melhor ao estudo. Para isso, é necessário seguir determinados passos, afim de que o

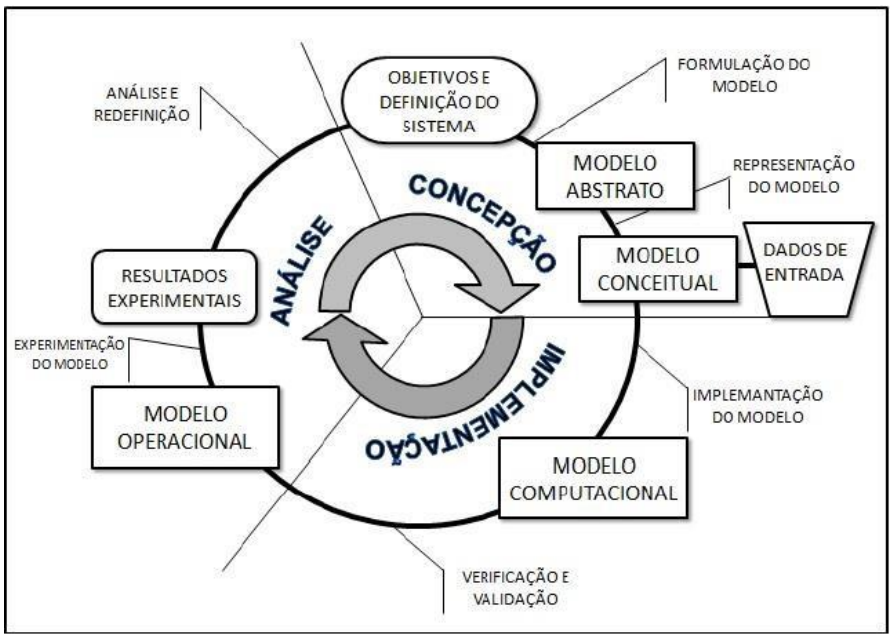
estudo de simulação seja bem-sucedido. Esses passos ou processos são conhecidos na literatura como “metodologias de simulação” ou “ciclos de vida de um modelo de simulação” (Law e McComas, 1991).

Segundo Chwif e Medina (2010), a construção de um programa de computador, que é a própria simulação para muitos leigos, é apenas uma no meio de diversas atividades de um estudo de simulação.

De acordo com a Figura 4, a construção de um modelo de simulação é formado por três grandes etapas:

- Concepção ou formulação do modelo;
- Implementação do modelo;
- Análise dos resultados do modelo.

Figura 4 – Metodologia de simulação.



Fonte: CHWIF e MEDINA (2010).

Na primeira etapa (ou fase) chamada “concepção”, o analista de simulação deve entender com clareza o sistema a ser simulado e os seus objetivos, através da discussão do problema com especialistas. Deve-se decidir com clareza qual será o escopo do modelo, suas hipóteses e seu nível de detalhamento. Os dados de entrada também são coletados nesta fase. Não se pode negar a importância de se ter dados adequados para alimentar o modelo, sendo que a expressão GIGO (garbage in, garbage out), muito aplicada na engenharia de software, também é aplicável aos modelos de simulação. Tal expressão se refere a incapacidade de se obter dados de saída corretos de um modelo, uma vez que os dados de inseridos encontram-se incorretos, ou seja, “lixo” entra, “lixo” sai. No entanto, é importante ressaltar que o modelo é que deve dirigir a coleta de dados, e não o contrário. Finalizada a etapa de concepção, o modelo que está na mente do analista (modelo abstrato) deve ser representado de acordo com alguma técnica de representação de modelos de simulação, a fim de torna-los um modelo conceitual, de modo que outras pessoas envolvidas no projeto possam entende-lo.

Na segunda etapa, “implementação”, o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional através da utilização de alguma linguagem de simulação ou de um simulador comercial. Pode-se ainda codificar o modelo de simulação em linguagem de programação geral como C ou Pascal, mas isto é altamente desaconselhável devido ao tempo que será despendido na programação de diversas rotinas que se torna dispensável já que essas existem em simuladores comerciais. Com o avanço tecnológico dos simuladores atuais, a etapa de implementação (ou codificação) já não consome tanto tempo quanto no passado (a implementação segundo alguns autores é responsável pelo consumo de 20% a 30% do tempo total de um estudo típico de simulação). O modelo computacional implementado deve ser comparado como o modelo conceitual, com o propósito de avaliar se a operação atende ao que foi determinado na etapa de concepção. Alguns resultados precisam ser alcançados para a validação computacional, analisando se o modelo é uma representação precisa da realidade.

Na terceira etapa, “análise”, o modelo computacional está pronto para a realização dos experimentos, dando origem ao modelo experimental ou modelo operacional.

Nesta etapa, são efetuadas várias “rodadas” do modelo, e os resultados da simulação são analisados e documentados. A partir dos resultados, conclusões e recomendações sobre o sistema podem ser geradas. Caso necessário (se o resultado da simulação não for satisfatório), o modelo pode ser modificado e este ciclo é reiniciado.

A etapas na figura 4 não devem ser interpretadas como uma sequência linear. Em um estudo prático, podem ocorrer diversas iterações e realimentações no processo, à medida que o entendimento do problema muda. De fato, Paul et al. (2003) comentam que todo este procedimento sistemático pode ir por água abaixo se o problema não for bem entendido e identificado, levando a resultados da simulação completamente errôneos. Robinson (2004) enfatiza a não linearidade de um estudo de simulação, lembrando que esta não linearidade deve ser considerada, embora a totalidade da literatura disponível sobre simulação apresente, para fins didáticos, etapa por etapa como se fossem “estanques”. A melhor maneira é imaginar que o projeto de simulação se desenvolve em forma de espiral, em que as etapas são repetidas na sequência apresentada na figura 1 até que, entre uma iteração ou outra, não existam mais diferenças nos resultados de cada etapa. Esta situação é particularmente comum em projetos de sistemas novos, dos quais não se dispõe de dados reais.

Já Pedgen (1995) apud Botter (2002) e ajustado por Botter (2002), apresenta uma sequência de passos a serem seguidos no desenvolvimento de estudos de simulação de forma eficiente, porém o autor da ênfase a importância da análise de dados. A Figura 5 apresenta a sequência de passos.

Figura 5 – Procedimento para análise e modelagem por meio da simulação.

A-) DEFINIÇÃO DO PROBLEMA
B-) PLANEJAMENTO DO PROJETO
C-) DEFINIÇÃO DO SISTEMA
D-) FORMULAÇÃO CONCEITUAL DO MODELO
E-) PROJETO PRELIMINAR DO EXPERIMENTO
F-) PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA
AO FINAL DESSE PASSO RETORNE AO PASSO "A"
G-) CODIFICAÇÃO DO MODELO
H-) VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO
I-) PROJETO FINAL DO EXPERIMENTO
J-) EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
K-) ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS
L-) IMPLEMENTAÇÃO E DOCUMENTAÇÃO

Fonte: Botter (2002).

A. *Definição do Problema*: etapa onde ocorre a definição da meta de estudo;

B. *Planejamento do Projeto*: nesta fase busca-se verificar a existência de recursos para execução do projeto;

C. *Definição do Sistema*: investigação sobre o funcionamento do sistema e estabelecimento das fronteiras e restrições do sistema;

D. *Formulação Conceitual do Modelo*: construção de um modelo preliminar para estipular os componentes, as variáveis e as interações lógicas de forma gráfica ou pseudocódigo;

E. *Projeto Experimental Preliminar*: seleção das medidas de eficiência dos fatores a serem variados e dos dados que precisam ser colhidos do modelo, sua forma e extensão;

F. *Preparação dos Dados de Entrada*: identificação e coleta dos dados necessários ao modelo;

G. *Tradução do Modelo*: formulação do modelo em linguagem de simulação apropriada;

H. *Verificação e Validação*: comprovação de que o modelo opera da forma estabelecida e que a saída do modelo é confiável e representativa de um sistema real. O intuito da verificação busca mostrar que o programa computacional se desempenhou como esperado e pretendido. O intuito da validação é estabelecer que o desempenho do modelo representa de forma válida o sistema do mundo real que está sendo simulado;

I. *Projeto Final Experimental*: projetar experimentos que irão gerar informações desejadas e determinar como cada um dos processamentos computacionais no projeto será executado;

J. *Experimentações*: execução da simulação para gerar os dados desejados e realizar análises de sensibilidade;

K. *Análise e Interpretação*: realizar inferências sobre os dados obtidos pela simulação;

L. *Implementação e Documentação*: disponibilização e aplicação dos dados utilizados e dos resultados obtidos, além de uma documentação do modelo e de seu uso.

Após o passo F (Preparação e dos de entrada) que basicamente seria buscar distribuições de probabilidades para a obtenção dos intervalos, seria o passo G (Tradução do modelo). Porém o intuito de Botter (2002) é enfatizar a importância da qualidade e verificação dos dados durante toda a simulação, logo o autor sugeri retornar ao início do processo e analisar os passos “A”, “B”, “C”, “D”, “E”.

2.8 Modelagem dos dados de entrada

Em um estudo de simulação o modelo procura capturar o comportamento de um dado sistema e assim representá-lo como um modelo computacional. Modelos de simulação devem ser capazes de representar os inúmeros fenômenos aleatórios presentes no sistema, de forma que este seja o mais representativo possível do sistema real. Um resultado satisfatório depende tanto da qualidade do modelo quanto da qualidade dos dados que alimentam o sistema.

Todos os elementos de dados em um modelo devem ser analisados afim de determinar sua disponibilidade e qualidade, antes que um modelo de simulação seja concluído. Os dados não só definem a exatidão do modelo em estudo, mas a sua existência ou inexistência determinam a estrutura do modelo.

Os simuladores interpretam os dados de entrada inseridos no sistema como distribuições de probabilidade, quando esses não aderem a uma distribuição teórica, é utilizado uma distribuição empírica, isto é, um histograma dos dados.

De acordo com Chwif e Medina (2010), dentre as etapas envolvidas na construção de um modelo de simulação uma das mais importantes diz respeito à modelagem de dados de entrada, cujo objetivo é obter modelos probabilísticos com a função de reproduzir a aleatoriedade de um fenômeno.

Cremonese e Tomi (2012) explica que diversas, entretanto pequenas, medidas concomitantes em um dado sistema, podem atingir modificações na produção acima de 50%, o que justifica a importância do tratamento dos dados.

Leemis (1997) citado por Chwif e Medina (2010), sugere sete práticas que devem ser utilizadas pelo usuário atingir êxito ao modelar seus dados de entrada.

1. Levantar os dados corretos: Se o objetivo for estudar um sistema de filas de atendimento, não faz sentido gastar energia levantando dados de desempenho, como o tempo de espera em fila por exemplo. Nesse tipo de sistema o interesse é por dados referentes aos tempos entre chegadas sucessivas e os tempos de atendimento.

2. Fazer uso de todas as possibilidades possíveis dos modelos probabilísticos: Não se deve limitar somente às possibilidades de distribuições probabilísticas em função do software em uso. Mas investigar se outras distribuições não seriam mais adequadas, além disso usar como requisito de escolha do software o maior número de distribuições possíveis permitidas.

3. Efetuar uma análise estatística completa: Deve ser analisado a existência de outliers, avaliado como o histograma se comporta, verificar o teste estatístico mais indicado para a amostra coletada, considerando o nível de relevância mais indicado.

4. Considerar a dependência no tempo: Levar em consideração se os dados são estacionários ou dependem do tempo?

5. Considerar modelos paramétricos ou não paramétricos: A dificuldade ligada a alguns fenômenos aleatórios impede a sua aproximação pelos modelos probabilísticos comuns. Nesses casos são utilizados outros modelos, como a aproximação por curvas de Bézier.

6. Levar em consideração a forma da cauda da distribuição: A atenção deve ser dobrada com relação à coletadas de dados em algumas distribuições. Como na distribuição exponencial que é conhecida por apresentar muitas situações com a presença de valores baixos e poucas com valores altos, o que leva o usuário a remover da amostra valores ao que tudo indica ser outliers.

7. Efetuar análise de sensibilidade: Assim que os dados são modelados e desenvolvido o modelo de simulação, é necessário verificar a sensibilidade da resposta do modelo a partir de pequenas variações nas características da distribuição probabilística escolhida.

A modelagem de dados pode ser dividida em três etapas (CHWIF e MEDINA, 2010):

- Coleta de Dados;
- Tratamento de Dados;
- Inferência.

A primeira etapa, denominada coleta de dados, é equivalente ao chamado processo de amostragem. Uma amostra é um conjunto de valores, retirados da população de interesse, utilizada para representar a população no estudo estatístico. Nesta etapa o objetivo é garantir que a amostra obtida seja mais representativa possível do fenômeno.

No passo seguinte, tratamento de dados, é feito o uso de técnicas para descrever os dados levantados, apontar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar nosso conhecimento acerca do fenômeno em estudo.

Diversos pacotes existentes de uso comercial podem ser utilizados neste estudo (Minitab, SPSS, Best fit, dentre outros). Inclusive alguns pacotes de simulação, têm módulos para modelagem de dados (Stat::fit – ProModel e Simul8, Input Analyzer – Arena, dentre outros).

Em todo levantamento de dados está suscetível a valores não usuais conhecidos outliers. Os motivos mais comuns para o seu surgimento são como relação a alguns erros na coleta de dados ou um determinado evento raro e completamente inesperado.

A inferência, já na terceira etapa, utiliza os conhecimentos do Cálculo de Probabilidade para entender qual o comportamento da população a partir da amostra. Obtendo como resultado um modelo probabilístico, ou seja, uma distribuição de probabilidades que representará o fenômeno de aleatoriedade em um estudo e será incorporado ao modelo de simulação.

2.8.1 Coletas dos dados

Chwif e Medina (2010) mencionam que a coleta de dados na fase de modelagem é a primeira etapa do processo e corresponde a um processo de amostragem. Deve ser tomado um cuidado especial para distinguir o que são “dados de entrada” (valores

disponibilizados ao modelo de simulação) e o que são “dados de saída” (valores obtidos do modelo de simulação).

A coleta de dados é iniciada a partir da escolha adequada das variáveis de entrada, o método de coleta e o tempo necessário para representar o sistema a ser simulado. Na grande parte dos casos, é impossível realizar-se o levantamento de dados de toda a população.

É fundamenta nesta fase padronizar o método empregado para que se possa identificar quais os possíveis erros que podem vir a ocorrer nesta etapa e dessa forma adotar procedimentos de consolidação dos dados.

2.8.2 Tratamento dos dados

Segundo Botter (2002), o tratamento e análise de dados tem por propósito gerar uma base de dados coerente e consistente. Além disso possibilita identificar na base de dados parâmetros que são úteis para o estudo, erros de coleta de dados, assim como os parâmetros que devem ser desprezados sem prejuízo do resultado final, aumentando o conhecimento e representatividade do sistema a ser simulado. Segundo o autor, o processo de tratamento de dados é formado por cinco fases, detalhadas na sequência (BOTTER, 2002).

Ordenação dos Dados: pode parecer simplista no primeiro momento, mas é essencial para quem está analisando e não conhece a base de dados. Nesta etapa possivelmente já são observados alguns erros, como discrepâncias na ordem de grandeza quanto na ordem de grandeza, dados duplicados, dados não preenchidos.

Avaliação Descritivas: está ligada à Estatística Descritiva, entretanto nem sempre é utilizada todas as ferramentas que a estatística permite para a análise dos resultados como as recomendadas a seguir:

- Medidas de Ordem (Máximo e Mínimo);

- Separatrizes (Quartis, Descis e Pertencis);
- Medidas de Tendência Central (Média, Média Aparada, Mediana e Moda);
- Medidas de Dispersão (Amplitude, Intervalo Inter-Quartil, Variância, Desvio Padrão e Coeficientes de Variação).

Visualização dos Dados: apenas a avaliação descritiva não é suficiente para uma absoluta e apurada análise dos dados, por isso para completar a avaliação dos dados é feito o uso de ferramentas gráficas para apontar aspectos como assimetria na distribuição que não são notadas apenas por medidas numéricas. Diante disso o autor menciona algumas das formas de visualizações mais aplicadas nas análises das variáveis.

- Histograma;
- Gráfico de frequência acumulada;
- Diagrama de dispersão e a medida de associação.

Limpeza dos Dados: remoção dos valores sem coerência ou consistência, além dos que se apresentam como discrepantes e não devem ser considerados. Essa limpeza acontece por conta de problemas corriqueiros em diversos banco de dados, em sua maioria ocasionado pela ausência de cuidado do analista na coleta de dados, armazenamento das variáveis ou por eventos raros.

Agrupamento: apuração da presença de grupos dentro dos dados amostrais coletados. Aplicações de Análises de Agrupamento devem ser executadas, assim como a avaliação por meio da análise da variância.

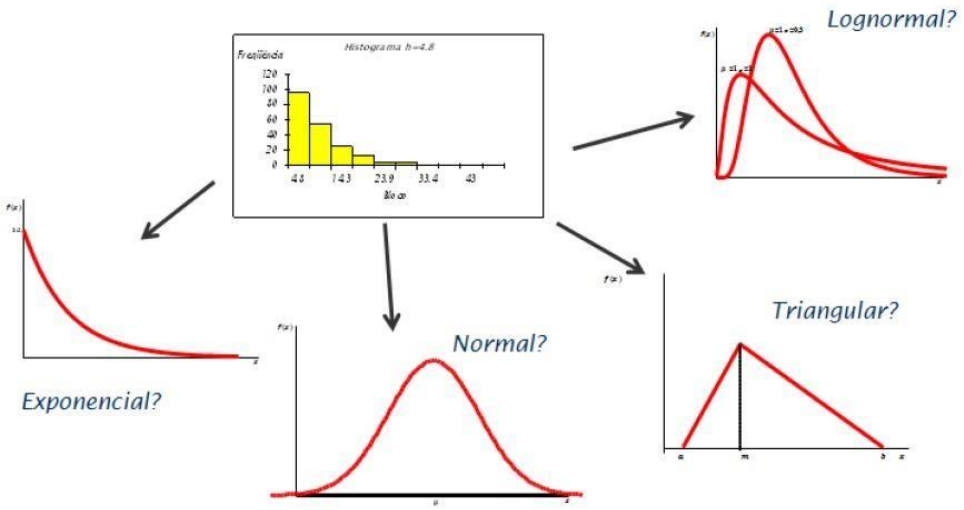
2.8.3 Inferência

Chwif e Medina (2010), explicam que após construída a amostra é feita a identificação, quando possível de uma distribuição de probabilidade que efetivamente represente o fenômeno, ou seja, defina o comportamento das variáveis em análise que serão inseridas no modelo de simulação.

O principal problema enfrentado segundo Botter (2002), ao se realizar uma análise inferencial é a identificação de uma distribuição de probabilidade que possa vir a modelar os dados, ainda menciona que para aplicação da simulação é interessante, porém não necessário que as distribuições observadas tenham um modelo teórico associado.

Porém é necessário definir qual o melhor modelo de distribuição estatística ou probabilística pode representar a amostrada coleta, conforme algumas das mais utilizadas distribuições reunidas na Figura 6.

Figura 6 – Identificação da distribuição estatística ou probabilística.



Fonte: Chwif e Medina (2010).

Para tal, deve-se executar testes de aderência afim de examinar qual modelo teórico se adapta à distribuição observada. A escolha de probabilidade pode ser realizada por meio de três métodos (BOTTER,2002).

- Investigação gráfica e gráfico de probabilidades;

- Teste de aderência de Qui-Quadradado;
- Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

A escolha do modelo probabilístico se inicia com a chamada investigação gráfica, ou seja, com a visualização dos dados por meio de histogramas relativos a intervalosde tempo por exemplo, onde a forma desses histogramas pode ser comparadas com distribuições de probabilidade. Outro método bastante utilizado são os gráficos de probabilidade, simples e muito empregado para se investigar se um determinado conjunto de dados foi gerado por uma distribuição de probabilidades específica.

Em um teste de aderência é testado se uma hipótese é válida ou não. O teste QuiQuadrado, o mais usado se baseia no cálculo dos desvios entre frequências observadas e as teóricas. Já o teste de Kolmogorov-Smirnov apoia-se na analogia entre a distribuição acumulada amostral e teórica.

2.9 Componentes básicos de um modelo de simulação

Conforme Prado (2008), os mais recentes programas de computados facilitam produzir modelos de simulação com recursos animação, nos quais é possível visualizar na tela o comportamento do sistema em estudo, semelhante a um filme.

Kelton et al. (2010) descrevem os componentes básicos que são encontrados na maior parte dos modelos de simulação, para que uma modelagem possa traduzir para a tela de um computador o que ocorre na realidade.

<u>Entidades</u>

A maior parte das simulações envolve “jogadores”, conhecidos por entidades que se movimentam, mudam de status, afetem e são afetados por outras entidades assim como pelo próprio sistema. Essas inevitavelmente interferem nos dados de saída (output) do sistema em estudo. As entidades são objetos dinâmicos na simulação, geralmente são desenvolvidos, movimentam-se por um tempo e depois são eliminados do sistema. É possível, no entanto, ter entidades que permanecem

movimentando no sistema e nunca saem. Contudo, todas as entidades têm indispensavelmente de serem criadas pelo analista ou automaticamente pelo software.

Para exemplificar o que foi descrito inicialmente é considero um sistema de peças passando pelo processo de usinagem. Essas entram e saem do sistema quando são descartadas e se necessários podem até gerar fila para passarem pelo processo. Nesse caso as peças são uma entidade.

Em sua maioria as entidades representam “coisas reais” de uma simulação. Podem-se ter diversos tipos distintos de entidades e muitas ações de cada tipo de entidade existente no modelo. Possivelmente pode-se ter diversos tipos de peças que precisem de usinagem, direcionamento e preferências diferentes, além disso poderia haver execuções de cada tipo de peça no modelo.

Descobrir quais são as entidades é certamente a primeira coisa a se executar na modelagem de um sistema.

Atributos

Para individualizar as entidades, é necessário anexar atributos a elas. Um atributo é uma característica comum de todas as entidades, porém com valor específico que diferi uma entidade de outra. Como exemplo, leva-se em consideração algumas entidades tendo como atributos chamados de vencimento, prioridade e cor para apontar essas características para cada entidade individual. Cabe ao analista descobrir que atributos suas entidades precisam nomeá-los, atribuir valores a eles e até alterá-los, conforme o contexto e assim utilizá-los quando for conveniente. O detalhe mais significativo relacionado aos atributos é que seus valores estão associados a entidades específicas. Um mesmo atributo geralmente tem valores distintos para entidades distintas, dessa forma parte diferentes têm diferentes datas de vencimento, prioridades e cores. Pensando em atributo como sendo uma etiqueta fixada a cada entidade, mas o que está escrito na etiqueta pode diferir entre entidades para caracterizá-las individualmente.

Variáveis

Uma variável (ou uma variável global) é uma informação que reflete alguma característica do seu sistema, independentemente de quantos ou quais os tipos de entidades podem estar por perto. Podem-se ter várias variáveis distintas em um modelo, mas cada uma é única. Existem dois tipos de variáveis: variáveis embutidas que são geradas pelo sistema (número de filas, número de recursos ocupados, tempo de simulação, entre outras) e variáveis estabelecidas pelo próprio usuário (tempo médio de serviço, número de viagens, tempo de viagem e outras).

Ao contrário dos atributos, as variáveis não estão vinculadas a nenhuma entidade específica, entretanto pertencem ao sistema como um todo. Elas são acessíveis por todas as entidades, e muitas podem ser alteradas por qualquer entidade. Variáveis são utilizadas para diferentes objetivos. Por exemplo, o tempo necessário para se movimentar entre quaisquer estações em um modelo pode ser o mesmo no modelo como um todo, e uma variável chamada tempo de transferência pode ser definida e valor apropriado ajustado e em seguida essa constante seria usada sempre que houver necessidade.

Em um modelo modificado, onde o tempo é definido como uma constante é necessário somente alterar a definição de tempo de transferência para alterar seu valor durante todo o modelo. As variáveis também podem representar algo que modifica durante a simulação, como o número de peças em uma determinada área subconjunto do modelo maior que incrementa uma entidade quando se entra na área e diminui quando sai.

Recurso

As entidades normalmente disputam umas com as outras pelo serviço de recursos, que é representado por: pessoal, equipamentos ou espaço em uma área de armazenamento de tamanho limitada. Uma entidade captura um recurso quando acessível e o liberta assim que o serviço é finalizado. É melhor entender recurso

como sendo concedido à entidade ao invés da entidade ser atribuída ao recurso, como uma máquina ou pessoa.

Um recurso pode representar um grupo de diversos servidores individuais, cada um dos quais é chamado de unidade desse recurso. Essa definição é conveniente para modelar, por exemplo, vários agentes “paralelos” idênticos em um balcão de passagens aéreas. O número de unidades disponíveis de um recurso pode ser alterado durante a execução da simulação para representar os agentes que iniciam o repouso ou retornam as suas estações de trabalho quando o sistema fica ocupado.

Fila

Quando uma entidade não pode prosseguir, porventura porque necessite parar para usar uma unidade de um recurso que está atendendo outra entidade ela precisa de um lugar para aguardar, que por sinal é o intuito de uma fila. No Arena, as filas têm e também podem ter capacidades. É importante e necessário determinar na modelagem como lidar com uma entidade quando essa chegar a uma fila que já cheia.

Acumuladores estatísticos

Para avaliar as medidas de desempenho de saída, é preciso monitorar diversas variáveis por meio da ajuda de um controlador estatístico (acumulador estatístico), durante o progresso da simulação.

- O número de peças produzidas até o momento;
- Os tempos totais de espera na fila até o momento;
- O número de partes que passaram pela fila até agora;
- O maior tempo gasto na fila;

- O total do tempo gasto no sistema por todas as partes que partiram, entre outros.

Já em um modelo de uma mina, existem algumas variáveis que podemos controlar:

- Produção de ROM;
- Remoção de estéril;
- Tempo total gasto na fila para a operação de carga;
- Tempo total gasto da fila de basculamento;
- Maior tempo gasto em fila até momento.

Eventos

Um evento é algo que ocorre em um determinado instante de tempo (simulado), onde pode ser modificado os atributos, variáveis, ou acumuladores estatísticos. Basicamente quando se executa um modelo de simulação tudo está centrado ao redor dos eventos.

Em uma mina podem citar como exemplos que possivelmente podem ocorrer:

- Chegada - um caminhão chega na frente para ser carregado;
- Partida – a operação de carregamento foi finalizada;
- Fim – o caminhão faz o basculamento seguindo o despacho.

Durante a execução da simulação é necessário acompanhar alguns eventos que provavelmente acometeram no futuro. Essa informação no Arena é armazenada em um calendário de eventos.

A identificação da entidade envolvida está contida no registro de eventos, assim como a hora do evento e do tipo de evento que será desencadeado. No Arena cada evento agendado é colocado no calendário, ou seja, o software organiza cada evento em ordem cronológica para que o próximo evento (mais rápido) esteja no ponto mais alto do calendário, isto é, o novo registro de evento é identificado no calendário em ordem crescente de horários. Quando chega o momento de executar o próximo evento, o registro superior é removido do calendário e as informações presentes no registro são utilizadas para executar a lógica adequada. Possivelmente parte dessa lógica pode ser colocar um ou mais novos registros de eventos no calendário.

Em um modelo de evento discreto, as variáveis que caracterizam o sistema não são alteradas entre os eventos sucessivos. A maior parte do trabalho na simulação constitui-se em entender a lógica apropriada para a ação de cada tipo de evento.

Relógio de simulação

Na simulação, o tempo, é simplesmente uma variável denominada relógio de simulação. De maneira oposta ao tempo real, o relógio de simulação não assume todos os valores e flui continuamente, mas pode sofrer oscilações severas seguindo a ordem de ocorrência dos eventos presumidos no calendário. O monitoramento e observação do relógio de simulação são peças fundamentais para qualquer simulação dinâmica.

O relógio de simulação comunica-se de perto com o calendário de eventos. A maneira como o evento é realizado necessita claramente do tipo de evento e do estado do modelo de simulação, entretanto de forma geral pode-se incluir variáveis de atualização, acumuladores estatísticos, alterar os atributos da entidade e incluir novos registros de eventos no calendário.

2.10 O software arena

Chwif e Medina (2010), mencionam que a escolha do software de simulação é um ponto importante em qualquer estudo de simulação, mesmo não sendo visto como uma etapa fundamental, uma vez que o fator mais importante e crítico para o sucesso

está ligado ao analista que está fazendo o estudo. Contudo, não se pode negar que a escolha adequada do software para o estudo de simulação tem influência especialmente no tempo total de um estudo de simulação.

O Arena, de acordo com Kelton et al. (2010) é um software de simulação para eventos discretos que examina o ambiente operacional com foco nos processos existentes no sistema em análise.

O software se diferencia por combinar a facilidade de utilização encontrada em simuladores de alto nível com a flexibilidade de linguagens de simulação e até mesmo com linguagens de programação gerais, ou seja, permite executar algoritmos de decisão complexos ou acessar informações de outros aplicativos construídos em sistemas como o Microsoft Visual Basic ou C, caso o usuário precisar.

Para permitir essa interação com outros tipos de sistemas o software fornece modelos alternativos e intercambiáveis de módulos de simulação e modelagem gráfica que você pode combinar para criar uma diversidade muito ampla de modelos de simulação, além de permitir por meio de sua interface gráfica ao usuário, que automatize o processo por meio do uso do mouse, diminuindo a necessidade do uso do teclado do computador.

Afim de simplificar a exibição e a organização, os módulos são comumente agrupados em painéis para constituir um modelo. Ao intercalar painéis, obtém-se acesso a um conjunto diferente de estruturas e recursos de modelagem de simulação. Em grande parte dos casos, módulos de distintos painéis podem ser misturados em um mesmo modelo.

Por meio dos templates, os quais possuem um conjunto de módulos gráficos (conjunto de componentes do SIMAN) com funções parecidas, é permitido desenvolver modelos de sistemas fáceis ou difíceis com facilidade. Assim como é possível por meio Arena que o usuário desenvolva templates de acordo com a atividade especifica que se pretende executar, como o que Ramos Neto e Pinto

(2004) desenvolveram, os autores criaram templates específicos para serem aplicados na mineração.

O pacote do Arena acompanha um software responsável por realizar o tratamento estatístico dos dados de entrada no modelo, que são parte integrante de um bom estudo de simulação, o Input Analyzer. O qual é capaz de adequar distribuições probabilidade: Beta, Empírica Contínua e Discreta, Erlang, Exponencial, Gamma, Johnson, Lognormal, Poisson, Triangular, Uniforme e Weibull. São coletas informações estatísticas padrão relacionadas aos elementos do modelo no Arena, como filas (tempo gasto na fila, número de filas, entre outros), recursos (quantidades de paradas, utilização, entre outros).

Em um empreendimento mineral, umas das ferramentas mais indicadas para a execução de um plano de lavra seria a ferramenta de simulação Arena, pelos inúmeros recursos de análises estatísticas, flexibilidades de linguagem e facilidade de uso, assim como sua interface gráfica que permite transferir para o sistema e visualizar na tela do computador o comportamento de cada umas das indispensáveis variáveis ligadas ao sistema produtivo.

2.11 Simulação a eventos discretos

A simulação de eventos discretos segundo Kelton et al. (2010), diz respeito à modelagem de um sistema à medida que ele evolui ao longo do tempo por uma representação na qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos separados no tempo, isto é, em termos matemáticos, pode-se dizer que o sistema pode mudar em apenas um número contável de pontos no tempo. Esses pontos no tempo são aqueles em que um evento ocorre, em que um evento é definido como uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema. Embora a simulação de eventos discretos possa conceitualmente ser feita por cálculos manuais, a quantidade de dados que deve ser armazenada e manipulada para a maioria dos sistemas do mundo real determina que simulações de eventos discretos sejam feitas em um computador.

No setor mineral a simulação de eventos discretos é mais utilizada, tanto em minerações a céu aberto quanto na subterrânea. Atualmente essa técnica é uma das formas eficientes quando o objetivo é prever modificações em sistemas já existentes assim como sistemas que serão implantados.

A simulação de eventos discretos segundo Pereira (2004), é específica para a análise de sistemas no qual o estado das variáveis altera somente com a ocorrência de eventos vistos como instantâneos. Ao invés dos modelos de simulação serem avaliados por métodos analíticos são avaliados por métodos numéricos, ou seja, em vez de levar em consideração métodos analíticos que aplicam o raciocínio dedutivo/matemático para solucionar um modelo, considera-se métodos numéricos que empregam estratégias computacionais para executar os modelos matemáticos.

Ainda segundo o autor, os modelos quando simulados produzem uma história artificial do sistema. Os resultados e ponderações são coletados para então serem analisados e assim estimar o desempenho do sistema real. Devido à complexidade e o volume de informações analisadas ser muito grande os modelos de simulação do mundo real são executados por computadores.

Segundo Nance (1993) e McGinty (2001), a simulação de eventos discretos é utilizada para modelar sistemas que alteram de estado em um ponto discreto no tempo em função de um evento particular ocorrido. O estado do sistema é descrito por todos os valores individuais de estados dos objetos no sistema. Como exemplo, um sistema pode ser descrito pelo estado de dez máquinas, cada uma tendo o estado ocupado (1) ou ocioso (0). O estado do sistema será descrito pelo estado de cada máquina individual.

Ainda segundo os autores, um evento é uma ocorrência instantânea no tempo que pode causar mudança no estado do sistema. Eventos podem ser desencadeado por uma condição, um tempo decorrido ou outra cadeia de eventos. Simulações de eventos típicas incluem, por exemplo, a chegada de entidades, falha de recursos e conclusões de atividades.

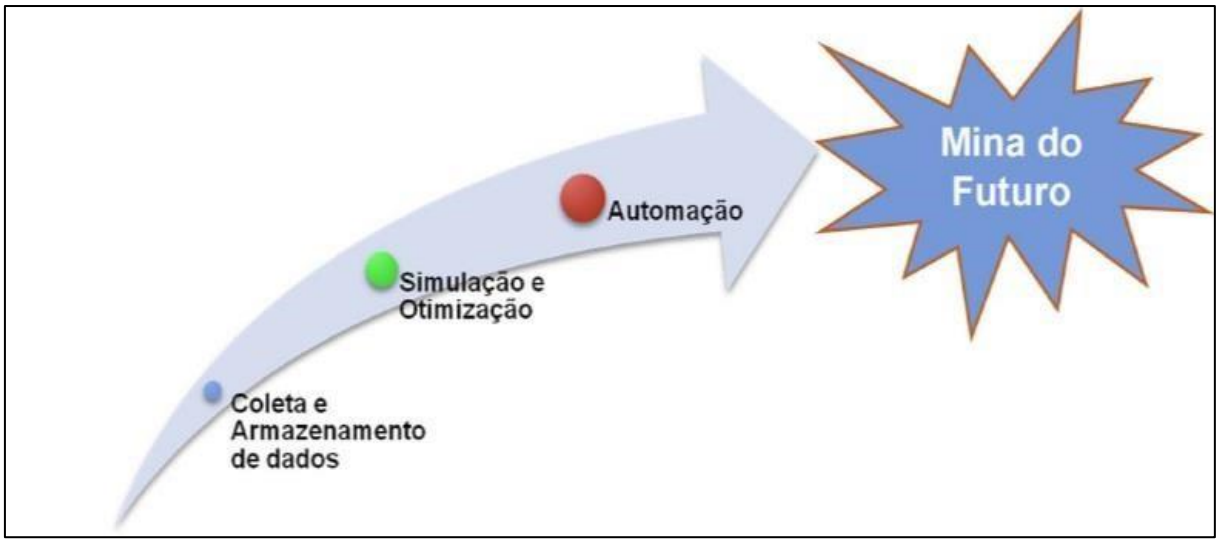
Uma planta de processamento de aço é um exemplo de sistema que pode ser representado por simulação discreta. O material chega para ser processado na planta em um ponto discreto no tempo. Cada parte é processada por vários equipamentos, transportada entre estações, colocada em um armazém, empacotada e enviada. O tempo de começo e fim de cada uma das atividades representa o ponto no tempo em que o estado do sistema muda (uma máquina passa de ocupada para ociosa, uma fila passa de vazia para cheia, etc.)

2.12 Internet das coisas na mineração

Grandes esforços têm sido usados na inovação, criação de sistemas e metodologias mais eficientes de produção, como a disseminação no cenário atual de tecnologias de big data, internet das coisas, entre outros (BNDS, 2016).

Nesse sentido, sistemas de controle e automação, sensoriamento estão sendo utilizados na implantação e desenvolvimento do conceito da chamada mina autônoma, ou seja, uma mina do futuro, ilustrada na Figura 7. Essa nova tendência de operações autônomas de equipamento de transporte e lavra já é realidade, como no caso da mineradora australiana Rio Tinto, que utiliza esse novo conceito em uma de suas minas. As grandes mineradoras têm voltado a atenção para esse aspecto, buscando a operação automatizada e integração dos equipamentos da operação de mina, por meio de centrais de controle (BNDS, 2016).

Figura 7 – Futuro modelo de mina com operação autônoma.



Fonte: Freitas (2015).

Bankblom (2010) apud Freitas (2015) desenvolveu um estudo conceitual sobre o ponto de vista de uma mina futurística, para 2030, algo comum para empresas globais responsáveis por suprir soluções para a pesquisa e automação da área de tecnologia mineral e engenharia, para indústrias mineradoras, cujo o foco é para lavra subterrânea, abrange os seguintes pontos relacionados à perspectiva da mineração do futuro:

1. Atingir índice de acidente zero;

2. Através da diminuição de emissão de gás carbônico, do consumo energético e redução de perdas e diluição na lavra, colaborar com a sustentabilidade na mineração;

3. Por meio de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, sendo esses um dos responsáveis por alterar a configuração da indústria mineral de unicamente mecanizada para uma indústria que tem domínio total dos seus processos, manter a produtividade e competitividade.

A Figura 8 demonstra de maneira geral a visão proposta no estudo mencionado, elencando as particularidades principais de uma mina do futuro, conforme sequência (FREITAS, 2015):

- Sala de controle: o acompanhamento da operação na sala de controle, assim como em qualquer outro local que seja exigido, ocorre em tempo real através de câmeras, sensores e métodos de imageamento. Informações processadas online como qualidade do minério, dos equipamentos e máquina, da equipe técnica são fornecidas para a sala de controle, sendo possível a partir disso promover adequações em toda operação, desde a fase de caracterização mineralógica até obtenção do produto final.

- Nenhuma presença humana nas áreas de produção: os processos operacionais em sua totalidade são automatizados e controlados remotamente. As manutenções preventivas são realizadas por robôs especializados, que garantem continuidade das atividades de forma segura, sendo esses executados no subsolo com estruturas reforçadas. O uso de combustível fóssil, no caso o diesel é dispensado, uma vez que os equipamentos são elétricos.

- Escavação mecanizada contínua: Na mineração do futuro o fluxo contínuo é um ponto fundamental para a automatização e otimização das operações, ou seja, essa nova visão de mineração é caracterizada por ser um processo constante, mesmo em operações mecânicas em rochas competente.

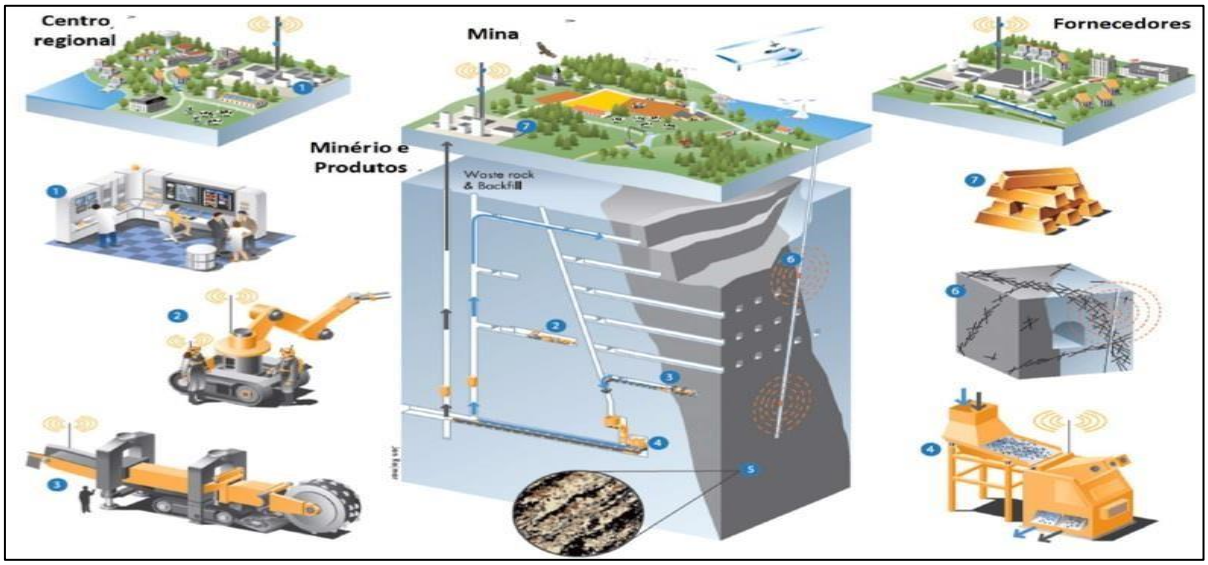
- Pré-concentração: para reduzir o impacto ambiental superficial, assim como a energia imprimida no transporte, o estéril é separado no subsolo.

- Caracterização mineralógica: sistemas são utilizados para que permitam o monitoramento geometalúrgico dos produtos e minérios, bem com a maximização do valor inerente às rochas.

- Caracterização estrutural: sistemas que permitam descrever descontinuidade estruturais da rocha são utilizados, o que contribui com o controle do processo de lavra.
- Produto final: o estéril sob uma perspectiva sustentável deve ser transformado em um subproduto, a obtenção do produto final (os metais) deve ocorrer

internamente, ou seja, na própria mina, com o propósito de evitar transporte desnecessário. Dessa forma o valor agregado gerado pela operação vertical da mina potencializa a qualidade de vida local.

Figura 8 – Layout de mina do futuro e suas principais particularidades.



Fonte: Adaptado de Bäckblom (2010) *apud* Freitas (2015).

Em síntese, operações autônoma exigiram progressos com relação a categorização do recursos minerais, a perspectiva é que surjam novas ferramentas de alta precisão, que se comuniquem umas coma as outras, que utilizem tecnologia de big data, além de outros fatores, voltadas ao mapeamento das frentes de lavra, capazes de fornecer informações sobre as descontinuidades existentes no maciço, composição química, características mineralógica, entre outras. Os sensores serão parte integrante dos sistemas de gerenciamento das operações, os equipamentos de escavação irão fornecer visualização online das frentes de lavra, através de sensores embarcados e as informações serão repassadas a todo momento por redes wireless, permitindo atualizações contínuas em tempo real de mapas de minas por exemplo. As informações serão coordenadas e atualizadas automaticamente, isso permitirá progressos dos sistemas de despacho atuais (FREITAS, 2015).

3 CASO DE APLICAÇÃO

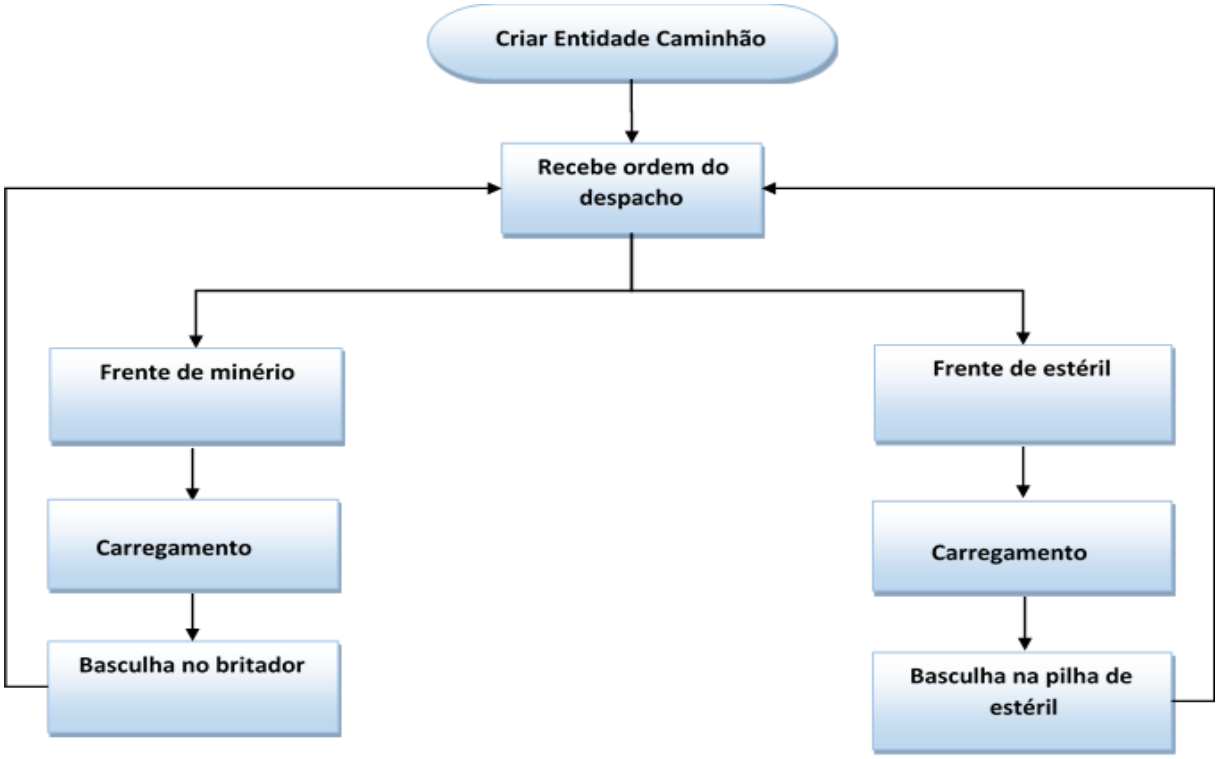
Neste capítulo, é feita uma descrição da mina em estudo. A qual tem uma operação de 24 horas por dia, com três turnos de trabalho, sendo que cada turno tem duração de 8 horas de trabalho.

Trata-se de uma mina subterrânea de metais não-ferrosos localizada no noroeste de Minas Gerais, cujo método de lavra é sublevel stopping compostas por operações auxiliares, as quais são responsáveis pelas construções e manutenções das infraestruturas da mina, e operação principais, responsáveis pelo desmonte, carregamento e transporte do material para diferentes destinos.

Todas as operações executadas na mina operam com base em um plano de lavra mensal, onde são designadas todas atividades a serem executadas no decorrer do mês, como a frentes de lavra, movimentações de material, entre outros. A mina operava no período de estudo com uma frota de 16 caminhões e 7 carregadeiras.

A operação de mina é composta por um sistema informatizado de despacho, onde consegue controlar e alocar os equipamentos, assim como as frentes de serviço. O software é alimentado a partir da digitalização manual dos operadores, os quais são preenchidos durante a operação das atividades, onde é detalhado todos os eventos durante o turno e as respectivas horas produtivas, improdutivas e manutenção.
O fluxograma na figura 10 foi desenvolvido com o intuito de exemplificar a metodologia proposta de desenvolvimento do processo de simulação, e principalmente auxiliar na construção do modelo de simulação computacional.

Figura 9 – Modelo conceitual para aplicação do modelo proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional no qual 3 cenários distintos foram avaliados, após sua validação. No capítulo 4 são apresentados os detalhes referentes ao desenvolvimento do modelo e os resultados alcançados a partir sua execução são descritos no capítulo 5.

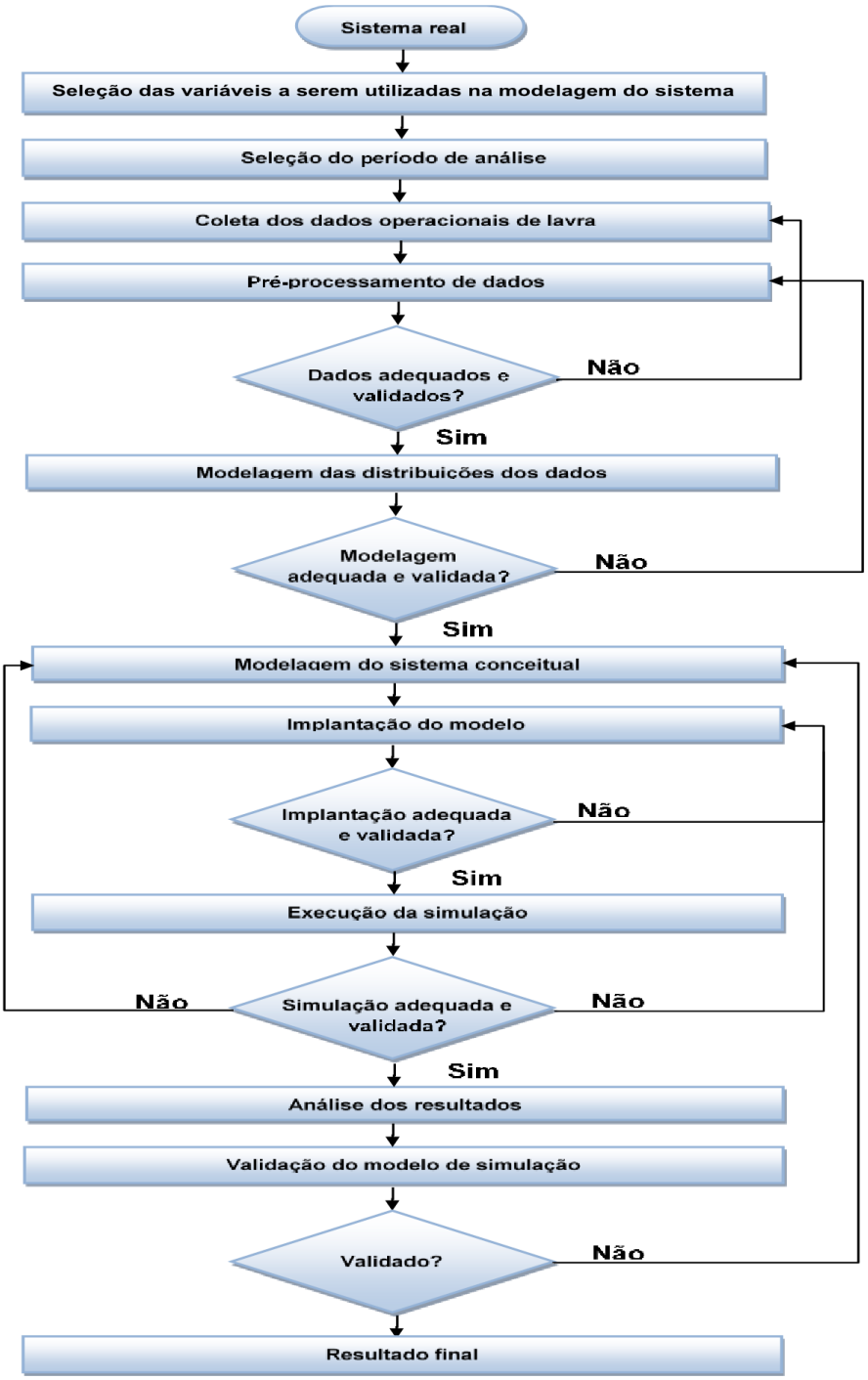
Na sequência são apresentadas as etapas que foram seguidas para a construção e validação do modelo.

4 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica indicou que existem abordagens distintas inerente a criação de um modelo de simulação. Dessa forma, é apresentado neste capítulo a metodologia da pesquisa que resultou no desenvolvimento do modelo de simulação computacional, bem como as fases de seu desenvolvimento. O processo de simulação construído para esse trabalho se apoia nos trabalhos de Chwif e Medina (2010) e Pedgen (1995) apud Botter (2002), para a execução da pesquisa a partir da aplicação de um simulador.

Para a construção do modelo de simulação computacional do sistema produtivo da mina em estudo, foram executadas as fases apresentadas na Figura 10, edetalhadas a seguir.

Figura 10 – Modelo de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sistema real: sistema do mundo real o qual é foco de estudo. Conforme foi mencionado no capítulo.

Seleção das variáveis a serem utilizadas na modelagem do sistema: definição correta das variáveis a serem utilizadas no modelo. A fim de eliminar o gasto de tempo com dados errados para objetivos distintos. Foram verificadas e quantificadas

as variáveis principais inerentes ao sistema real, como meta de produção a ser atingida, horas por viagem do equipamento de transporte, toneladas por viagem, horas de manutenção, tempo de carregamento e descarregamento, capacidade dos caminhões, disponibilidade e utilização física.

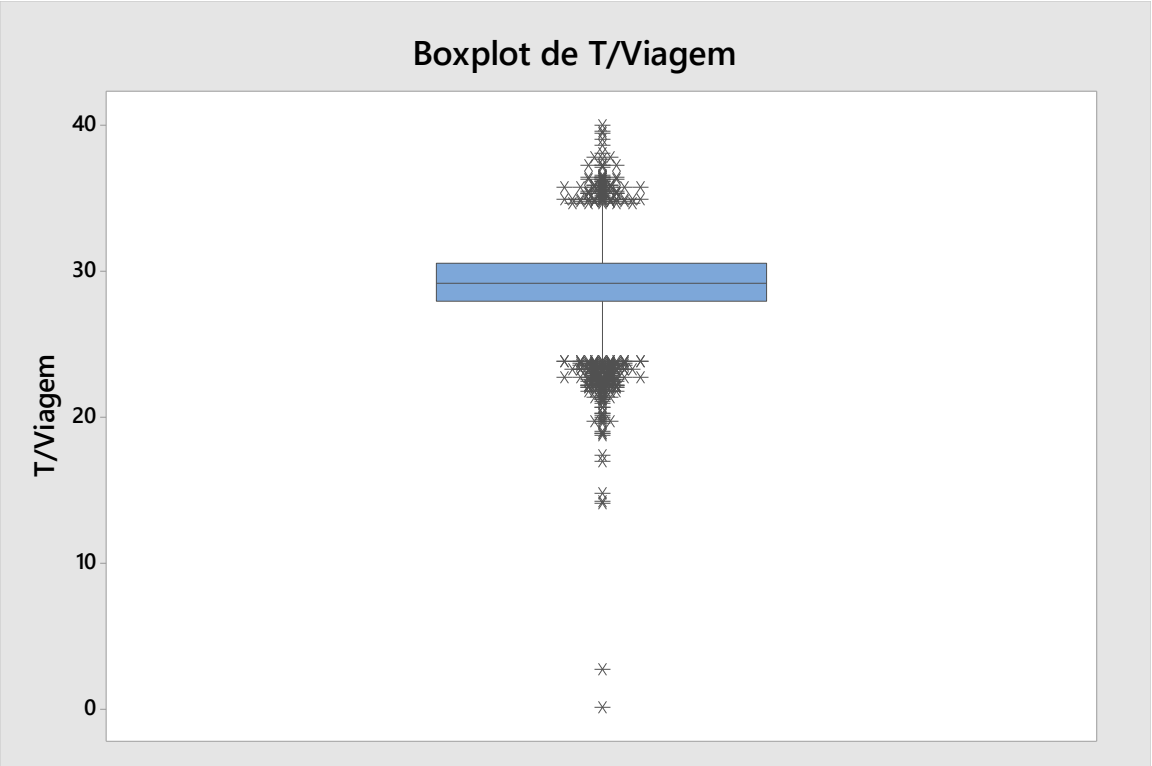
Seleção do período de análise: definição do período de análise dos dados a serem usados na simulação. Foi definido o período de quatro meses de operação, sendo 3 meses para coleta e validação e o quarto destinado para simulação e avaliação do modelo.

Coleta dos dados operacionais de lavra: identificação e definição de quais dados da operação de lavra entram no modelo, além de preparação para aquisição dos mesmos. Esses foram levantados a partir de um banco de dados de produções referentes a três meses, devidamente organizados em uma planilha em formato xlsx.

Esses dados foram coletados em campo e registrados manualmente na parte diária pelos operadores e alimentados no sistema de despacho. A forma de registros manual dos dados possibilita erros durante o processo. Sendo assim, estes dados foram tratados de forma a validá-los e aplicá-los no modelo de simulação.

Pré-processamento dos dados: preparação dos dados coletados que serão a entrada do simulador, levando em conta a importância da qualidade dos mesmos no modelo. A limpeza dos dados, como registros faltantes, dados duplicados e discrepantes entre outros, é crucial para se obter dados de saída corretos de um modelo. Os dados foram analisados com o intuito de investigar a sua regularidade, ou seja, avaliar a existência de células vazias (espaços em branco), dados duplicados e dados discrepantes que possivelmente são resultados de erro de coleta. Foi usado o gráfico de caixas (*Box plot*) (Figura11).

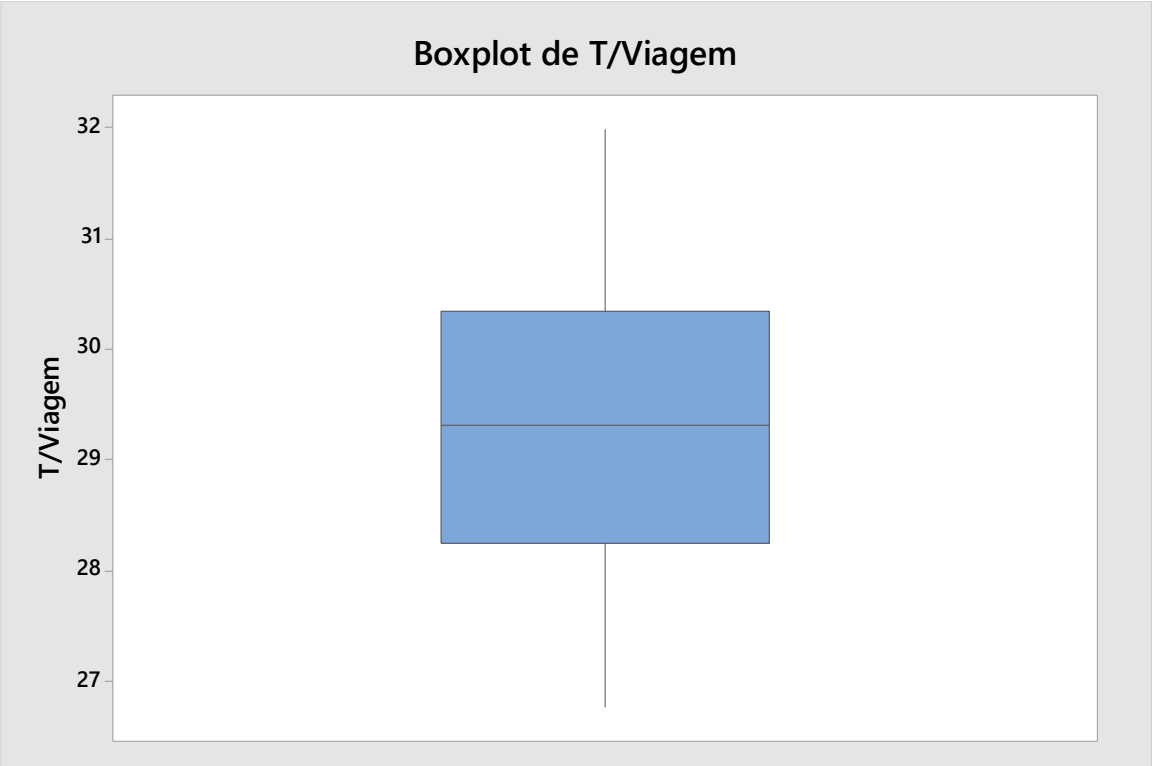
Figura 11 – *Boxplot* dos dados originais referentes à quantidade de toneladas transportadas por viagem pelos caminhões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a limpeza dos dados foi feito um corte no percentil 10% e 90%. Onde foram removidos os valores que estavam contaminando a análise do sistema, conforme Figura 12.

Figura 12 – *Boxplot* dos dados após tratamento referente à quantidade de toneladas transportadas por viagem pelos caminhões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a limpeza, foi verificado o comportamento dos dados, avaliando a qual distribuição teórica de probabilidade segue cada conjunto de dados. No caso desse estudo, os dados avaliados não seguiram uma distribuição teórica específica, logo foi assumida uma distribuição normal para ser alimentada no modelo de simulação.

Modelagem do sistema conceitual: nesta etapa foi desenvolvido um modelo simplificado, que represente o sistema do mundo real. Foram selecionados os detalhes que são de maior relevância/críticos para que o sistema seja caracterizado, e o seu funcionamento fique com maior clareza, uma vez que nesta fase não se pode incluir todos os detalhes. Este é um processo interativo, em que o modelo deve ser validado para assegurar que ele represente corretamente o sistema em estudo

Implantação do modelo: nesta etapa foi realizado o desenvolvimento de um modelo em linguagem computacional. O modelo conceitual é transformado em um modelo computacional por meio uso de software especializado. Após a construção domodelo

computacional foi realizada uma comparação com o modelo conceitual para se verificar se o funcionamento do sistema no computador está de acordo com o que foi determinado na etapa de concepção, avaliando se o modelo representa a realidade. Este também é um processo interativo, onde cada passo executado deve ser verificado na simulação a fim de certificar se o sistema funciona conforme o previsto durante sua concepção.

O modelo de simulação do sistema da mina foi desenvolvido baseado no modelo conceitual apresentado no capítulo de estudo de caso. *No programa de simulação utilizado para desenvolver o modelo, os caminhões são considerados entidades enquanto que os elementos tais como carregadeiras, britador, são recursos*.

Execução da simulação: são realizados experimentos, ou seja, são feitas inúmeras rodadas do modelo para explorar o sistema. Nessa fase, que pode ser vista como a implantação final do modelo computacional, é incluída a animação, recurso visual que auxilia tanto na identificação de erros no modelo construído, quanto na validação deste, dependendo de sua complexidade.

Análises dos resultados: a partir dos experimentos do simulador, os resultados alcançados são analisados com o intuito de realizar inferências, previsões ligadas ao comportamento e desempenho do sistema real estudado, onde é aplicado também um tratamento estatístico, da mesma forma que no sistema real, uma vez que esses modelos de forma geral demonstram comportamento semelhante aos sistemas que estão sendo imitados.

Validação do modelo de simulação: nesta fase é certificado se o modelo em estudo funciona da forma prevista, ou seja, é o processo onde se garante a credibilidade do estudo de simulação. O resultado de saída do modelo, além de ser confiável, deve representar de forma fiel o sistema do mundo real que está sendo simulado.

O modelo de simulação computacional do sistema real da mina em estudo foi validado a partir de análise comparativa entre os resultados obtidos na simulação e o histórico de produção realizado na mina, nos meses de Dezembro de 2017 a Fevereiro de 2018.

Os dados utilizados para a comparação e validação do modelo, ou seja, referente a produção dos três meses mencionados anteriormente, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de produção da mina: Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

	DEZEMBRO	JANEIRO	FEVEREIRO
MOVIMENTAÇÃO TOAL (t)	177 355	167 058	144 654

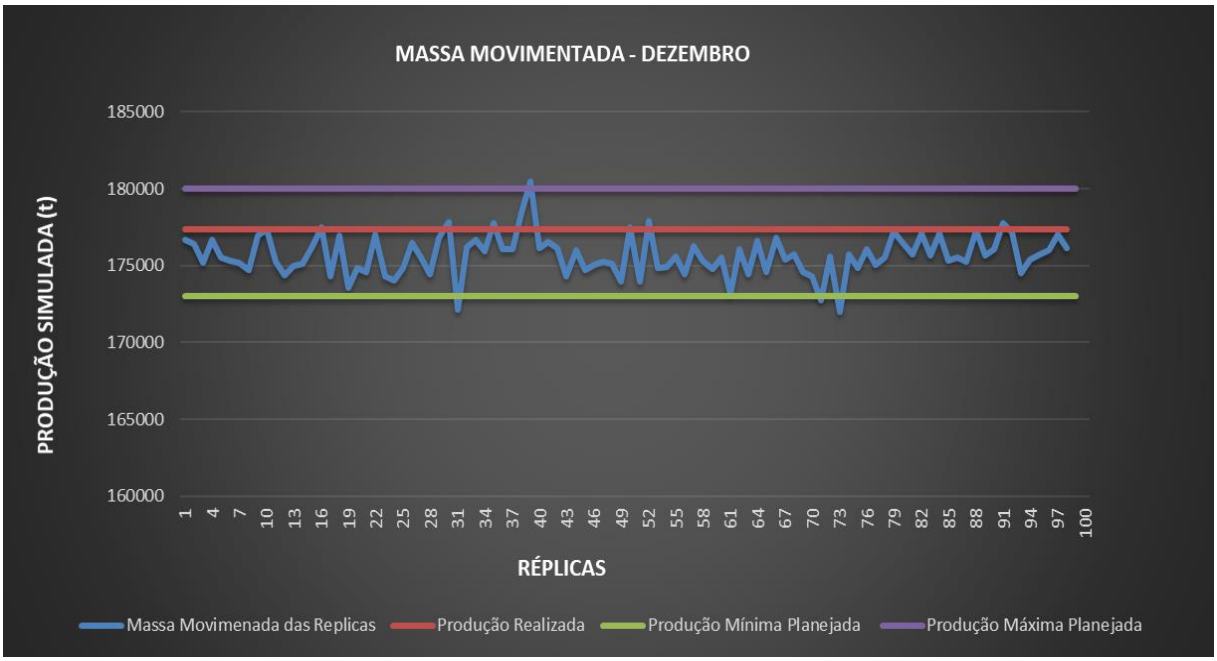
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram comparados três cenários de movimentação de massas na mina, para a validação do modelo de simulação, referentes aos meses de Dezembro de 2017, Janeiro e Fevereiro de 2018.

Durante a execução do modelo foram realizadas 100 replicações para os respectivos cenários. Sendo que estes tinham os períodos de execução de 700, 660 e 580 horas referentes aos três meses citados.

São apresentados nas Figuras 13, 14 e 15 os resultados alcançados a partir da simulação, assim como suas análises estatísticas nas Tabelas 2, 3 e 4.

Figura 13 – Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de dezembro.



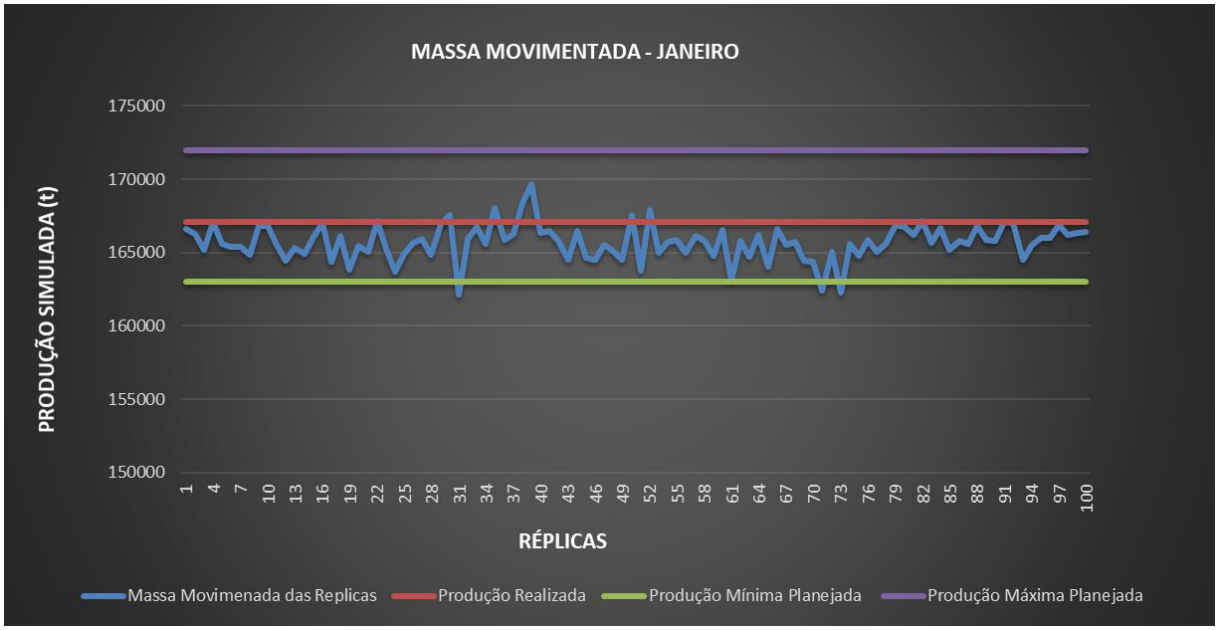
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2. Análises estatísticas referentes ao mês de dezembro.

	PRODUÇÃO (t)
Média da Movimentação Simulada	175,693
Movimentação Mínima Simulada	172,018
Movimentação Máxima Simulada	180,504
Erro	0.937

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de janeiro.



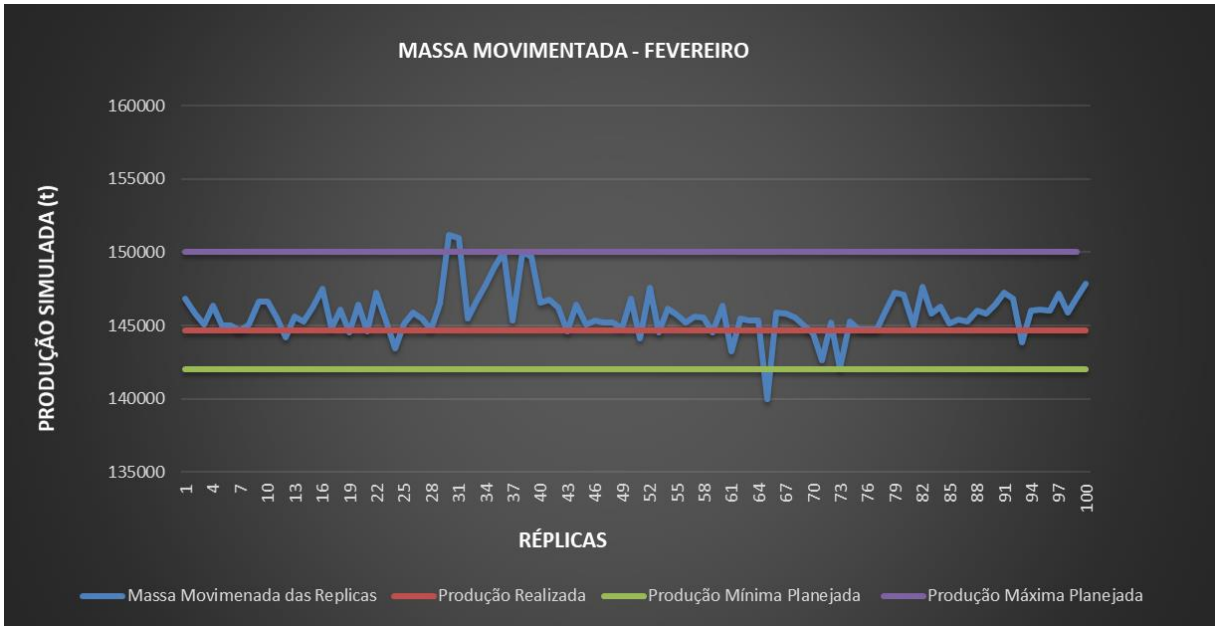
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3. Análises estatísticas referentes ao mês de Janeiro.

	PRODUÇÃO (t)
Média da Movimentação Simulada	165,712
Movimentação Mínima Simulada	162,120
Movimentação Máxima Simulada	169,682
Erro	0.806

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Análise entre a massa total simulada e a massa total realizada referente ao mês de fevereiro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4. Análises estatísticas referentes ao mês de Fevereiro.

	PRODUÇÃO (t)
Média da Movimentação Simulada	145,677
Movimentação Mínima Simulada	142,120
Movimentação Máxima Simulada	149,692
Erro	0.707

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que para os três meses, os resultados das massas movimentadas simuladas estão dentro do limite da produção planejada. Nota-se que, em Dezembro foi verificado um erro de 0.937 quando comparado com a produção realizada. Para o mês de Janeiro, foi verificado um erro de 0.806 em relação a produção realizada. E em Fevereiro o erro verificado foi de 0.707 após comparação com a produção realizada. A partir dos resultados obtidos, nota-se que a variação entre as movimentações analisadas é pequena, o que permite considerar o modelo validado, uma vez que o modelo está representando de forma satisfatória os dados registrados. Após essa constatação, é possível ir para a etapa de implementação do modelo, ou seja, execução de cenários a fim de testar a sensibilidade do modelo.

Resultado final: nesta etapa é verificada a sensibilidade da resposta do modelo quando esse é submetido a mudanças. Conclusões podem ser tiradas por meio dos resultados obtidos, sendo possível se necessário promover mudanças no modelo caso o resultado da simulação não for o esperado e reiniciar o processo novamente. Para a implementação do modelo foram testados 3 cenários de movimentação de massas na mina em estudo.

O tempo de simulação aplicado foi de 596 horas para os cenários 1 e 3, já para o cenário 2 a duração foi de 480 horas.

Para esse estudo, foram definidos os 3 cenários a serem apresentados na sequência, em função do objetivo de análise estabelecido, entretanto isso não impede que sejam testados inúmeros outros cenários.

Tabela 5 – Cenários e objetivos.

Cenário	Recursos	Tempo (h)	Objetivo	Replicações
1	14 caminhões, 7 LHDs, 1 ROM, 1 pilha de deposição de estéril (PDE).	596	- Provar a exequibilidade da movimentação de massa planejada para o mês simulado; - Avaliar a utilização física dos caminhões; - Prever a capacidade produtiva do sistema atual.	100
2	14 caminhões, 7 LHDs, 1 ROM, 1 PDE.	480	- Avaliar a exiquibilidade do plano em menos tempo de operação.	100
3	16 caminhões, 7 LHDs, 1 ROM, 1 PDE.	596	- Prever a capacidade máxima de produção (t) usando toda a frota disponível;	100

			- Avaliar quanto seria possível alcançar além da meta estabelecida para o mês simulado.	

Fonte: Elaborado pelo autor.

No capítulo 5 são apresentados os resultados dos respectivos cenários.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentada uma análise das movimentações de massas nos cenários 1 e 2, com base na movimentação planejada para o mês subsequente. O cenário 3, apresentado na sequência, também se refere ao cumprimento de massa do quarto mês.

Os resultados obtidos a partir das simulações referentes aos três cenários são apresentados nas Figuras 16 à 19.

5.1. CENÁRIOS 1 e 2- Verificação da movimentação de material com quatorze caminhões, sete equipamentos de carregamento, um ponto de descarga na PDE e um no britador

Conforme mencionado anteriormente, o cenário 1 baseou-se na movimentação de massa. Esse cenário teve como propósito analisar o nível de cumprimento/exequibilidade da meta de movimentação de massa estabelecida para o plano de abril (Mês 4), além de analisar a utilização dos caminhões e prever a capacidade produtiva do sistema.

Foram executadas 100 replicações para o cenário 1, com o tempo de simulação de 596 horas, ou seja, período máximo de operação das máquinas de transporte.

Já para o cenário 2 foi aplicado exatamente o mesmo processo adotado no cenário anterior, entretanto, para esse cenário a duração da simulação foi de 480 horas. Esta redução no tempo de simulação teve o intuito de analisar o comportamento dos resultados, observando-se que o plano possivelmente poderia ser cumprido na sua totalidade a partir do cenário 2, mesmo que em menor quantidade de tempo.

5.2. CENÁRIO 3- Verificação da movimentação de material com dezesseis caminhões, sete máquinas de carregamento, um ponto de descarga na PDE e um ponto no britador

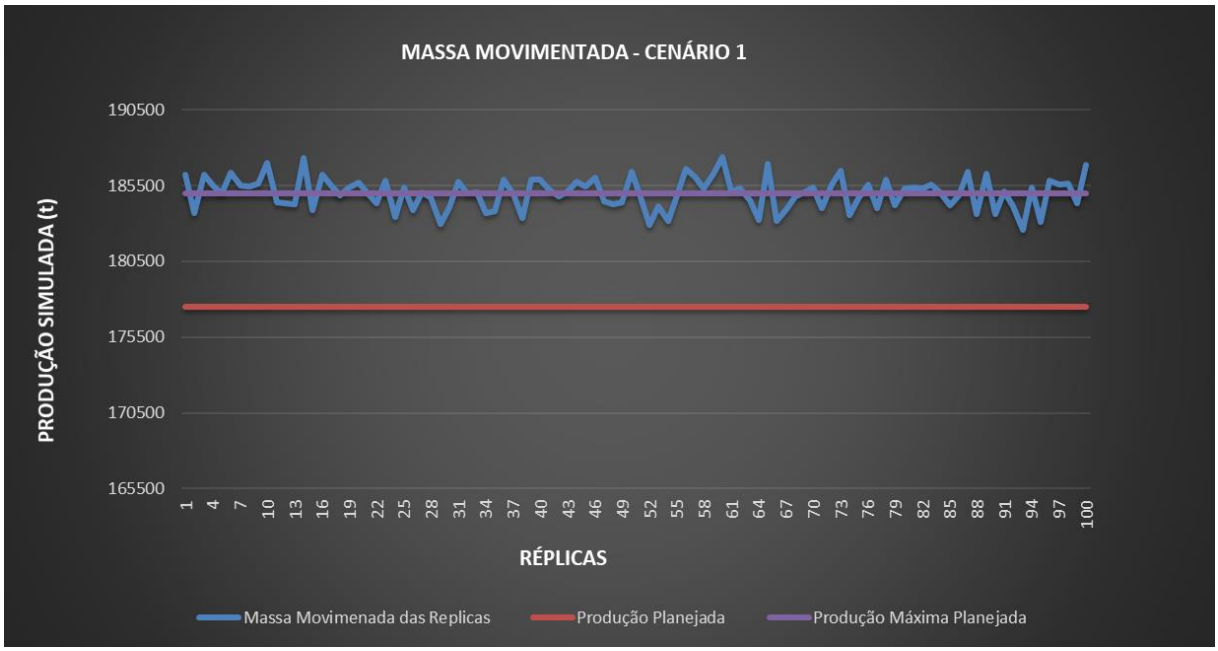
O objetivo na execução deste cenário foi incrementar a produção, ou seja, prever a máxima capacidade produtiva em toneladas usando toda a frota de caminhões

disponível, assim como, avaliar o quanto além da meta estabelecida para o mês de abril poderia ser atingida e assim demonstrar a capacidade produtiva do sistema.

Para tanto, a movimentação de material foi executada com base em dezesseis caminhões, com tempo de simulação de 596 horas. Os resultados alcançados após execução dos cenários, como produções e utilização dos caminhões são apresentados nas Figuras 16, 17, 18 e 19.

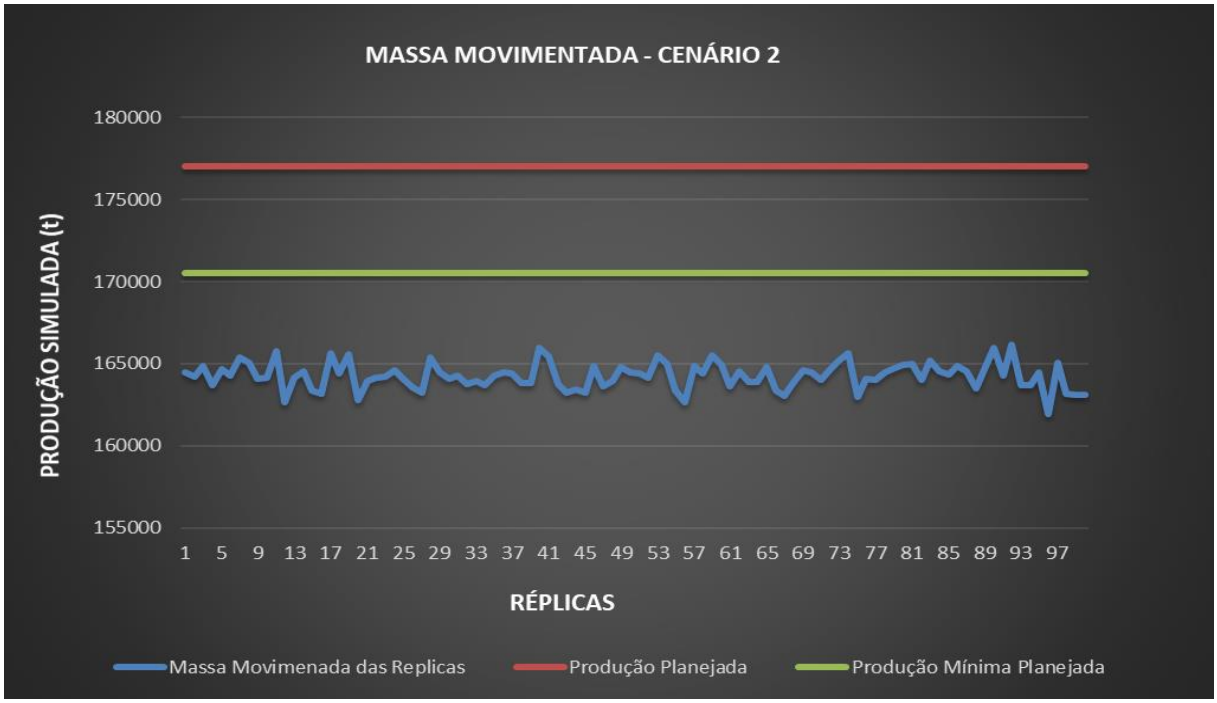
As Figura de 16 à 18, assim como a Tabela 6 apresentam os resultados referentes as produções em função das réplicas simuladas, acompanhada da produção planejada, meta mínima e máxima para o mês de abril, para os cenários 1, 2 e 3.
Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 1.

Figura 16 - Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 1.



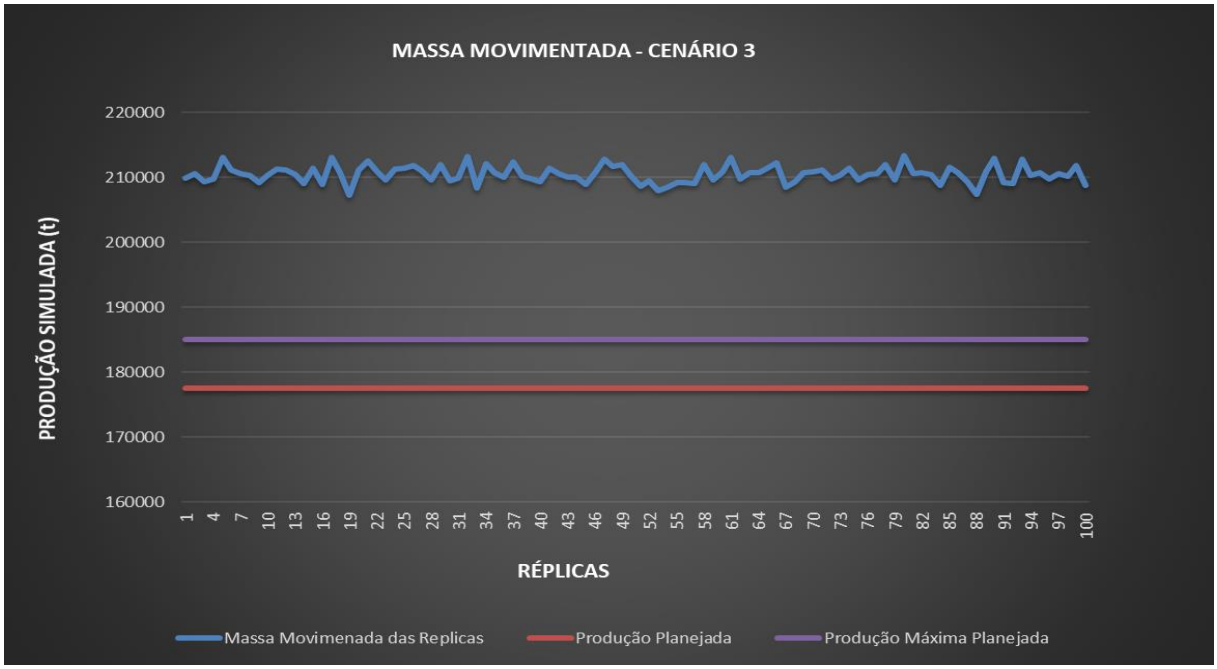
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Análise entre a massa simulada e a massa planejada referente ao Mês 4 – Cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6. Comparativo entre as movimentações simuladas em cada cenário e as movimentações planejadas para o Mês 4.

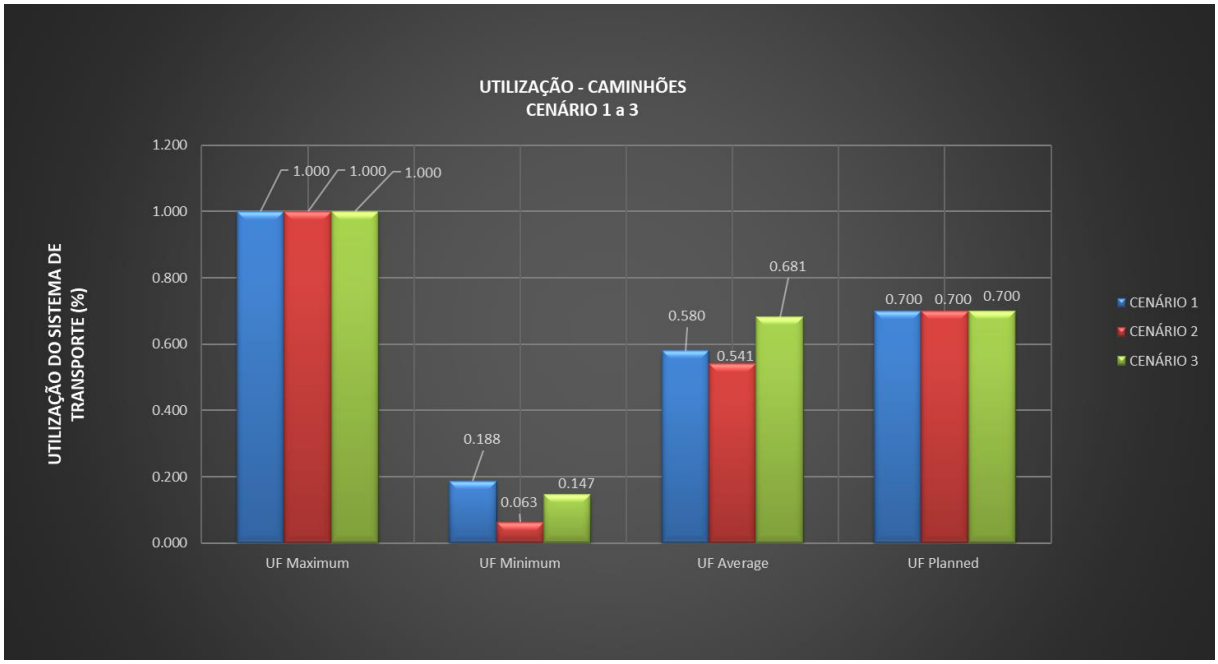
CENÁRIO	PRODUÇÃO (t)	DESVIO (%)
1	185,012	1.4
2	164,271	-7.45
3	210,520	18.60
PLANEJADO	177,500	
MÁXIMO PLANEJADO	185,000	
MÍNIMO PLANEJADO	170,500	

Fonte: Elaborado pelo autor.

As médias das produções referentes às simulações dos três cenários e produção planejada, são apresentadas na Tabela 6. Assim como, são apresentados, em percentual, os desvios em relação ao planejado.

As taxas de utilização dos caminhões para os cenários 1, 2 e 3 são demonstradas na Figura 19.

Figura 19 - Análise da utilização física para os 3 cenários avaliados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 6, verifica-se que o cenário com a maior produção média é o 3, com cerca de 18,6% acima do planejado, seguido do cenário 1 com 1,4%. Já à produção média do cenário 2 apresenta um desvio de -7,45% comparado ao planejado, sendo considerado um baixo desvio, estando dentro do limite de mínimo e

máximo planejado. Além disso, o cenário 2 foi executado com um tempo de simulação de 480 horas, indicando que um possível aumento no tempo de simulação resultaria no alcance das metas planejadas, mesmo que em menor tempo operacional.

É possível afirmar com base nas Figuras 16, 17, 18 e 19 que a produção do cenário 1, alcançou a movimentação planejada, demonstrando um aumento de 1,4%, conforme já mencionado. Outra importante observação é a de que o cenário 1 demonstrou que a utilização física dos equipamentos de transporte pode ser aumentada em aproximadamente 8%, ainda que no cenário atual.

A produção do cenário 2 atingiu aproximadamente a produção planejada, considerando que a duração da simulação foi de 480 horas. Os resultados alcançados levam ao cumprimento das metas do plano, porém com baixa utilização em relação aos demais cenários.

Já o cenário 3 demonstra movimentação maior, quando é comparado com os demais cenários simulados, uma vez que esse foi executado com toda a frota disponível na empresa (dezesseis caminhões). Esses resultados levaram ao aumento na produção de 18,6%, com aumento considerável da utilização dos equipamentos de transporte em relação ao cenário 1 e 2 (18,1% acima do cenário atual).

6 CONCLUSÕES

A técnica de simulação demonstrou ser uma ferramenta de grande ágil e poderosa no apoio à tomada de decisão, ideal para ser usada em análises de sistemas produtivos que possuam alta complexidade, como é o caso da mineração de pequena escala.

Após o modelo ser considerado válido, inúmeros testes de cenários alternativos podem ser executados em um curto espaço de tempo, o que permite aos responsáveis na equipe de planejamento e operação tomadas de decisões mais realísticas, além de identificar e selecionar as melhores estratégias para a operação em análise.

Por sua flexibilidade, a simulação permite reconhecer fatores que podem ter colaborado para o não cumprimento de metas estabelecidas pelo plano em operações no passado, possibilitando a correção destes fatores, com o intuito de melhorar o sistema futuro e não cometer os mesmos erros.

O modelo criado neste trabalho mostrou que é possível que vários cenários sejam avaliados, com diferentes propósitos, permitindo selecionar qual o melhor para a operação.

De acordo com os resultados alcançados e apresentados:

- Foi possível comprovar a exequibilidade do plano de lavra elaborado pela empresa.
- A simulação também permitiu verificar que é possível atingir uma maior utilização da frota de transporte, mesmo que no cenário atual.
- Observou-se que o cenário 3 é o mais atrativo, operando com dois caminhões a mais, resultando em um aumento considerável da produção de 18,6%, quando comparado com a produção planejada para o cenário atual;
- As análises mostraram que é possível atingir uma maior utilização da frota de transporte, mesmo que no cenário atual;
- O cenário 2 demonstrou que mesmo em menor tempo de operação (480 horas) o sistema tem condições de alcançar a produção desejada, ou seja, a simulação evidenciou que o sistema avaliado tem capacidade produtiva acima do planejado.

Para continuidade dessa pesquisa, recomenda-se que seja implementado na companhia o uso da técnica de simulação de eventos discretos na rotina diária do planejamento de lavra, pois sua inserção se tornaria facilitadora na análise do sistema produtivo, permitindo avaliações coerentes acerca do sistema produtivo real da mina, com o propósito de atender as metas planejadas, identificar ineficiências, simular

novas alternativas de cenários e, a partir deles, ter informações suficientes para tomar decisões de forma mais segura e realísticas.

Já para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizadas análises simulando cenários de movimentação de massas, considerando também mudanças na quantidade de frentes de trabalho, além de observar as capacidades produtivas de equipamentos de perfuração e carregamento, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, H; SCOBLEA, M; DUNBARA W. S. **A comparison between Offset Herringbone and El Teniente underground cave mining extraction layouts using a discrete event simulation technique**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 30, n. 2, p. 71-91, 2016.

AKKOYUN, O; CAREDDU, N. **Mine simulation for educational purposes: A case study.** Computer Applications in Engineering Education. v. 23, n. 2, p. 286 – 293, mar. 2015.

ANANI, A; AWUAH, K. O; HIRSCHI, J. **Application of discrete event simulation in optimising coal mine room-and-pillar panel width: a case study.** Mining Technology. v. 126, n. 1, p. 1 – 9, jan. 2017.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Desenvolvimento e inovação em mineração e metais.** 2016.

BANKS, J.; GIBSON, R. R. **Don't Simulate When... 10 Rules for Determining when Simulation is Not Appropriate.** IEE Solutions. Set. 1997.

BASU, A. J; BAAFI, E. Y. **Discrete event simulation of mining systems: Current practice in Australia.** International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 13, n. 2, p. 79 – 84, 1999.

BOTTER, R. C. **Tratamentos de Dados em Modelos de Simulação Discreta.** 147 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CECILIANO, Wellington Rodrigo Aparecido. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro.** Dissertação de Mestrado. Sistemas Logísticos. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações.** 3. ed. São Paulo: Bravarte, 2010.

CRAIN, R. C. **Simulation using gpss/h.** In: PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE, p. 15-20, Anais... 1997.

CREMONESE, D.T; AMICIS, M; TOMI, G.F. **Dynamic Simulation Applied to Mining.** 36th Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Porto Alegre, nov. 2012.

CREMONESE, D.T; TOMI, G.F. **Desafios para a Gestão Operacional de Perfuração em Minerações Subterrâneas.** 7° Congresso Brasileiro de Mina a Céu

Aberto & 7° Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea e no Workshop “Benchmarks em operação de minas”, Belo Horizonte, 2012.

FREITAS, S. B. M. **Planejamento estocástico de lavra: metodologias de simulação, otimização e gestão de risco para a mina do futuro.** 181 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GIGNAC, L. P. **Simulation of Rock-Handling Systems for Sub-level Stoping, Design and Operation of Caving and Sublevel Stoping Mines**. In: ____. SME, New York, 1981. p. 693 – 702.

GUIMARÃES, I. F; PANTUZA JR, G; SOUZA, M. J. F. **Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto**. XIV Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP, Bauru, 2007.

HOLLBERG, K.F; GRAEHL, D; DESPAIN, L. **Application of Simulation Technology to Underground Production**. SME Annual Meeting, Phoenix, p. 1-8, 2002.

KELTON, D. W; SADOWSKI, R. P; ZUPICK. B. N. **Simulation with ARENA**. 6. ed. McGraw-Hill, 2015

KNIGHTS, P. F; BONATES, E. J.L. **Applications of discrete mine simulation modeling in South America**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 13, n. 2, p. 69 – 72, 1999.

LAW, A. M; KELTON, W. D. **Simulation modelling and analysis**. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000.

LAW, A; MCCOMAS, M. **Secrets of successful simulation studies**. Proceedings of 1991 Winter Simulation Conference, Phoenix, p. 21-27, 1991.

MARIN, T. **Impacto da variabilidade operacional na execução do plano de lavra**. 88 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MARIN, T; TOMI, G. F. C. **Modelagem de dados de entrada para simulação estocástica de lavra**. Revista Escola de Minas, v. 63, n. 3, p. 559-562, 2010.

MARTINS, A. G. **Simulação das operações de lavra da mina de Burucutu utilizando um modelo de programação linear para alocar os equipamentos de carga**. 95 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

MCGINTY, J. T. **Simulation Modeling for System Design and Analysis**. Part I: Principles and Guidelines. 2001.

MERSCHMANN, L. H. C. **Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MIRABEDINY, H; BAAFI, E. Y. **Stochastic Analysis of Dragline Productivity**. APCOM XXVII Conference, London, p. 631 – 641, 1998.

MIYAGI, P. E. **Introdução a Simulação Discreta**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

NANCE, R. E. **A History of Discrete Event Simulation Programming Languages**. ACM SIGPLAN Notices, v. 28, n. 3, p. 149 – 175, mar. 1993.

NETO, A. N. R; PINTO, L. R. **Template do programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto**. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 1, jan. 2004.

PAGE, E. H. JR. **Simulation Modeling Methodology: Principles and Etiology of Decision Support**. 294 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação) - Instituto Politécnico da Virgínia e Universidade Estadual, Blacksburg, 1994.

PANAGIOTOU, G. N. **Discrete mine system simulation in Europe**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 13, n. 2, p. 43 – 46, 1999.

PARK, S; CHOI. Y; PARK, HS. **Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods**. Geosystem Engineering. V. 19, n. 5, p. 222 – 231, abr. 2016.

Paul, R. J; Eldabi, T; Kuljis, J. **Simulation education is no substitute for intelligence thinking**. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, p. 1989-1993, 2003.

PEGDEN, C. D; SHANNON, R. E; SADOWSKI, R. P. **Introduction to simulation using SIMAN**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PEREIRA, S. P. **Simulação de produção em mina subterrânea por conjuntos mecanizados**. 107 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PEREIRA, S.P; COSTA, J.F.C.L; SALVADORETTI, P; KOPPE, L.C. **Simulação de produção em mina subterrânea de carvão com uso de conjuntos mecanizados**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v.63, p. 581 – 589, set. 2010.

Prado, D. **Usando o ARENA em simulação**. 3. ed. Belo Horizonte: INDG, 2008.

Prakash, S. U; ASKARI, H. N. **Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines**. International Journal of Mining Science and Technology, v. 28, n. 2, p. 153 – 166, mar. 2018.

Robinson, S. **Simulation: the practice of model development and use**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

SALAMA, A; GREBERG, J; SCHUNNESSON, H. **The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection**. International Journal of Mining and Mineral Engineering, v. 5, n. 3, 2014.

SCHMIDT, W. F. J. **Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra – Estudo de caso (Mina casa de pedra – Congonhas/MG)**. 109 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

OLALEYE, B. M and Adagbonyin, P. E. **Simulation of Loading and Haulage of Fragmented Rock in a Typical Granite Quarry in Ondo State**, Nigeria. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETTEAS) 2 (5): 884-890. Scholarlink Research Institute Journals, 2011 (ISSN: 2141-7016). Jeteas.scholarlonkreseach.org

Trends in Engineering and Applied Sciences (JETTEAS) 2 (5): 884-890. Scholarlink Research Institute Journals, 2011 (ISSN: 2141-7016). Jeteas.scholarlonkreseach.org

STURGUL, J.R. **Mine Design: Examples Using Simulation**. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2000.

STURGUL, L. R. **Discrete mine system simulation in the United States**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Moscow, v. 13, n. 2, p. 37 – 41, 1999.

STURGUL, L. R. **Modeling and Simulation in Mining – Its Time Has Finally Arrived.** Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, v. 76, n. 5, p. 286 – 288, Maio. 2001.

TARSHIZI, E; STURGUL, J; IBARRA, V; TAYLOR, D. **Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations**. International Journal of Mining Science and Technology. v. 25, n. 4, p. 671 – 674, fev. 2015.

TU, J. H; HUCKA, V.J. **Analysis of open-pit truck haulage system by use of a computer model**. CIM Bulletin, v.78, n. 879, p. 53-59, 1985.