TATIANE MARIN

IMPACTO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL NA EXECUÇÃO DO
PLANO DE LAVRA

São Paulo

2009

TATIANE MARIN

IMPACTO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL NA EXECUÇÃO DO
PLANO DE LAVRA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em engenharia.

São Paulo

2009

TATIANE MARIN

IMPACTO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL NA EXECUÇÃO DO
PLANO DE LAVRA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo

2009

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

São Paulo, 28 de abril de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Marin, Tatiane

**Impacto da variabilidade operacional na execução do plano de lavra / Tatiane Marin. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
87 p.**

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

1. Mineração a céu aberto 2. Simulação (Metodologia; Análise) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela concessão da bolsa de mestrado.

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

Às empresas envolvidas Bunge Fertilizantes, Devex Tecnologia, Metal Engenharia e Paragon pelo apoio à realização deste projeto e a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho

RESUMO

Um dos principais desafios para engenheiros de planejamento na mineração é fornecer planos de lavra que sejam exeqüíveis e que levem em conta as variabilidades operacionais da mina. Muitas vezes, os planos de lavra são criados com base nos valores médios históricos ou estimados das principais variáveis do sistema, que embora representem corretamente o ambiente de lavra, não permitem estimar o impacto de eventuais variabilidades nos resultados da operação da mina. O resultado dessa situação é uma menor confiabilidade nos planos de lavra quanto menor o horizonte de tempo planejado, o que leva a tomada de decisões operacionais muitas vezes intuitivas que nem sempre são ótimas, podendo prejudicar o atendimento das metas de longo prazo definidas pelo planejamento. Esta pesquisa propõe uma metodologia para criar planos de lavra que incorporem a variabilidade operacional, ou seja, planos exeqüíveis em conformidade com as operações unitárias da lavra, através da aplicação de técnicas de simulação. Essa metodologia é testada através de uma aplicação teórica e um estudo de caso, permitindo que a operação possa efetivamente contar com um plano que teve sua exeqüibilidade avaliada antes de sua publicação, apoiando assim o processo de tomada de decisões num ponto-chave da cadeia de produção mineral. Os resultados do estudo de caso comprovaram os benefícios práticos da metodologia de simulação proposta, permitindo fixar metas de produção mais realísticas para as condições operacionais da mina estudada, além de identificar oportunidades para a continuidade da pesquisa em temas relacionados à incorporação da incerteza geológica e à automatização do processo de simulação de lavra.

Palavras chave: Planejamento de Curto Prazo. Simulação de Lavra. Cadeia de Produção Mineral. Operação de Mina.

ABSTRACT

One of the main challenges for mine planning engineers is to produce operationally feasible mine plans which take into account the practical variability of the mining operation. It is quite common for the mining industry to work with plans that have been based on estimated means or historical values for most of the key operational variables, which although are useful to represent the mine environment, do not allow management to predict the impact of eventual variations onto the outcome of the mining operation. The result is a lower degree of confidence on the mine plans the shorter the time horizon considered, and a non-optimal decision making process that is much more oriented on experience, with a significant impact on the longer-term targets of the mine operation. This research proposes a methodology for creating mine plans that are operationally feasible and which are aligned with the practicalities of the mining operation by taking into account the operational variability of the mine. The methodology is based on simulation techniques and it is tested through a theoretical application and a case study. The outcome is a mine plan that is appropriate for the mine's operation because it has been tested through simulation prior to its publication, which represents an important contribution for the decision making process at a key position in the mine production chain. The results obtained have confirmed the practical benefits of the proposed simulation methodology, by allowing the establishment of more realistic production targets associated to the current operating conditions of the mine being studied. The outcome of the project have also allowed the identification of opportunities for further research, related to the incorporation of geological uncertainty and to the automation of the mine simulation process.

Keywords: Short Term Mine Planning. Mine Simulation. Mine Production Chain. Mining Operation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do exemplo de um sistema de processamento de correspondência.....	22
Figura 2 - Demonstração do uso de valores médios.	23
Figura 3 - Quanto maior e mais complexo o sistema, maior a aplicabilidade da simulação	24
Figura 4 - Exemplo de gráfico de caixas.	34
Figura 5 - Determinação da distribuição estatística ou inferência.	35
Figura 6 - Exemplo de gráfico de probabilidade.	36
Figura 7 - Processo de simulação proposto.	37
Figura 8 - Distribuição dos Dados de Entrada da Aplicação Didática de Simulação.	39
Figura 9 - Modelo conceitual da aplicação didática de simulação.....	40
Figura 10 - Sensibilidade da função objetivo.....	43
Figura 11 - Metodologia de determinação do nível de confiança do plano de lavra.	44
Figura 12 - Ilustração do modelo conceitual.....	48
Figura 13 - Histograma dos dados originais - tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.....	51
Figura 14 - Gráfico de caixas dos dados originais - tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.....	52

Figura 15 - Gráfico de probabilidade dos dados limpos - tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.....	52
Figura 16 - Diagrama do modelo do estudo de caso.....	56
Figura 17 - Diferença entre as médias acumuladas para 100 replicações.....	58
Figura 18 - Resultados da simulação com as metas do planejamento.	61
Figura 19 - Histograma do resultado das 100 replicações, da simulação do estudo de caso.....	62
Figura 20 - Metas sugeridas para se obter um plano com um nível de confiança maior e resultados da simulação do estudo de caso.....	63
Figura 21 - Proposta de processo de avaliação contínua do Plano de Lavra.	64
Figura 22 - Estado de um equipamento que falha, de forma diferente, durante o atendimento de uma entidade.....	66
Figura 23 - Metodologia para redução de variabilidade de uma variável indicatriz. ..	69
Figura 24 - Gestão de dados inconsistentes.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Procedimentos para análise e modelagem de problemas utilizando técnicas de simulação.....	29
Tabela 2 - Valores usuais de p-value.	35
Tabela 3 - Resultados da simulação do modelo didático para os diferentes critérios de despacho.....	42
Tabela 4 - Distribuições Estatísticas por Frente de Lavra.	53
Tabela 5 - Dados filtrados por frente de lavra e discretizados no tempo.....	55
Tabela 6 - Transformação dos dados em sistema binário para modelo de simulação	55
Tabela 7 - Estatísticas de filas do simulador do estudo de caso.	59
Tabela 8 - Sugestões de metas de produção para aumentar o nível de confiança...	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	SIMULAÇÃO	14
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO	17
2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO.....	19
2.4	QUANDO USAR SIMULAÇÃO.....	21
2.5	SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE LAVRA	24
2.6	ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3	PROCESSO DE SIMULAÇÃO	29
3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	MODELAGEM DOS DADOS DE ENTRADA	31
3.2.1	Coleta de Dados	32
3.2.2	Tratamento de Dados.....	32
3.2.3	Inferência	34
3.3	PROCESSO DE SIMULAÇÃO ESPECÍFICO PARA ESTA PESQUISA.....	36
3.4	APLICAÇÃO DIDÁTICA DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	38

4	AVALIAÇÃO DO PLANO DE LAVRA UTILIZANDO SIMULAÇÃO	44
5	ESTUDO DE CASO	47
5.1	DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO	47
5.2	MODELO CONCEITUAL DE SIMULAÇÃO	47
5.3	PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA.....	49
5.3.1	Coleta de Dados do Estudo	49
5.3.2	Modelagem dos Dados	49
5.4	MODELAGEM EM LINGUAGEM COMPUTACIONAL.....	54
5.5	DADOS OBTIDOS PELAS REPLICAÇÕES	58
6	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	60
6.1	NÍVEL DE CONFIANÇA	60
6.2	PROCESSO DE AVALIAÇÃO CONTÍNUA DO PLANO DE LAVRA.....	63
6.3	PARADAS NO SERVIÇO	65
6.4	GESTÃO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL.....	67
6.5	GESTÃO DE DADOS INCONSISTENTES.....	70
7	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A - ELEMENTOS DA SIMULAÇÃO DISCRETA.....	76

ANEXO B - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES.....	78
ANEXO C - MODELO COMPUTACIONAL DO SISTEMA EXEMPLO, NA LINGUAGEM DE SIMULAÇÃO DO SOFTWARE ARENA®.....	85
ANEXO D - MODELO COMPUTACIONAL, DO ESTUDO DE CASO, NA LINGUAGEM DE SIMULAÇÃO DO SOFTWARE ARENA®.....	87

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O plano de lavra, quando não é realizado de maneira intuitiva, é feito com base em uma produtividade média, seja, uma media histórica ou estimada através de outras variáveis, por exemplo, distância média de transporte (DTM), velocidade média de transporte, tempo de carregamento, entre outras. Entretanto, a operação de lavra está sujeita a variações da produtividade, devido a diferenças nos tempos de ciclo ou pelas paradas de equipamentos (prevista ou não prevista). A variação, não apenas da produtividade, mas de todas as variáveis envolvidas na operação, foi denominada Variabilidade Operacional.

Esta diferença acaba gerando conflitos entre planejamento e operação de lavra, pois nem sempre é possível atingir as metas de produção e qualidade seguindo o plano de lavra. A operação acaba tomando decisões intuitivas que nem sempre são ótimas, podendo prejudicar o atendimento das metas de longo prazo definidas pelo planejamento.

O objetivo deste trabalho é criar um plano que seja exeqüível conforme os dados das operações unitárias da Lavra. Para determinar a exeqüibilidade do plano de lavra, a execução do plano será “imitada” através de um processo de simulação.

Este trabalho é relevante por que:

- Um dos maiores desafios de gerenciar a cadeia mineral é gerenciar a incerteza de todas as áreas envolvidas, por exemplo, geológica, vendas, operacional, etc.;
- Existem poucos estudos sobre variabilidade operacional;
- Um dos principais desafios atuais está em conseguir com que a operação possa executar adequadamente os planos de lavra;
- A possibilidade de verificar a exeqüibilidade dos planos de lavra antes de publicá-los para operação trará benefícios para as empresas de mineração.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo sintetiza os principais aspectos da simulação e sua aplicação na representação de uma mina.

2.1 SIMULAÇÃO

Simulação é um termo que apresenta diversas definições, pois é utilizado por várias áreas do conhecimento. De uma maneira genérica podemos dizer que uma simulação imita uma operação ou um processo do mundo real.

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

O termo simulação pode ser dividido em duas categorias a simulação computacional, que necessita de um computador para ser realizada e a simulação não-computacional, que não necessita de um computador, por exemplo, protótipo em escala reduzida.

Devido à evolução da informática, simulação passou a ser sinônimo de “simulação computacional”, que Prado (2004) definiu assim: “Simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando computador digital”.

Esta citação possui alguns termos que são detalhados a seguir:

- Sistemas: “agregado de objetos que possuem alguma interação ou interdependência” (Prado, 2004).
- Modelo: “Um modelo é uma simplificação da realidade.” (Booch, Rumbaugh e Jacobson, 1999), ou mais detalhado, “Modelo é uma representação do contexto de um problema a ser resolvido, construído com foco nas variáveis de interesse e abstraindo as variáveis que não sejam relevantes para a solução do problema”. (Rumbaugh, 1991).

De uma maneira mais simples podemos dizer que a simulação representa um sistema utilizando um modelo.

Diversos textos apresentam uma série de definições do que é simulação, todas parecidas com o que foi apresentado. Chiwft e Medina (2006) fizeram uma apresentação diferente, em vez de definir simulação, eles apresentaram o que não é simulação baseado no que o senso comum acha sobre a simulação.

- **A Simulação não é uma bola de cristal:** A simulação não pode prever o futuro, o que pode ser previsto (com certo nível de confiança) é o comportamento de um sistema baseado em dados de entrada específicos e respeitando um conjunto de premissas.
- **A Simulação não é um modelo matemático:** A simulação não pode ser reduzida a um simples cálculo ou fórmula matemática, pois não existe um conjunto de equações que fornecidos os valores de entrada, fornecem resultados sobre o comportamento do sistema.
- **A Simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização:** A simulação é uma ferramenta de análise de cenários, ela pode ser combinada com algoritmos de otimização, mas por si só ela não é capaz de identificar uma solução ótima.
- **A Simulação não é substitutiva do pensamento inteligente:** A simulação não pode substituir o pensamento humano no processo de tomada de decisão.
- **A Simulação não é uma técnica de último recurso:** Antigamente a simulação era utilizada apenas quando todas as outras possíveis falhassem,

entretanto, atualmente a simulação é uma das técnicas mais utilizadas na Pesquisa Operacional e na Ciência da Administração.

- **A Simulação não é uma panacéia que irá solucionar todos os problemas:**
A simulação é mais bem aplicada em problemas complexos e estocásticos. Mais detalhes se encontram no item “2.4 Quando Usar Simulação”.

A simulação é um processo amplo, compreendendo a construção do modelo e todo o método experimental, com o objetivo de:

1. Descrever o comportamento do sistema;
2. Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas; e
3. Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

Um modelo de simulação é executado, ao contrário de um modelo de otimização, que é resolvido. O modelo simulado permite análises quase que a todo instante, à medida que novas averiguações sobre o comportamento do sistema modelado sejam consideradas.

A maioria dos modelos de simulação é do tipo entrada-saída, isto é, são modelos interativos aos quais se fornecem dados de entrada, obtendo-se respostas específicas para estes. Não são, por natureza, modelos de otimização. Não oferecem (a menos de um razoável esforço) a possibilidade de busca de uma solução ótima, servindo, mais apropriadamente, para análises do comportamento do sistema sob condições específicas. Normalmente costuma-se desenvolver e experimentar com modelos de simulação objetivando o encaminhamento de uma solução a um dado problema. (Freitas Filho, 2001 p. 3).

Segundo Freitas Filho (2001) e Prado (2004), a simulação é aplicada geralmente quando:

- **O sistema real ainda não existe:** a simulação pode ser usada para planejar um sistema futuro, por exemplo, uma nova fábrica, um supermercado novo;

- **Experimentar com o sistema real é dispendioso:** o modelo pode indicar, com muito menos custo, quais os benefícios de se investir em um novo equipamento, por exemplo;
- **Experimentar com o sistema real não é apropriado:** um caso típico é o planejamento do atendimento de situações de emergência, por exemplo, um desastre aéreo em um aeroporto. Toda a logística para o acionamento e atuação de serviços prestados pela polícia, pelos bombeiros, por ambulâncias, pela emergência hospitalar, etc., podem ser modelados e tratados no computador. Não se pode provocar um desastre deste tipo para testar planos de emergência.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Os modelos de simulação podem ser divididos de maneira semelhante aos modelos em geral. As classificações mais relevantes para contextualizar este trabalho estão descritas a seguir.

Estáticos ou Dinâmicos

Um modelo de simulação estático representa um sistema que não se altera com o tempo, por exemplo, simulação geoestatística e aplicações do método de Monte Carlo no cálculo de integrais. Modelos dinâmicos são aqueles que variam ao longo do tempo, por exemplo, o atendimento em uma central telefônica, simulação do fluxo de clientes nos caixas de supermercado, atendimento de um caminhão em uma frente de lavra.

Determinísticos ou Estocásticos

Um sistema pode ser determinístico ou estocástico, dependendo da natureza da entrada, do processo e da saída em vários estágios do sistema. Modelos de simulação que não contêm variáveis aleatórias são classificados determinísticos, como os ciclos de um robô em uma linha de montagem. Esses modelos têm um conjunto conhecido de entradas que resultarão em um único conjunto de saídas. Um modelo de simulação estocástico tem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada. As entradas aleatórias levam a saídas aleatórias (uma gama de possíveis saídas, segundo alguma distribuição de valores).

Tempo Contínuo ou Tempo Discreto

A variação temporal de estado em um modelo de simulação pode ser contínua, quando o estado varia continuamente no tempo, como o aquecimento de um metal, ou discreto quando a mudança de estados ocorre na ocorrência de eventos, como uma central de atendimento telefônico, que tem sua situação alterada com o evento de chegada de ligações.

Terminal ou Não-Terminal

Os sistemas terminais apresentam condições iniciais fixas (ao fim de cada rodada de simulação o sistema volta para estas condições) e um evento que determina o fim para o processo de simulação, como serviços em restaurantes, bancos, uma empresa de mineração que funcione 8 horas por dia e que a posição inicial dos equipamentos seja a mesma etc. Já os sistemas não-terminais não possuem condições iniciais fixas, nem um evento que determine o fim do processo de simulação, como hospitais, uma empresa de mineração que opere 24 horas por dia etc.

Neste trabalho é abordada a simulação de eventos discretos estocásticos.

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO

Apesar de a simulação ser uma excelente ferramenta de análise, é preciso conhecer as suas vantagens e desvantagens. As duas listas abaixo foram baseadas nos textos de Freitas Filho (2001) e Law e Kelton (2000). As principais vantagens estão descritas a seguir.

- Uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas.
- 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.
- A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos.
- Sistemas complexos que contenham elementos estocásticos que não conseguem ser descritos perfeitamente por modelos matemáticos resolvidos analiticamente podem ser estudados pela simulação.
- Enquanto que modelos analíticos requerem um número muito grande de simplificações para torná-los matematicamente tratáveis, os modelos de simulação não apresentam tais restrições. Além disso, nos modelos analíticos, as análises recaem apenas sobre um número limitado de medidas de desempenho. De maneira contrária, as informações geradas pelos modelos de simulação, permitem a análise de, praticamente, qualquer medida concebível.
- Os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto os sistemas reais. Portanto novas políticas, procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação etc., podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado.
- Hipóteses sobre como ou por que certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação.
- O tempo pode ser controlado. Ele pode ser comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira lenta ou acelerada, para que

se possa melhor estudá-los. Este permite ainda simular longos períodos em um tempo reduzido.

- Podem-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema.
- A identificação de “gargalos”, preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, de informações e de produtos, pode ser obtida de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual.
- Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera.
- Novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência podem ser tratadas, de tal forma que se possa ter, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo “*what-if*” ou “o que aconteceria se?”.
- Fornece um controle melhor sobre as condições experimentais do que seria possível no sistema real, pois é possível fazer vários cenários no modelo designando-se os valores que se deseja para todos os parâmetros.
- Permite a replicação precisa dos experimentos, podendo-se, assim, testar alternativas diferentes para o sistema.
- É, em geral, mais econômico que testar o sistema real, e evita gastos inúteis na compra de equipamentos desnecessários.

A seguir são descritas as desvantagens.

- A construção de modelos requer treinamento especial. Envolve arte e, portanto, o aprendizado se dá ao longo do tempo, com a aquisição de experiência. Dois modelos de um sistema construídos por dois indivíduos competentes terão similaridades, mas dificilmente serão iguais.
- A modelagem e a experimentação associadas a modelos de simulação consomem muitos recursos, principalmente tempo. A tentativa de

simplificação na modelagem ou nos experimentos objetivando economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios. Em muitos casos a aplicação de métodos analíticos (como a teoria das filas, por exemplo) pode trazer resultados menos ricos, mas econômicos;

- Devido à sua natureza estocástica, os modelos de simulação devem ser rodados várias vezes antes que se possa prever o desempenho do sistema;
- A simulação é muito dependente da validade do modelo desenvolvido;
- A simulação não fornece o resultado ótimo para o problema, ela só testa as alternativas dadas pelo usuário;
- Os dados de saída podem ser de difícil interpretação, pois uma vez que o modelo está buscando capturar a aleatoriedade do sistema real, é geralmente difícil determinar se o resultado de um processamento é devido às interações presentes no sistema, ou se é devido à aleatoriedade embutida no modelo.

2.4 QUANDO USAR SIMULAÇÃO

Esta seção é baseada no texto de Chiwf e Medina (2006) que apresenta de forma didática e coerente com o restante da bibliografia sobre quando se deve usar simulação.

No texto de Chiwf e Medina (2006) são citados alguns métodos para análise de sistemas:

- *Contas de padeiro*: pequenos cálculos, geralmente baseados em médias e valores aproximados.
- *Planilhas eletrônicas*: utilizadas para cálculos mais complexos.
- *Métodos ea programação matemática e métodos analíticos*: destaque para os métodos de otimização (linear, inteira mista etc.) e os métodos analíticos (teoria das filas). Muitos destes métodos podem ser utilizados através de

planilhas eletrônicas com a utilização de *solvers* ou solucionadores apropriados.

- *Simulação*: montagem de um modelo de simulação e implantação do modelo utilizando um simulador.

Outro “método” citado é o “valor arbitrário” ou, como geralmente é chamado, “uma estimativa”, ou seja, tomadas de decisão de sistemas complexos baseadas em intuição e experiência, o que muitas vezes pode levar a resultados desastrosos.

Para ilustrar os métodos descritos, os autores utilizam o exemplo de um sistema de processamento de correspondência, com três postos de trabalho em série, representado na Figura 1. Os tempos entre chegadas sucessivas de correspondência são exponencialmente distribuídos com média de 10 minutos. O tempo de processamento do posto 1 é de 9 minutos, 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 a 8 minutos e o maior valor de 10 minutos. Os tempos de processamento do posto 3 são uniformemente distribuídos no intervalo entre 8 e 10.

Figura 1 - Esquema do exemplo de um sistema de processamento de correspondência.

Fonte: CHIWF e MEDINA (2006).

O objetivo, no exemplo, é descobrir o tempo médio que cada correspondência permanece no sistema, os resultados obtidos para cada método estão descritos a seguir.

- *Contas de padeiro*: 27 minutos. Este modelo considera apenas a médias e não considera a formação de filas.
- *Planilhas eletrônicas*: tempo mínimo de 17 minutos, máximo de 37 minutos e médio de 27 minutos. Este modelo considera o melhor e o pior caso, mas sem a formação de filas.
- *Métodos da programação matemática e métodos analíticos*: utilizando a Teoria de Filas, o resultado 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 de 77 minutos e máximo de 244 minutos. Este modelo considera a variabilidade como descrita.

A diferença dos resultados é explicada pelo tratamento dada 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. Pela sua posição “média”, o bêbado está vivo, mas “na média”, o bêbado está morto.

Figura 2 - Demonstração do uso de valores médios.
Fonte: CHIWF e MEDINA (2006).

Se o problema for estático, isto é, se os estados do sistema não se alteram com o tempo, então a simulação de eventos não tem nenhuma utilidade prática.

Se o problema for determinístico, isto é, não apresenta nenhum comportamento aleatório, a simulação pode ser utilizada – obviamente ela será subutilizada. Este seria um caso típico de “matar uma mosca com uma bala de canhão”, o que não significa que estamos proibidos de rodar uma simulação com os valores constantes. Na, realidade, esta é uma das técnicas de verificação/validação de modelos de simulação...

Se o problema em questão for complexo, dinâmico e apresenta aleatoriedade, então a melhor escolha é a simulação. (CHIWF; MEDINA, 2006, p.22)

Figura 3 - Quanto maior e mais complexo o sistema, maior a aplicabilidade da simulação.

Fonte: CHIWF e MEDINA (2006).

2.5 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE LAVRA

Segundo Sturgul (1999) a primeira publicação, nos Estados Unidos, sobre aplicação de simulação computacional em operação de lavra é de 1961, quando Rist faz um modelo para dimensionar a quantidade de trens ideal em uma mina subterrânea.

A aplicação de simulação no processo de lavra é mais efetiva a partir da década de 90. De 1995 a 1999 foram publicados ou apresentados cerca de 150 artigos sobre

simulação de sistema de lavra nos principais simpósios ao redor do mundo, a maior parte destes trabalhos são estudos de minas reais, outros são exemplos teóricos e em alguns casos são apenas demonstrações de capacidades de softwares disponíveis.

Sturgul (1999), Basu e Baafi (1999), Knights e Bonates (1999) e Panagiotou (1999) fizeram um histórico da aplicação da simulação em processos de lavra nos Estados Unidos, Austrália, América do Sul e Europa respectivamente. Os objetivos dos trabalhos pesquisados eram utilizar a simulação como ferramenta para:

- Auxiliar em pesquisas acadêmicas;
- Avaliar diferentes técnicas de despacho;
- Modelar e Avaliar Operações da Lavra, principalmente carga e transporte;
- Dimensionar equipamentos de transporte e carga;
- Modelar correias transportadoras;
- Determinar o melhor lugar para o britador em uma mina a céu aberto;
- Estudar mudanças no processo, por exemplo, qual o impacto da adição de uma escavadeira na produtividade.

“Os modelos desenvolvidos para simular as operações de lavra em minas podem ser usados como ferramenta na avaliação de cenários” (RAMOS NETO e PINTO, 2004). Os cenários citados estão descritos abaixo:

- Permitir ao engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta;
- Fazer mudanças ou testes de novas políticas nos sistemas já existentes sem perturbação da produção e sem implementá-los efetivamente;
- Melhorar a percepção geral da natureza de um processo, através da animação do sistema no computador;
- Identificar gargalos na produção;
- Estudar o dimensionamento e seleção de equipamentos utilizados nas operações da mina, como caminhões e equipamentos de carga;

- Determinar um local ótimo para o britador primário em relação a cava da mina;
- Testar a viabilidade de implantação de um sistema de alocação dinâmica de caminhões;
- Dimensionar a capacidade de silos, britadores e pilhas de estoque;
- Determinar o impacto, na produção da mina, do uso de um britador com descargas simultâneas de caminhões;
- Dimensionar sistemas para escoamento da produção usando trens e navios;
- Determinar a influência da disponibilidade de equipamentos e outros índices mecânicos na produção da mina.

Sturgul (2001) destacou as seguintes aplicações da simulação:

- **Modelagem de correias transportadoras:** cujo objetivo é prever o fluxo em diferentes pontos do sistema de correias e estimar a quantidade de minério nos estoques intermediários. Este problema é complicado porque as chamadas correias de sacrifício (que recebem o impacto da queda de minério) precisam ser trocadas freqüentemente.
- **Operação de lavra subterrânea pelo método pilar e salão:** este método é um dos mais comuns para depósitos estratificados, como carvão e potássio. O minério é extraído em “salões”, sobrando os pilares de sustentação. Foram desenvolvidos modelos de minas de muitos quilômetros quadrados.
- **Movimentação de minério em lavra a céu aberto:** utilizado para determinar o número ótimo de caminhões para assegurar que a alimentação da usina seja constante ou quase constante. Outro aspecto é o dimensionamento do estoque de peças de reposição, pois caminhões fora de estrada e outros grandes equipamentos não são muito confiáveis, com confiabilidades em torno de 70 a 80%.
- **Carregamento e Transporte de uma mina a céu aberto:** minerações de grande porte passarão a adotar sistemas de despacho computadorizados, onde o caminhão descarregado é enviado automaticamente para o equipamento de carga, com o objetivo de economizar tempo. O primeiro

sistema de despacho foi instalado na mina de cobre Tyrone no Novo México, em 1982. A simulação pode ser utilizada para verificar se a adoção de um sistema deste tipo irá realmente melhorar a eficiência.

Ainda segundo Sturgul (2001) os softwares mais populares na simulação de Mina são GPSS/H[®] e ARENA[®], e ainda são os softwares mais utilizados nos trabalhos mais recentes pesquisados.

O GPSS/H[®] utiliza a linguagem GPSS, que é a primeira linguagem comercial de computadores voltada à simulação de sistemas, foi popular no final dos anos 1960 e início dos anos 1970.

O Arena[®] integra linguagem Siman e o pacote Cinema. A linguagem Siman foi lançada em 1982, inspirada na linguagem GPSS que era utilizada em computadores de grande porte. Esta linguagem foi inovadora, porque era destinada a IBM-PC (*Personal Computer* ou Computador Pessoal) e compatíveis. O pacote Cinema foi lançado em 1990 e que integrado ao SIMAN, permitia apresentar uma representação animada e em cores do funcionamento do sistema.

Ramos Neto e Pinto (2004) criaram templates específicos para a mineração utilizando o programa Arena[®]. As principais conclusões dos autores dos trabalhos pesquisados são:

- A aplicação da simulação representando a operação de lavra é muito eficaz para se aprender sobre o sistema, identificar gargalos e para solucionar problemas. No entanto, o processo requer considerável experiência e conhecimentos em informática para modelagem do "verdadeiro" problema.
- A animação do modelo ajuda na sua validação, apontando erros que são difíceis de identificar através de relatórios.
- Geralmente os modelos de simulação são criados para grandes empresas, que podem pagar os custos desses serviços. As pequenas operações ainda estão céticas sobre a viabilidade do esforço.

- Os avanços na visualização utilizando realidade virtual e a relativamente barata disponibilidade de equipamentos informáticos prevê a possibilidade de construção de um modelo realista de animação em 3D de uma mina.
- A modelagem e simulação podem ter sido aplicadas tardiamente na lavra, mas têm um lugar garantido nas áreas de desenho de mina e no planejamento de lavra.

As operações da lavra podem ser representadas por um modelo dinâmico de eventos discreto. Mesmo funções que não discretas, como a posição do caminhão, podem ser discretizadas utilizando os conceitos de tempo de ciclo, já aplicados na mineração.

Numa simulação discreta a passagem de tempo é feita aos saltos, entre um evento e outro. Neste caso o estado do sistema não se altera ao longo do intervalo compreendido entre dois eventos consecutivos.

2.6 ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação da simulação na indústria em geral e na de lavra de minérios já é um processo consagrado.

Os estudos levantados sobre aplicação da simulação das operações de lavra indicaram que a simulação é aplicada para solucionar um problema específico, sem avaliar a variabilidade das variáveis em estudo.

Uma das principais contribuições desta pesquisa, em relação às iniciativas anteriores, é apresentar a simulação de lavra como uma ferramenta do dia-a-dia para o planejamento de lavra, visando fixar metas mais realísticas para a produção, e assim permitir maiores índices de aderência entre o planejado e o realizado pela operação da mina.

3 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Um processo de simulação, também denominado “metodologia de simulação” ou “ciclos de vida de um modelo de simulação” é uma série de etapas a serem adotadas no desenvolvimento de estudos de simulação. O processo de simulação é definido por diversos autores. Este capítulo apresenta um dos processos mais completos da literatura e um processo proposto pela autora que servirá como base para a organização deste trabalho.

3.1 INTRODUÇÃO

Uma seqüência de passos a serem adotados no desenvolvimento de estudos de simulação de forma eficiente foi proposta por Pedgen (1995) *aput* Botter (2002) e adaptado por Botter (2002), essa metodologia destaca a importância da análise de dados. A Tabela 1 apresenta estes passos.

Tabela 1. Procedimentos para análise e modelagem de problemas utilizando técnicas de simulação.

<p>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” (se necessário)
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</p> |
|---|

Fonte: Botter (2002).

- A. Definição do Problema: definição das metas do estudo.
- B. Planejamento do Projeto: verificar a existência de recursos para a execução do projeto.
- C. Definição do Sistema: investigação do funcionamento e definição das fronteiras e das restrições do sistema.
- D. Formulação Conceitual do Modelo: desenvolvimento de um modelo preliminar para definir os componentes, as variáveis e as interações lógicas. Pode ser gráfico ou um 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 uma linguagem de simulação apropriada.
- H. Verificação e Validação: confirmação de que o modelo opera como planejado e que sua saída é confiável e representativa de um sistema real. O objetivo da verificação é mostrar que o programa computacional se desempenhou como esperado e pretendido. O objetivo da validação é estabelecer se o comportamento do modelo representa, de forma válida, o sistema do mundo real que está sendo simulado.
- I. Projeto Final Experimental: projetar experimentos que irão gerar as informações desejadas e determinar como cada um dos processamentos computacionais no projeto será executado.
- J. Experimentações: executar a simulação para gerar os dados desejados e realizar análises de sensibilidade.
- K. Análise e Interpretação: realizar inferências sobre os dados obtidos na 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.

Ao final do passo F (preparação dos dados de entrada), existe a possibilidade de retornar ao início do processo, porque o autor quis destacar a importância deste passo.

Os principais cuidados para obter um bom resultado da simulação são:

- Conhecer a ferramenta utilizada;
- Definir os objetivos do estudo;
- Construir modelos simples;
- Analisar os resultados da simulação corretamente.

O Anexo A contém os principais elementos da simulação discreta.

3.2 MODELAGEM DOS DADOS DE ENTRADA

Em um estudo de simulação, o sistema é representado por um modelo de simulação computacional e um conjunto de dados de entrada, que juntos reproduzem a realidade. Um bom resultado depende da qualidade do modelo e dos dados de entrada.

Os softwares de simulação lêem os dados de entrada como distribuições de probabilidade. As distribuições mais utilizadas estão no Anexo B. Quando os dados não aderem a uma distribuição teórica, é possível utilizar a distribuição empírica, que é o histograma dos dados. O objetivo da modelagem de dados é criar modelos probabilísticos que representam a aleatoriedade de um fenômeno.

A modelagem de dados pode ser dividida em três etapas:

- Coleta de Dados,
- Tratamento de Dados,
- Inferência.

3.2.1 Coleta de Dados

A coleta de dados se inicia com a identificação das variáveis necessárias para o estudo de simulação, o método de coleta e o tempo necessário para representar o sistema em estudo. Este processo de decisão é interativo.

A coleta de dados envolve a amostragem, armazenagem e disponibilização dos dados. É importante formalizar o procedimento adotado para que se possa identificar quais os erros que podem ocorrer nesta etapa e adotar procedimentos de consolidação de dados.

3.2.2 Tratamento de Dados

Este capítulo teve como base os textos de Botter (2002), Biller e Nelson (2002), Freitas Filho (2001) e Vicent (1998).

O tratamento de dados é um procedimento realizado para gerar uma base de dados coerente e consistente. Esta etapa permite identificar erros de coleta de dados e aumenta o conhecimento do sistema em estudo. Podemos dividir o tratamento de dados em cinco fases, descritas a seguir.

- **Ordenação dos Dados:** etapa que pode parecer simplista, mas que já pode apontar alguns erros, como discrepâncias de ordem de grandeza e formatos, campos em branco, dados duplicados.
- **Avaliação Descritiva:** está relacionada à Estatística Descritiva, Botter (2001) recomenda as análises de Medidas de Ordem (máximo e mínimo), Separatrizes (Quartis, Descis e Pertencis), Medidas de Tendência Central (Média, Média Aparada, Mediana e Moda) e Medidas de Dispersão (Amplitude, Intervalo Inter-Quartil, Variância, Desvio-Padrão e Coeficiente de Variação).
- **Visualização dos Dados:** para completar a avaliação dos dados, são utilizadas ferramentas gráficas para identificar aspectos que podem não ser notados com medidas numéricas, como assimetrias. As visualizações mais utilizadas são o histograma, o gráfico de frequência acumulada e o diagrama de dispersão e a sua medida de associação (quando é necessário estudar o comportamento conjunto de duas variáveis).
- **Limpeza dos Dados:** retirada de valores sem coerência ou consistência. Geralmente esses valores ocorrem por falhas na coleta de dados ou por eventos raros (cabe ao analista decidir inserir ou não os eventos raros no estudo de simulação). Para identificar os valores não usuais é utilizado o Gráfico de Caixas, também conhecido como *box plot*. O gráfico de caixas funciona bem apenas para distribuições uniformes (aquelas que não possuem cauda). A Figura 4 apresenta um exemplo de gráfico de caixas.

Figura 4 - Exemplo de gráfico de caixas.

- **Agrupamento:** investigação da existência de grupos dentro dos dados amostrais.

3.2.3 Inferência

Identificação da distribuição estatística, para o estudo utilizando simulação. É interessante, mas não necessário, que os dados sejam associados a um modelo teórico. Devemos responder à pergunta representada pela Figura 5: “Qual o melhor modelo probabilístico ou distribuição estatística que pode representar a amostra coletada?”

Figura 5 - Determinação da distribuição estatística ou inferência.

Fonte: CHIWF e MEDINA (2006).

A comprovação de que o modelo teórico selecionado representa os dados coletados é realizada através dos testes de aderência, em que é testada a validade ou não desta hipótese. Os testes mais utilizados são o teste do qui-quadrado e o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Os softwares de ajuste de dados calculam um índice chamado *p-value*. Quanto menor o *p-value*, mais razões temos para rejeitar a hipótese de aderência, ou seja, a distribuição escolhida não representa os dados reais. A Tabela 2 apresenta as faixas de valores utilizadas.

Tabela 2 - Valores usuais de *p-value*.

Valor	Critério
$p\text{-value} < 0,01$	Evidência forte contra a hipótese de aderência
$0,01 \leq p\text{-value} < 0,05$	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
$0,05 \leq p\text{-value} < 0,10$	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
$0,10 \leq p\text{-value}$	Evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência

Outro método bastante utilizado e ilustrativo é o gráfico de probabilidades. Este método é baseado na comparação dos dados reais obtidos e a amostra que deveria

ter sido obtida caso os dados realmente seguissem a distribuição de probabilidade em investigação.

Os dados do gráfico devem se aproximar de uma reta. O gráfico de probabilidades contém os dados reais, uma reta de referência e duas outras retas. Se os dados aderirem à distribuição pesquisada, estes devem estar distribuídos aleatoriamente entre as duas retas externas. A Figura 6 é um exemplo em que os dados reais aderem a uma distribuição normal de média 10,18 e desvio padrão de 0,86.

Figura 6 - Exemplo de gráfico de probabilidade.

3.3 PROCESSO DE SIMULAÇÃO ESPECÍFICO PARA ESTA PESQUISA

A revisão indicou que há diferentes abordagens para se criar um modelo de simulação. Para este trabalho é proposto um processo simples (Figura 7), que foi criado com base em Law e Kelton (2000), Freitas Filho (2001) e Botter (2002), para condução de um estudo utilizando um simulador.

Figura 7 - Processo de simulação proposto.

Sistema Real: sistema do mundo real que é foco do estudo.

Preparação dos Dados de Entrada: preparação dos dados coletados que serão à entrada do simulador. Esta etapa influencia e é influenciada pelo modelo conceitual. Por exemplo, só serão analisados dados que foram considerados no modelo conceitual, e o tratamento de dados pode indicar que um processo é diferente do que o considerado no modelo conceitual. Esta etapa inclui a metodologia descrita no item “3.2 Modelagem dos Dados de Entrada”.

Formulação do Modelo Conceitual: é o desenvolvimento de um modelo simplificado, mas representativo do mundo real. Nós não podemos incluir todos os detalhes em um sistema modelo. Então, através de um processo de abstração, selecionamos os detalhes que são mais críticos para caracterizar o funcionamento do sistema. Este é um processo iterativo, pois o modelo deve ser validado para garantir que ele represente adequadamente o sistema em estudo. O grau de detalhe exigido em um modelo depende da natureza do sistema e do objetivo do estudo.

Modelagem em Linguagem Computacional: construção de um modelo em linguagem computacional. Este processo também é iterativo e a cada passo temos de verificar o programa de simulação para nos certificar se o funcionamento do sistema corresponde ao previsto no modelo conceitual.

Simulador: implantação final do modelo computacional. Ela pode incluir a animação do modelo, que pode auxiliar na identificação de erros no modelo. Depois que o programa de simulação está sendo executado, executamos experimentos para explorar o nosso sistema.

Análise e Interpretação de Resultados: análise dos dados obtidos a partir dos experimentos do simulador. Seu principal objetivo é permitir a realização de inferências e previsões sobre o comportamento e o desempenho do sistema real analisado. É adotado o mesmo tratamento estatístico que seria empregado sobre sistemas reais, pois em geral os modelos apresentam um comportamento estocástico semelhante aos sistemas que estão imitando.

Verificação, Validação e Teste: processo que garante a credibilidade do estudo de simulação e deve ser conduzido durante todo o ciclo de estudo.

3.4 APLICAÇÃO DIDÁTICA DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Foi construído um modelo bem simples para exemplificar a metodologia proposta de construção de um modelo de simulação.

O primeiro passo para o estudo de simulação é definir os objetivos. No exemplo o estudo tem dois objetivos, que serão obtidos através de dois estudos sobre um mesmo modelo:

- escolher uma estratégia de despacho
- analisar o impacto dos dados de entrada no resultado da simulação

“Sistema Real”: foram considerados 12 caminhões trabalhando em duas frentes de lavra alimentando um britador. A produção é medida em número de caminhões que chegam ao britador.

“Preparação dos Dados de Entrada”: foi considerada uma distribuição normal para os tempos, com as seguintes médias e desvios padrão (em minutos), respectivamente:

Tempo Basculamento - T_B : (2.0 ; 0.3)

Tempo Deslocamento Britador – Frente A (vazio) - T_{idaA} : (5.0 ; 1.0)

Tempo Deslocamento Frente A – Britador (cheio) - T_{volA} : (6.0 ; 2.0)

Tempo Deslocamento Britador – Frente B (vazio) - T_{idaB} : (15.0 ; 1.0)

Tempo Deslocamento Frente B – Britador (cheio) - T_{volB} : (21.0 ; 1.0)

Tempo Carregamento Frente A - T_{cA} : (3.0 ; 0.5)

Tempo Carregamento Frente B - T_{cB} : (3.0 ; 0.5)

Figura 8 - Distribuição dos Dados de Entrada da Aplicação Didática de Simulação.

Modelo Conceitual: foi considerado que a Mina opera 24 horas sem nenhuma parada. O modelo conceitual está apresentado na Figura 9. Para escolha do critério de despacho foram analisados quatro cenários.

Figura 9 - Modelo conceitual da aplicação didática de simulação.

Modelo Linguagem Computacional: o modelo foi desenvolvido em linguagem do Arena®. A programação e a animação estão no Anexo C.

Verificação, Validação e Teste: Como o modelo é fictício e simples, a validação foi feita visualmente através da animação do modelo.

Simulador: o simulador foi utilizado para fazer as seguintes análises.

- Análise de Sensibilidade (distribuição).
- Diferentes estratégias de despacho.

Análise e Interpretação de Resultados: para fazer as análises foi definida, uma “função objetivo” ilustrativa, que é a função que serve de comparativo entre os cenários para determinar aquele que tem melhor desempenho.

- *Produção:* número de caminhões que descarregaram no Britador vezes uma função normal de média 50 toneladas e desvio igual a 5 toneladas. (cada viagem terá uma massa diferente “sorteada” conforme a distribuição)

- *Custo*: $10 \times (\text{viagens da Frente A}) + 15 \times (\text{viagem da Frente B}) + 5 \times (\text{tempo de filas em horas})$. Esta função é teórica, exemplificado diferentes custos de produção para cada frente e uma penalização para o tempo de fila. Como não é uma moeda real, o valor é uma unidade monetária teórica, representada por \$.
- *Função Objetivo*: $30 \times (\text{viagens da Fr. A}) + 40 \times (\text{viagens da Fr. B}) - \text{Custo}$. Esta função exemplifica o “ganho” que seria diferente para cada frente menos o custo de produção. Como não é uma moeda real, o valor é uma unidade monetária teórica, representada por \$.
- *Tempo da rodada*: 24 horas.

Estudo 1 - Estratégias de despacho: foi realizada uma replicação para cada cenário. Como a raiz aleatória é a mesma (ou seja, os valores de tempo de ciclo são iguais) e o modelo é simples, podemos escolher a melhor estratégia com base em apenas uma replicação.

A atividade Recebe Despacho, é representada no Arena® pela função DECIDE, que divide o fluxo de entidades por probabilidade ou por condições pré determinadas, por exemplo: tipo de entidade, atributo, variável, expressão etc. Foram analisadas as estratégias a seguir.

1. Alocação aleatória (probabilidade de 50% para cada frente).
2. Alocação por frente fixa: grupo de seis caminhões para cada frente (os caminhões foram divididos em dois grupos, através de atributos, uma marcação).
3. Alocação por menor fila na frente no momento da alocação: número instantâneo na fila, no empate vai para frente A (uma expressão compara as duas filas).
4. Alocação por menor número de caminhões alocados na frente: menor número de caminhões indo para frente de lavra, na fila e carregando. No empate é aleatório (uma expressão comparava as duas variáveis, que foram criadas para calcular o número de caminhões alocados em cada frente).

A Tabela 3 mostra os resultados dos quatro cenários. O melhor, pela função objetivo, é a estratégia quatro.

Tabela 3 - Resultados da simulação do modelo didático para os diferentes critérios de despacho.

Variável \ Critério	1	2	3	4
Viagem A (número de viagens)	278	391	361	374
Viagem B (número de viagens)	267	188	210	223
Custo (\$)	6.78	6.72	6.74	7.07
Produção (t)	26.79	28.29	28.10	29.80
Função Objetivo (\$)	12.23	12.50	12.42	13.03
Utilização car. A	0.57	0.81	0.75	0.77
Utilização car. B	0.56	0.38	0.44	0.46
Utilização Britador	0.65	0.82	0.72	0.75
Tempo médio fila A (min)	1.32	1.98	2.82	1.44
Tempo médio fila B (min)	1.62	0.66	1.80	0.78
Tempo médio fila Britador (min)	1.92	4.14	2.76	2.58

Estudo 2 - Análise de Sensibilidade (distribuição): foram analisados dois cenários.

- **A:** o tempo de basculamento é uma distribuição normal de média 2 minutos.
- **B:** o tempo de basculamento é uma distribuição exponencial de média 2 minutos.

O número de replicações necessário para se obter valores significativos pode ser determinado pela estabilização da média acumulada da(s) variável (is) de interesse, onde a adição de novos dados (replicações) não vai alterar a média.

No exemplo a variável de interesse é a “função objetivo”, que é um valor adimensional (uma moeda teórica). Inicialmente foram feitas 20 replicações que, pela Figura 10, são suficientes para os dois cenários analisados. A função objetivo do cenário B é 9,4% menor que no cenário A.

Figura 10 - Sensibilidade da função objetivo.

Comentários sobre a aplicação de simulação através do modelo didático:

- Um sistema extremamente simples já gerou um modelo em linguagem computacional complexo. O modelo conceitual, Figura 9, de apenas 10 elementos gerou um modelo de programação no Arena de 22 elementos (conforme modelo apresentado no anexo C).
- Os resultados são frutos do modelo e dos dados de entrada. As alterações no modelo (critério de despacho) e nos dados de entrada (curva de distribuição) fizeram diferença.
- É possível testar alternativas através de análises de diferentes cenários de simulação. No exemplo, a produtividade foi otimizada (dentro das alternativas testadas, ou seja, pode existir um critério de despacho mais eficiente), através da análise de diferentes estratégias de despacho.

4 AVALIAÇÃO DO PLANO DE LAVRA UTILIZANDO SIMULAÇÃO

A principal aplicação do processo de simulação descrito no item “3.3 Processo de Simulação Específico para esta Pesquisa” está relacionada à avaliação do plano de lavra.

Para que o processo de simulação pudesse ser aplicado de forma prática no ciclo de planejamento de lavra, a pesquisa incluiu o desenvolvimento de uma metodologia específica que permitisse determinar a probabilidade associada ao sucesso da execução de um plano de lavra em relação ao alcance das metas de produção e qualidade definidas pelo planejamento de mina.

Esta metodologia corresponde a uma das principais contribuições da pesquisa, e está detalhada a seguir.

A probabilidade associada ao sucesso da execução do plano de lavra foi denominada “nível de confiança do plano de lavra”. Assim, o nível de confiança do plano de lavra corresponde à probabilidade que um determinado plano de lavra alcance com sucesso as metas de produção e de qualidade da operação da mina.

A Figura 11 representa a metodologia de obtenção deste índice para um plano de lavra.

Figura 11 - Metodologia de determinação do nível de confiança do plano de lavra.

As atividades da metodologia de determinação do nível de confiança do plano de lavra, conforme apresentadas na Figura 11, estão detalhadas a seguir.

- **Tempos de Ciclo:** tempos das atividades “padrões”, como movimentações, carregar, bascular etc.
- **Paradas de Equipamentos:** paradas programadas (troca de turno, manutenção preventiva etc.) e não programadas (manutenção corretiva).
- **Plano de Lavra:** programação das áreas a serem lavradas no período.
- **Preparação dos Dados de Entrada:** tratamento dos dados e identificação das distribuições estatística dos dados.
- **Distribuições:** distribuições estatísticas das variáveis que representam a operação da mina.
- **Resultado das n Replicações:** o número de replicações (n) deve ser suficiente para representar o sistema real.

Como a simulação é uma representação do sistema real, podem ser analisadas todas as variáveis já utilizadas normalmente para avaliar, ou representar, a operação de lavra. As variáveis de saída da simulação necessárias para determinar a confiabilidade do plano de lavra foram divididas em dois grupos:

1. Variáveis utilizadas para validar o plano de lavra:

- Produção de Minério
- Produção de Estéril
- Qualidade

2. Variáveis que auxiliam a identificação do motivo do cumprimento ou não do plano:

- Filas
- Disponibilidade dos equipamentos
- Ociosidade
- Produtividade e Produção por frente de lavra

Além das atividades descritas acima, a metodologia desenvolvida também inclui ações e atividades de análise dos resultados, conforme especificado a seguir.

- **Análise dos Dados:** análise dos resultados de todas as replicações do simulador.
- **Metodologia de Tratamento de Dados:** inclui o processo de tratamento, de análise e da seleção da distribuição de probabilidade dos dados.
- **Simulador:** simula a lavra com as regras e os dados reais de operação. A validade do simulador deve ser avaliada freqüentemente.
- **Nível de Confiança do Plano de Lavra:** porcentagem de replicações que atingiram as metas de produção e de qualidade. Estas metas possuem um limite máximo e mínimo. Portanto, a confiabilidade depende do tamanho dos intervalos de confiabilidade.

5 ESTUDO DE CASO

As metodologias desenvolvidas neste trabalho foram aplicadas em um caso real junto a uma empresa de mineração em operação. Trata-se de uma mina a céu aberto de fosfato do Sudeste de São Paulo. Os dados foram coletados da empresa terceirizada de transporte, que trabalha preferencialmente no minério e que adota um sistema informatizado de despacho de caminhões. Por questão de confidencialidade os dados foram alterados.

5.1 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

A mina opera com duas empresas: uma para transporte de estéril e outra de minério. A empresa que trabalha com minério possui um sistema informatizado de despacho de caminhões. O estudo foi realizado com esta empresa, pois os dados de operação são coletados através de um computador de bordo e armazenados digitalmente em um banco de dados facilitando a disponibilização dos dados e auxiliando na aderência entre o planejamento, o simulado e a operação.

5.2 MODELO CONCEITUAL DE SIMULAÇÃO

O primeiro passo para testar a metodologia desenvolvida foi criar um modelo conceitual de simulação para representar a lavra de minério da mina do estudo de caso pelo empreiteiro contratado.

Para construir o modelo conceitual de um modelo de simulação é preciso definir o problema a ser resolvido. Neste estudo a simulação será utilizada para determinar o nível de confiança de um plano de lavra.

Para simplificar o problema será considerada apenas a produção de minério em toneladas, então o objetivo da simulação é estimar a produção de minério em um período, no caso uma semana.

O foco deste modelo conceitual foi representar o que aconteceu na operação em si. Desta forma, os dados registrados no sistema de despacho foram a fonte do exercício de simulação. O plano de lavra foi ajustado de acordo com o que foi realizado e registrado pelo sistema, evitando influência da aderência do plano de lavra à operação e às paradas no sistema, como para manutenção e troca de turno.

A operação de lavra de minério, representada pela simulação, ocorre em um sistema de frente fixa. Então, para um determinado período sem paradas, e sendo conhecido o número de caminhões que trabalha em cada frente, o modelo conceitual pode ser representado pela Figura 12.

Figura 12 - Ilustração do modelo conceitual.

5.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Esta seção apresenta o procedimento de modelagem dos dados de entrada para o estudo de caso.

5.3.1 Coleta de Dados do Estudo

Foram analisados dados de uma semana de operação. Os dados foram coletados do banco de dados do sistema de despacho. Os tempos de basculamento, deslocamento britador – frente de lavra, carregamento e deslocamento frente de lavra – britador foram informados pelo operador do caminhão através de um computador de bordo.

5.3.2 Modelagem dos Dados

No período foram realizadas e registradas 3.849 viagens. Já no reconhecimento dos dados, foram realizadas as seguintes observações e exclusões.

- O despacho é realmente frente fixa. Para um determinado período o caminhão se desloca quase sempre para a mesma frente de lavra.
- Foram registradas viagens de 18 caminhões.
- Foi utilizado apenas um modelo de caminhão no período.
- Foram excluídas as viagens com pontos de basculamento e/ou carregamento não reconhecidos, restando 3.771 registros.
- Foram excluídas das viagens de estéril, resultando em 3.246 registros.

- As viagens isoladas (o caminhão se deslocava para a frente de lavra apenas uma vez), de 101 registros, 98 foram incorporadas a outra frente de lavra e 3 foram deletadas do banco de dados.
- No banco de dados há registros de viagens para 17 frentes de lavra.
- Os dados serão analisados por frente de lavra, independentemente dos equipamentos e turnos.

A metodologia de Tratamento de Dados apresentada no item “3.2.2 Tratamento de Dados” foi aplicada para os dados de deslocamento, carregamento, basculamento e manobra para bascular. A seguir é apresentado o tratamento dos dados do tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.

- **Ordenação dos Dados:** a ordenação dos dados não indicou nenhuma inconsistência, não tem valores nulos ou muito discrepantes.
- **Avaliação Descritiva:** foi realizada uma avaliação descritiva completa, os resultados obtidos foram

Número de Registros: 299

Média: 10,21 min

Moda: 10,38 min

Mínimo: 7,68 min

Mediana (Q_2): 10,15 min

Q_1 : 9,62 min

Q_3 : 10,78 min

Maximo: 15,33 min

Desvio Padrão: 0,95

Variância: 0,90

- **Visualização dos Dados:** foi criado o histograma da Figura 13 para a visualização gráfica dos dados.

Figura 13 - Histograma dos dados originais - tempo de deslocamento da frente de lavra "FA" para o Britador.

- **Limpeza dos Dados:** a Figura 13 mostra que a distribuição não possui assimetria (cauda) e a avaliação descritiva indica uma proximidade com a distribuição normal ($média \approx mediana \approx moda$). Por isso foi criado um gráfico de caixas (Figura 14). Foram excluídos os sete valores que o gráfico indicou como *outliners*.

Figura 14 - Gráfico de caixas dos dados originais - tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.

- **Inferência:** foram utilizados o gráfico de probabilidades (Figura 15), o teste do Qui-Quadrado ($p\text{-value} = 0,341$) e o teste de Kolmogorov-Smirnov ($p\text{-value} > 0.15$). Todos os métodos comprovaram que os dados seguem uma distribuição normal de média 10,17 e desvio padrão de 0,83.

Figura 15 - Gráfico de probabilidade dos dados limpos - tempo de deslocamento da frente de lavra “FA” para o Britador.

Este processo foi repetido para os dados de basculamento, manobra para bascular, carregamento e número de viagens (ida e volta) das 17 frentes. O tempo de

basculamento e de manobra para bascular foi considerado igual, independentemente do caminhão e da frente de lavra.

A distribuição do tempo de basculamento é uma erlang que é representada em minutos pela expressão $0.39 + \text{ERLA}(0.298, 3)$. O tempo da manobra para bascular é representado por uma distribuição lognormal de fórmula, em minutos, $0.06 + \text{LOGN}(0.167, 0.0749)$. A forma de representar as distribuições por expressões está no Anexo B.

Os tempos de deslocamento do britador para a frente de lavra, carregamento e deslocamento da frente de lavra para o britador foram calculados para cada frente de lavra, independentemente do equipamento de transporte. O resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuições Estatísticas por Frente de Lavra.

Frente de Lavra	Deslocamento Britador - Frente de Lavra - vazio (min)	Tempo de Carregamento (min)	Deslocamento Frente de Lavra - Britador - cheio (min)
FA	$5 + \text{ERLA}(0.426, 6)$	$\text{NORM}(1.96, 0.418)$	$\text{NORM}(10.17, 0.83)$
FB	$4 + \text{ERLA}(0.429, 7)$	$0.64 + \text{ERLA}(0.166, 8)$	$6 + \text{GAMM}(0.271, 11.9)$
FC	$5 + \text{GAMM}(0.528, 3.33)$	$0.47 + 5.15 * \text{BETA}(9.27, 21)$	$8 + \text{ERLA}(0.346, 8)$
FD	$5 + \text{GAMM}(0.395, 5.21)$	$1 + \text{ERLA}(0.159, 6)$	$\text{NORM}(10.9, 0.833)$
FE	$4 + \text{WEIB}(2.2, 2.29)$	$0.39 + \text{LOGN}(1.82, 0.806)$	$6 + \text{LOGN}(2.6, 0.97)$
FF	$4 + \text{GAMM}(0.576, 5.28)$	$\text{NORM}(2, 0.478)$	$8 + \text{GAMM}(0.48, 4.44)$
FG	$5 + \text{GAMM}(0.48, 5.11)$	$0.59 + 3.41 * \text{BETA}(8.18, 11.9)$	$8 + \text{GAMM}(0.421, 6.49)$
FH	$4 + \text{ERLA}(0.509, 4)$	$1 + \text{ERLA}(0.215, 5)$	$\text{TRIA}(7, 8.32, 11.5)$
FI	$4 + \text{ERLA}(0.674, 4)$	$1 + \text{ERLA}(0.199, 5)$	$6.29 + \text{ERLA}(0.36, 7)$
FJ	$\text{TRIA}(5.27, 9.09, 12)$	$0.5 + 5.19 * \text{BETA}(1.46, 1.5)$	$\text{TRIA}(9, 10.2, 12.6)$
FK	$5 + \text{WEIB}(2.25, 1.6)$	$\text{NORM}(2.16, 0.575)$	$8 + \text{WEIB}(1.61, 1.75)$
FL	$5 + 5 * \text{BETA}(2.42, 3.43)$	$\text{NORM}(2.16, 0.575)$	$\text{NORM}(10.8, 0.919)$
FM	$\text{TRIA}(5.05, 6.38, 10.8)$	$\text{NORM}(2.33, 0.537)$	$8.41 + 4.41 * \text{BETA}(3.36, 3.5)$
FN	$4.13 + \text{ERLA}(0.354, 7)$	$0.76 + 2.63 * \text{BETA}(5.55, 7.81)$	$7 + \text{LOGN}(2.55, 1.17)$
FO	$5 + 6 * \text{BETA}(4.3, 7.62)$	$0.62 + 3.31 * \text{BETA}(7.58, 11.1)$	$9 + \text{WEIB}(2.39, 2.37)$
FP	$5.62 + 2.71 * \text{BETA}(2.18, 2.63)$	$1.09 + \text{LOGN}(0.824, 0.386)$	$\text{NORM}(9.23, 0.542)$
FQ	$5 + \text{WEIB}(2.95, 1.5)$	$\text{NORM}(2.32, 0.679)$	$\text{TRIA}(6, 6.6, 9)$

5.4 MODELAGEM EM LINGUAGEM COMPUTACIONAL

O modelo conceitual e o banco de dados de simulação foram utilizados para criação de um modelo em linguagem computacional, para representar a operação de lavra de minério na mina em estudo.

O foco deste exercício de simulação foi representar a variabilidade nos ciclos completos, com atenção especial ao tempo de carregamento, deslocamentos, basculamento e eventuais filas. Portanto, os dados utilizados se limitaram à informação de ciclos completos. Interrupções, quebras, entre outros, não fazem parte do escopo do estudo.

O banco de dados recebido continha os seguintes dados: início da viagem, caminhão, modelo do caminhão, origem, destino, frente de lavra, equipamento de carga que está trabalhando na frente de lavra, tempo de deslocamento da ida e da volta, tempo de carregamento, tempo de manobra para bascular e tempo de basculamento. Todos os tempos estão em minutos.

Os dados recebidos foram modificados e separados por frente de lavra. Os tempos de início e final da operação foram arredondados para janelas de 15 minutos, o tempo de trabalho de um equipamento de transporte em uma frente de lavra foi determinado pela continuidade de registros de viagens e as pequenas paradas, como a ida do operador da máquina ao banheiro, foram desprezadas. A Tabela 5 apresenta um dos períodos para simulação. Os dados foram divididos em 18 períodos.

Tabela 5 - Dados filtrados por frente de lavra e discretizados no tempo.

Caminhão	Data	Hora Inicial da Operação	Hora Final da Operação	Frente de Lavra
C 08	Dia 7	01:30	06:30	FC
C 17	Dia 7	01:30	06:30	FC
C 16	Dia 7	01:00	06:30	FC
C 10	Dia 7	01:15	06:15	FC
C 13	Dia 7	01:15	06:30	FC
C 14	Dia 7	01:15	06:15	FC
C 15	Dia 7	01:15	06:30	FC
C 20	Dia 7	01:15	08:00	FD
C 21	Dia 7	01:15	08:00	FD
C 07	Dia 7	01:30	07:45	FD
C 23	Dia 7	01:00	07:45	FD
C 19	Dia 7	01:15	08:00	FD
C 22	Dia 7	00:45	07:45	FD
C 24	Dia 7	00:45	08:00	FD
C 14	Dia 7	06:30	07:00	FL
C 15	Dia 7	06:30	08:00	FL
C 16	Dia 7	06:30	08:00	FL
C 17	Dia 7	06:30	08:00	FL
C 10	Dia 7	06:15	08:00	FL
C 13	Dia 7	06:30	08:00	FL

Com os dados compilados, foram construídas tabelas binárias para representar o modelo de simulação. A Tabela 6 contém os valores binários correspondentes à Tabela 5.

Tabela 6 - Transformação dos dados em sistema binário para modelo de simulação.

Hora	Frente C							Frente D							Frente L								
	Distribuição de Caminhões							Soma	Distribuição							Soma	Distribuição						
1:00	--	--	1	--	--	--	--	1	--	--	--	1	--	1	1	3	--	--	--	--	--	--	0
1:15	--	--	1	1	1	1	1	5	1	1	--	1	1	1	1	6	--	--	--	--	--	--	0
1:30	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	7	--	--	--	--	--	--	0
6:15	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	7	--	--	--	--	1	--	1
6:30	1	1	1	--	1	--	1	5	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	6
6:45	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	6
7:00	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	6
7:15	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	1	1	1	1	1	7	--	1	1	1	1	1	5
7:30	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	1	1	1	1	1	7	--	1	1	1	1	1	5
7:45	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	1	1	1	1	1	7	--	1	1	1	1	1	5
8:00	--	--	--	--	--	--	--	0	1	1	--	--	1	--	1	4	--	1	1	1	1	1	5
8:15	--	--	--	--	--	--	--	0	--	1	--	--	--	--	--	1	--	--	--	--	--	--	0

A Figura 16 apresenta um diagrama do modelo em linguagem computacional e o modelo completo para o período da Tabela 6 está no anexo D.

Figura 16 - Diagrama do modelo do estudo de caso.

Na modelagem o caminhão é a entidade e a carregadeira e o britador são recursos, conforme definição do Anexo A. Para calcular a produção em toneladas, a simulação calcula o número de caminhões que basculam no Britador. Os processos envolvidos estão descritos a seguir.

- **Criar entidade caminhão:** cria caminhão conforme horário da Tabela 6.
- **Definir atributo:** define um atributo para o caminhão de acordo com a frente em que ele está alocado.
- **Deslocamento vazio:** atividade com duração do tempo de deslocamento Britador - Frente de Lavra da Tabela 4.
- **Carregar – ocupando recurso:** este processo inclui três tarefas: ocupar carregadeira, atividade com duração do tempo de carregamento na frente de lavra da Tabela 4 e liberar carregadeira. Este processo está sujeito a filas.
- **Deslocamento cheio:** atividade com duração do tempo de deslocamento Frente de Lavra - Britador da Tabela 4.
- **Ocupa britador:** o caminhão ocupa o recurso britador. Este processo está sujeito a filas.
- **Manobra para bascular:** atividade com duração de $0.06 + \text{LOGN}(0.167, 0.0749)$ em minutos, conforme item “5.3.2 Modelagem dos Dados”.
- **Bascular:** atividade com duração de $0.39 + \text{ERLA}(0.298, 3)$ em minutos, conforme item “5.3.2 Modelagem dos Dados”.
- **Libera britador:** o caminhão libera o recurso britador.
- **Filtrar pelo atributo:** separa os caminhões de acordo com seu atributo definido no início, para o caminhão voltar para a mesma frente de lavra.
- **Verificar se o caminhão continua operando:** verifica se o caminhão continua operando na frente de lavra, segundo horário da Tabela 6.
- **Retirar o caminhão do sistema:** o caminhão sai da operação.

5.5 DADOS OBTIDOS PELAS REPLICAÇÕES

O modelo em linguagem computacional foi implantado para gerar 100 replicações. Cada replicação é uma representação equívocável da produção que pode ser atingida no período estudado.

Para testar se as 100 replicações foram suficientes para representar o sistema foi utilizado o método da estabilização da média acumulada. A Figura 17 mostra a diferença percentual entre as médias acumuladas. O valor mínimo de replicações é o ponto onde o gráfico se aproxima e se mantém próximo de zero, neste caso aproximadamente 35 replicações. Entretanto, como o nível de confiança é calculado como a porcentagem de replicações que atingiram as metas do planejamento, serão utilizados os dados das 100 replicações.

Figura 17 - Diferença entre as médias acumuladas para 100 replicações.

Foi realizada uma avaliação descritiva dos dados conforme mostrado a seguir.

Número de Dados: 100	Q ₁ : 137.91 t
Média: 138.21 t	Q ₃ : 138.44 t
Moda: 138.27 t	Máximo: 139.83 t
Mínimo: 137.28 t	Desvio Padrão: 468 t
Mediana (Q ₂): 138.16 t	Variância: 218.84 t

Também foram avaliadas as filas resultantes da simulação e a Tabela 7 apresenta as estatísticas de todas as filas do sistema simulado no estudo de caso.

Tabela 7 - Estatísticas de filas do simulador do estudo de caso.

Recurso	Tempo em Fila (min)		Número em Fila	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
FA	0.39	6.29	0.10	3
FB	0.42	6.31	0.06	3
FC	0.63	8.98	0.17	5
FD	0.39	6.09	0.08	3
FE	1.73	21.64	0.47	7
FF	0.48	7.58	0.11	4
FG	0.37	7.28	0.08	3
FH	0.46	6.21	0.09	3
FI	0.50	7.84	0.13	4
FJ	0.71	9.98	0.11	3
FK	0.64	7.32	0.13	4
FL	0.27	5.27	0.05	2
FM	0.63	6.89	0.16	4
FN	0.23	3.90	0.05	3
FO	0.43	6.25	0.02	3
FP	0.20	4.58	0.04	3
FQ	0.36	7.02	0.06	3
Britador	1.83	14.34	0.25	5

Do ponto de vista prático, as filas são menores, pois os caminhões são realocados pelo despacho, temporariamente, para uma frente de lavra com uma fila menor ou no caso de britador, o caminhão bascula no estoque da britagem. Por exemplo, a fila de 21 minutos na frente de lavra “FE” não iria existir.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados gerados nas replicações foram analisados conforme os objetivos da simulação que inclui o nível de confiança e algumas outras variáveis que podem contribuir para a melhoria de tomada de decisões operacionais e de gestão da mina.

6.1 NÍVEL DE CONFIANÇA

Para este estudo, foram consideradas apenas as metas de produção, independentemente da qualidade do minério. Então o nível de confiança do plano de lavra é a porcentagem de replicações que atingem as metas de produção do período simulado. A meta de produção para a semana analisada era de 138.800 toneladas, com tolerância de 138.100 a 139.400 toneladas.

O nível de confiança obtido foi de 54%. A Figura 18 apresenta os resultados da simulação e as metas do planejamento.

Figura 18 - Resultados da simulação com as metas do planejamento.

A linha vermelha representa a média acumulada para cada replicação. A média das 100 replicações é de 138.210 toneladas, o que é muito distante da meta de produção, por isso o nível de confiança é baixo.

Para determinar uma nova meta de produção, que resulte em um nível de confiança mais alto, foi analisado o comportamento dos resultados das 100 replicações. Utilizando uma metodologia similar à apresentada no item “3.2 Modelagem dos Dados de Entrada”. Foi obtida uma distribuição normal de média de 138.147 toneladas e desvio Padrão de 383 toneladas, com histograma representado na Figura 19.

Figura 19 - Histograma do resultado das 100 replicações, da simulação do estudo de caso.

Considerando o plano de lavra fixo, foi determinado o valor ideal da meta para obtermos um nível de confiança razoável. A média da meta de produção foi determinada pela média da distribuição e a tolerância foi estimada como múltiplos do desvio padrão resultando nos dados da Tabela 8.

Tabela 8 - Sugestões de metas de produção para aumentar o nível de confiança.

Desvios Padrão	Tolerância (t)	Metas (t)		Nível de Confiança
		mínimo	máximo	
1	383	137.764	138.530	67%
2	766	137.381	138.913	89%
3	1.149	136.998	139.296	96%

Como pode ser observado na Tabela 8, quanto maior a tolerância da meta de produção, maior a confiabilidade do plano de lavra. Um valor razoável para a tolerância é o de dois desvios padrões, o que atinge um alto nível de confiança de execução desta meta. Com a meta sugerida foi construído o novo gráfico da Figura 20, que contém os resultados de produção da simulação e as metas sugeridas.

Figura 20 - Metas sugeridas para se obter um plano com um nível de confiança maior e resultados da simulação do estudo de caso.

Podemos observar que o intervalo das metas de produção (representado pelas linhas pontilhadas) da Figura 20 contém mais pontos simulados (pontos da linha azul) do que as metas originais representadas na Figura 18, e sua média está mais próxima da massa acumulada, resultando em uma meta mais exeqüível para a operação de lavra. O planejamento deveria adotar essa nova meta.

6.2 PROCESSO DE AVALIAÇÃO CONTÍNUA DO PLANO DE LAVRA

Este estudo analisou um plano de lavra. Entretanto, este pode ser avaliado continuamente com a mesma metodologia do item “4 Avaliação do Plano de Lavra Utilizando Simulação”, mas com possíveis correções no modelo de simulação, no planejamento e gestão da variabilidade operacional. Este processo é representado na Figura 21.

Figura 21 - Proposta de processo de avaliação contínua do Plano de Lavra.

Planejar a Lavra a Curto Prazo: Planejamento das áreas a serem lavradas em um determinado período, incluindo a alocação de equipamentos de carga, lista associando equipamento – frente de lavra no período.

Determinar Nível de Confiança: aplicar a metodologia da Figura 11.

“Simulação atinge o nível exigido?”: o nível de confiança atingiu o valor pré-estabelecido pela gestão da mina.

Corrigir o modelo de simulação: com o passar do tempo o modelo pode não ser válido, e deve ser realizada a verificação e a validação do modelo continuamente.

Corrigir os dados do planejamento: verificar e corrigir diferenças entre as médias consideradas inicialmente e o resultado do simulador, para corrigir o plano. Por exemplo: produtividade, filas, distância média de transporte etc.

Gerenciar a Variabilidade: gestão da variabilidade para tentar diminuí-la. Caso não seja possível, deve-se aceitar e formalizar a variabilidade, assumindo que não é

possível, pelo menos como o planejamento é feito hoje, utilizando as médias, atingir o nível de confiança desejado. Uma metodologia é sugerida no item “6.4 Gestão da Variabilidade Operacional”.

6.3 PARADAS NO SERVIÇO

Para simplificar o estudo de caso nesta dissertação, foram considerados na simulação apenas os dados de horas trabalhadas. Os dados de paradas, como manutenção corretiva e programada, influenciaram indiretamente no resultado da simulação, diminuindo o número de horas trabalhadas. A variabilidade, em relação à data de ocorrência e duração da manutenção corretiva e outras paradas não programadas, foi desprezada.

Em simulação, as interrupções do serviço, de uma maneira geral, podem ser classificadas conforme segue abaixo.

- **Domínio:** geral, como almoço, detonação etc. ou específico, para um equipamento, uma frente de lavra etc.
- **Tipo de Falha:** baseada em tempo, quando a interrupção ocorre em um determinado intervalo de tempo ou baseada em contagem, quando a interrupção ocorre após a passagem de determinado número de entidades.
- **Ocorrência:** programada, que tem início e duração pré-determinados ou não programada, que tem início e duração estocásticos, ou seja, devem ser sorteados.
- **Comportamento do Sistema:** qual o comportamento no caso do recurso que irá falhar estar atendendo uma entidade. Os comportamentos padrões são: a falha irá ocorrer imediatamente, aguardar ou será ignorada. No caso “Imediato”, o recurso irá interromper o processo, sofrer o tempo de falha e, quando voltar a funcionar terminará o processo a partir do ponto em que foi interrompido. No “Aguardar”, o recurso não interrompe o trabalho enquanto

estiver ocupado. Quando uma falha acontece, este espera que o processo termine e só então entra no estado “Falha”, transcorrendo o tempo normalmente. No “Ignore”, o recurso falha mesmo quando ocupado pela entidade, mas o tempo de falha transcorre junto com o tempo de processo, que é encerrado normalmente. Para a mineração, é necessário mais um caso, onde a entidade abandona o recurso em falha, caso do caminhão quando o equipamento de carga falha durante o carregamento. Esta situação foi denominada “Abandona”. A Figura 22 representa o estado de um recurso que atende uma entidade por 25 minutos a partir do tempo 10 minutos e falha no momento 20 minutos do processo, segundo os diferentes comportamentos.

Figura 22 - Estado de um equipamento que falha, de forma diferente, durante o atendimento de uma entidade.

Em termos de paradas, o grande desafio é representar as manutenções, os principais aspectos em relação a um estudo de simulação são:

- manutenção programada - representar o adiamento ou atraso da manutenção programada, que ocorre por motivos práticos, como o conserto do ar condicionado de um caminhão, que pode aguardar se o número de caminhões disponíveis for muito baixo;
- manutenção não programada - a determinação do intervalo de ocorrência é complexa, como um modelo baseado em algoritmos genéticos para determinar o intervalo entre falhas de equipamentos de mineração para alimentar um modelo de simulação discreta desenvolvido por Yuriy e Vayenas (2007);
- previsão de manutenção para curto prazo - é necessário estudar a influência entre o histórico de manutenção e a probabilidade de falhas e como tratar manutenções corretivas que têm intervalos de ocorrência maiores do que o período simulado.

6.4 GESTÃO DA VARIABILIDADE OPERACIONAL

Além das variáveis necessárias para calcular o nível de confiança, a simulação pode fornecer outras variáveis que representam o funcionamento do sistema, denominadas variáveis indicatrizes. Estas podem explicar a diferença entre planejado e simulado de duas formas:

1. Através das discrepâncias entre as médias que o planejamento considerou para fazer o plano de lavra e as médias obtidas pelo simulador.
2. Indicar quando o problema não é as discrepâncias das médias e sim a alta variabilidade. Neste caso não adianta refazer o plano de lavra. Uma metodologia de avaliação e controle de variabilidade é sugerida a seguir.

Existem três maneiras de agir sobre a variabilidade de uma variável indicatriz:

1. **Diminuir a variabilidade da “variável indicatriz”** - a Figura 23 ilustra uma metodologia de identificação da variabilidade e análise de soluções para diminuir a variabilidade.
2. **Diminuir o impacto da variabilidade da “variável indicatriz” no atendimento das metas.**
3. **Gerenciar a variabilidade da “variável indicatriz”** - caso as atividades anteriores não sejam viáveis, deve-se formalizar a variabilidade e adequar as metas de produção e qualidade.

A identificação das variáveis que podem ser alteradas e o estudo de viabilidade de soluções podem ser determinados e testados pelas metodologias de simulação e de análise de dados apresentadas na avaliação do plano de lavra.

Uma das oportunidades identificadas para a continuidade desta pesquisa é a aplicação de ferramentas de análise de complexidade para avaliar a sensibilidade e a relevância das diferentes variáveis que afetam o nível de confiança do plano, e assim permitir a determinação das variáveis indicatrizes.

Figura 23 - Metodologia para redução de variabilidade de uma variável indictriz.

6.5 GESTÃO DE DADOS INCONSISTENTES

Esta dissertação apresentou uma metodologia de tratamento de dados que identifica e exclui os dados não usuais ou inconsistentes, mas em estudo de avaliação contínua é importante rastrear o que gerou e como reduzir estes dados (Figura 24).

Figura 24 - Gestão de dados inconsistentes.

Determinar o que é dado inconsistente: podem ser utilizadas a experiência do analista ou a metodologia apresentada no item “3.2.2 Tratamento de Dados”. Por exemplo, tempos de carregamento nulos, muito baixos ou muito altos.

Calcular a porcentagem de dados inconsistentes no banco de dados.

Identificar a etapa que gerou o erro: se o erro foi cometido na etapa de coleta, armazenagem ou disponibilização dos dados.

Estudar possibilidades de redução de erros: avaliar como reduzir o registro de dados inconsistentes, como treinar o operador para utilização correta do computador de bordo.

Implantar solução proposta: dentre as possibilidades estudadas, selecionar e implantar a mais apropriada.

Definir metas de porcentagem de dados inconsistentes: com base na porcentagem calculada e na expectativa da solução proposta definir metas de redução, ou ao menos manter a porcentagem dos dados inconsistentes.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no estudo de caso comprovaram os benefícios práticos da metodologia de simulação de lavra proposta na pesquisa, em particular, no estabelecimento de metas de produção mais adequadas às condições operacionais da mina estudada.

As principais conclusões desta pesquisa são descritas a seguir.

- Utilizar o “nível de confiança do plano de lavra” como apenas mais um índice deste não vai auxiliar a comunicação entre o planejamento de lavra e a operação da mina.
- A aplicação da metodologia de avaliação do plano de lavra deve envolver as áreas de planejamento, operação e gestão da mina.
- A análise de dados e a construção do modelo de simulação vão formalizar os procedimentos envolvidos na lavra.
- As soluções para controle da variabilidade operacional irão depender das condições de cada mineração. Por exemplo, uma mina que não tem espaço para fazer estoque não vai considerar esta alternativa.
- Este trabalho está mais focado em auxiliar a área de planejamento, mas nada impede que as ferramentas aplicadas sejam utilizadas com outros propósitos. Por exemplo, pode-se citar o educacional: a simulação de um cenário onde não houvesse planejamento ilustraria para a área de operação a importância deste.
- Esse estudo se difere dos revisados na literatura, por procurar identificar e explicar a variabilidade dos resultados e propor a simulação como uma ferramenta cotidiana para tomada de decisões gerenciais e não apenas para solucionar um problema específico.
- Um modelo de simulação simples apresentou resultados significativos.

Para continuidade da presente pesquisa é sugerido:

- Desenvolver um modelo de simulação automatizado, que colete as informações diretamente de um banco de dados, para tornar mais rápido o

estudo de simulação tornando o tempo de análise compatível com o tempo do planejamento de curto prazo.

- Adicionar a variabilidade geológica e a aderência do plano de lavra versus o realizado na simulação.

REFERÊNCIAS

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

BILLER, B.; NELSON, B. L. Answer to the Top Ten Input Modeling Questions. In: **Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference**. p. 35-40, 2002

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **The Unified Modeling Language User Guide**. Reading Mass. : Addison-Wesley, c1999.

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

CHWIF, L.; MEDINA, A. C.. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Bravarte, 2006. v. 1. 255 p.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas – Com Aplicações em ARENA**, Visual Books Editora, 2001.

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

LAW, A. M; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**, 3ª Edição. McGraw-Hill, Singapore, 2000.

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

PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. Belo Horizonte; Nova Lima : Desenvolvimento Gerencial: INDG Tecnologia e Serviços, 2004.

RAMOS NETO, A. N.; PINTO, L.R. “Template do programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu-aberto”, “**R.E.M. Ouro Preto**”, 57 (1), 65-69, Ouro Preto, Brasil, Janeiro 2004.

RUMBAUGH J. **Object-oriented modeling and design**. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, c1991

STURGUL, J.R. Discrete mine system simulation in the United States, **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, 13:2, 37 - 41, 1999.

STURGUL, J.R. Modeling and Simulation in Mining - Its Time Has Finally Arrived, **SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International**; 76; 286, 2001.

VICENT, S. Input Data Analysis, In: Banks, J. (Ed.), **Handbook of Simulation**, New York: John Wiley and Sons, 1998. p.55-91.

YURIY, G. AND VAYENAS, N. “Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms”, **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, 22:1, 70 – 83, 2007.

ANEXO A - ELEMENTOS DA SIMULAÇÃO DISCRETA

Os principais elementos que compõem um modelo de simulação discreta, segundo Kelton et al. (2004), são descritos a seguir.

- **Entidade:** objeto de interesse do sistema; é a parte circulante do modelo.
- **Recurso:** serve entidades, representa a estrutura do sistema (máquina, pessoa, meio de transporte etc.). As características básicas são tempo de atendimento e capacidade.
- **Atributo e Variável:** meios de armazenamento de valores, com a diferença de que atributo é uma propriedade de uma entidade e variável vale para todo o modelo.
- **Acumuladores:** variáveis que acumulam valores no tempo para medir o desempenho do sistema. Após receberem tratamento de análise geram as estatísticas da simulação.
- **Atividade:** representa o comprimento de um período de tempo, que pode ser determinístico ou estocástico e estar associado ou não à ocupação de um recurso.
- **Evento:** marca o início e o fim de uma atividade.
- **Relógio:** marca o tempo da simulação.
- **Lista de Eventos Futuros:** armazena, em ordem cronológica, os eventos previstos para ocorrer no futuro.
- **Cenário:** um conjunto de configurações de dados e de entidades; o sistema usado para testar hipóteses.
- **Aquecimento:** período inicial de estabilização do sistema; as estatísticas geradas não são contabilizadas na simulação.
- **Replicação:** intervalo de tempo simulado, não inclui o aquecimento. Em uma simulação estocástica são realizadas várias replicações para avaliar a variabilidade do modelo.
- **Rodada ou Corrida:** tempo total de simulação, inclui o período de aquecimento e todas as replicações.

- **Estado do Sistema:** coleção de variáveis necessárias para descrever um sistema em um determinado momento, em relação a um dos objetivos do estudo.
- **Fila:** espera de uma entidade pela liberação de um recurso.
- **Animação:** representação gráfica dinâmica do processo simulado.
- **Falhas:** interrupções não programadas de um recurso.

ANEXO B - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES

Este anexo apresenta as principais distribuições de variáveis contínuas teóricas.

Distribuição Normal

- Parâmetros: σ^2 : (variância) e μ : (média); números positivos .
- Características: simétrica; forma de sino; variabilidade controlada pelo desvio-padrão.
- Aplicabilidade: quando a probabilidade de ocorrência de valores acima da média é a mesma que de valores abaixo da média; quando o tempo de um processo pode ser considerado a soma de diversos tempos de sub-processos; processos manuais.
- Representação: NORM(Média , DesvioPadrão).

Distribuição Exponencial

- Parâmetros: λ : (taxa de ocorrência).
- Características: variância alta; cauda para direita.
- Aplicabilidade: grande variabilidade dos valores; independência entre um valor e outro; muitos valores baixos e poucos valores altos; utilizada para representar o tempo entre chegadas sucessivas e o tempo entre falhas sucessivas.
- Representação: EXPO(Média).

Distribuição Uniforme

- Parâmetros: a : (menor valor) e b : (maior valor); são números reais tais que $a < b$.
- Características: todos os valores no intervalo são igualmente prováveis de ocorrer.
- Aplicabilidade: quando não se tem nenhuma informação sobre o processo ou apenas os valores limites (simulação do pior caso).
- Representação: UNIF(Min , Max).

Distribuição Triangular

- Parâmetros: a : (menor valor) e b : (maior valor) e m : (moda) valor que mais ocorre; são números reais tais que $a < m < b$.
- Características: simétrica ou não.
- Aplicabilidade: quando se conhece ou se tem um bom “chute” sobre a moda (valor que mais ocorre), o menor valor e o maior valor que podem ocorrer.
- Representação: TRIA(Min , Moda , Max).

Distribuição Beta

- Parâmetros: parâmetros de forma β e α .
- Representação: BETA(Beta , Alpha).

Distribuição Erlang

- Parâmetros: λ : (taxa de ocorrência) e κ : (parâmetro de forma).
- Representação: ERLA(Média Exponencial , k).
- Uma distribuição Erlang é a soma de k distribuições exponenciais com média (σ/k) .

Distribuição Gama

- Parâmetros: α : (parâmetro de forma) e β : (parâmetro de escala).
- Representação: GAMM(Beta , Alpha).

Distribuição Lognormal

- Parâmetros: μ : (parâmetro de escala ou posição) e σ : (parâmetro de forma ou de dispersão); números positivos reais.
- Representação: LOGN(LogMedia , LogDesvioPadrão).

Distribuição Weibull

- Parâmetros: α : (parâmetro de forma) e β : (parâmetro de escala).
- Representação: WEIB(Beta , Alpha).
- A distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull.

ANEXO C - MODELO COMPUTACIONAL DO SISTEMA EXEMPLO, NA LINGUAGEM DE SIMULAÇÃO DO SOFTWARE ARENA®

A figura C1 é a animação do modelo do exemplo apresentado no item “3.4 Aplicação Didática do Processo de Simulação”. Conforme o modelo é executado, a animação exibe os estados das entidades. Por exemplo, o farol ao lado do britador indica se ele está ocupado ou não, a carregadeira muda de figura: a da frente A está ocupada e da frente B está ociosa. Os caminhões também alteram de estado (cheio e vazio) e as filas também são representadas.

A figura C2 é o modelo em linguagem computacional em Arena®. O software Arena® utiliza um sistema de *templates*, onde a programação é realizada por meio de fluxogramas.

Figura C1 - Animação do modelo de simulação: exemplo didático.

Figura C2 – Modelo de simulação em linguagem computacional no software Arena® do sistema exemplo.

ANEXO D - MODELO COMPUTACIONAL, DO ESTUDO DE CASO, NA LINGUAGEM DE SIMULAÇÃO DO SOFTWARE ARENA®

Figura D1 – Modelo de simulação em linguagem computacional no software Arena® do estudo de caso.