



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM



Dissertação de Mestrado

**A Simulação a Eventos Discretos como ferramenta de apoio à
Tomada de Decisão em empresas do ramo de mineração:
Aplicação em uma unidade da Yamana Gold**

Autor: Tiago Francioli Souza

Orientador: Prof. Dr. Ivo José Eyer Cabral

Ouro Preto – MG

Dezembro – 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINERAL**

**A Simulação a Eventos Discretos como ferramenta de apoio à
Tomada de Decisão em empresas do ramo de mineração:
Aplicação em uma unidade da Yamana Gold**

Autor: Tiago Francioli Souza

Orientador: Prof. Dr. Ivo José Eyer Cabral

**Dissertação de mestrado
apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mineral da Universidade
Federal de Ouro Preto, como
parte integrante para os
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Mineral. Área de Concentração:
Lavra de Mina.**

Ouro Preto, Dezembro de 2009

S729s

Souza, Tiago Francioli.

A simulação a eventos discretos como ferramenta de apoio à tomada de decisão em empresas do ramo de mineração [manuscrito] : aplicação em uma unidade da Yamana Gold./ Tiago Francioli Souza. – 2009.

ix, 74 f.: il.; color.; grafs., tabs., mapas.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas.

1. Pesquisa operacional - Teses. 2. Métodos de simulação - Teses. 3. Lavra subterrânea - Teses. 4. Minas e recursos minerais - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

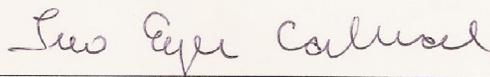
CDU: 622.012-048.63

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

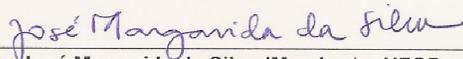
**“A SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS COMO
FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO EM
EMPRESAS DO RAMO DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO EM UMA
UNIDADE DA YAMANA GOLD”**

AUTOR: TIAGO FRANCIOLI SOUZA

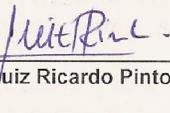
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 21 de dezembro de 2009, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



• Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (Orientador) – UFOP



• Prof. Dr. José Margarida da Silva (Membro) – UFOP



• Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto (Membro) – UFMG

“Descobri que a vida é um eterno desafio e não devemos aceitar viver uma vida medíocre só porque é mais fácil.

O mundo, felizmente, será sempre cheio de novidades: alturas que nunca foram alcançadas; lugares que nunca foram vistos; idéias que nunca foram pensadas; criações que nunca foram criadas.

Não é preciso que sejam imensas alturas, nem fantásticas idéias, nem estupendas criações. Basta que seja um pouco mais que seu limite de agora. Se esforçar para ampliar os limites, um pouco de cada vez, porém sempre mais, sempre se expandindo, faz descobrir a verdadeira finalidade da vida e o prazer de vencer o maior desafio que é o de superar a si mesmo.”

(Valter Lino)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha querida mãe e ao meu pai por estarem sempre ao meu lado em todas as minhas decisões. Obrigado por tudo.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	viii
RESUMO	ix
Capítulo 01 - Introdução e metodologia.....	1
1.1 - Introdução.....	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Justificativa e Relevância	2
1.4 - Estrutura do Trabalho.....	3
1.5 - Metodologia.....	3
1.6 - Etapas do Projeto	5
Capítulo 02 - Revisão Bibliográfica	8
2.1. Simulação Computacional	8
2.1.1. Conceitos e Vantagens.....	8
2.1.2. Tipos de Simulação	10
2.2. Terminologia básica utilizada em modelagem e Simulação de Sistemas	10
2.3. Desenvolvendo um modelo de simulação computacional.....	12
2.4. Usando o Software Arena em Simulação	15
2.5. Aplicações da Simulação na Mineração.....	16
2.6. Apresentando o ambiente Arena	26
Capítulo 03 - Descrição do Sistema Abordado	32
3.1. Introdução	32
3.2. Aspectos Geológicos	33
3.3. Lavra Subterrânea na JMC	34
3.4. O sistema simulado – A mina de João Belo	41
Capítulo 04 - O modelo de simulação.....	47
4.1. O sistema e o tempo a ser simulado	47
4.2. A estrutura do modelo	49
4.3. O fluxo das entidades no modelo	60
4.4. Tratando a disponibilidade dos equipamentos.....	61
4.5. Tratando a variabilidade do sistema.....	62
Capítulo 05 - Resultados do modelo.....	65
5.1. Validação do modelo.....	65
5.2. Análises disponíveis nos relatórios do Arena	66
Capítulo 06 - Estudando cenários futuros	67
6.1. Troca do sistema de turnos de trabalho	67
6.2. Estudo da capacidade da Mina João Belo.....	68
Capítulo 07 – Implantação do Projeto e Trabalhos futuros.....	71
7.1. Propostas de trabalhos futuros	71
Capítulo 08 – Conclusões.....	72
BIBLIOGRAFIA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Passos num estudo de simulação	14
Figura 2: Estrutura básica de um modelo de simulação.....	16
Figura 3: Ambiente de trabalho do software Arena.....	27
Figura 4: Módulo Process do Software Arena.....	28
Figura 5: Módulo Entity do Software Arena	28
Figura 6: Módulo Entity do Software Arena	29
Figura 7: Tela de edição do módulo create do software Arena	29
Figura 8: Tela de edição do módulo process do software Arena.....	30
Figura 9: Tela de edição do módulo assign do software Arena	31
Figura 10: Composição da extração de minério por mina da JMC	33
Figura 11: Mapa Geológico de localização da JMC.....	33
Figura 12: Método de Lavra Sublevel Open Stopping	37
Figura 13: Equipamentos de Perfuração (Jumbo e Fandril).....	38
Figura 14: Perfuração Horizontal (Jumbo).....	38
Figura 15: Equipamento Scaler para abatimento de choccos.....	39
Figura 16: Carregadeira LHD.....	40
Figura 17: LHD para carregamento subterrâneo	40
Figura 18: Caminhão tipo Caterpillar AD45.....	41
Figura 19: Caminhão Caterpillar AD45 entrando na Mina João Belo.....	41
Figura 20: Ilustração Mina Subterrânea.....	42
Figura 21: Tela de animação do modelo em Arena.....	51
Figura 22: Tela de entrada de dados gerais via Excel.....	54
Figura 23: Resultados obtidos na simulação via Arena	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificações de uma pesquisa.....	4
Tabela 2: Programação Mensal de frentes de desenvolvimento exploratório da mina João Belo	48
Tabela 3: Programação Mensal de frentes de desenvolvimento produtivo da mina João Belo	48
Tabela 4: Programação Mensal de frentes de lavra da mina João Belo.....	49
Tabela 5: Entrada de dados de distâncias e velocidades	55
Tabela 6: Entrada de dados dos equipamentos.....	56
Tabela 7: Entrada de dados do Plano de Produção.....	56
Tabela 8: Entrada de dados dos teores	57
Tabela 9: Validação do modelo	65
Tabela 10: Variáveis alteradas na mudança do sistema de turnos.....	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

JMC – Jacobina Mineração e Comércio

PO – Pesquisa Operacional

EUA – Estados Unidos da América

FIFO – First in First out (Primeiro a entrar, primeiro a sair)

SIMAN – Linguagem de Simulação

CINEMA – Linguagem de Simulação

PC – Computador Pessoal

GPSS – Linguagem de Simulação

LKAB – Grupo privado de Mineração com atividades e vários países

SIGUT – Pacote desenvolvido para simulação de sistemas

CVRD – Companhia Vale do Rio Doce

CAD – Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)

C++ - Tipo de linguagem de programação (C com classes)

MS – Microsoft

SAMA – Minerações associadas de Amianto

LHD – Load, Haul and Dump (Carregamento, transporte e

SIMUL –

S.A. –

AD45 – Modelo de Caminhão articulado para Mina Subterrânea da Ceterpillar

N-S – Norte - Sul

W-E – Oeste - Leste

US\$ - Dólar

RESUMO

Este trabalho tem seu enfoque nas atividades de Planejamento de Mina da Jacobina Mineração e Comércio. Seu principal objetivo foi demonstrar a utilidade da simulação a eventos discretos, aplicada às operações de mina, como ferramenta de apoio à tomada de decisões na empresa. Para isso, foi desenvolvido um modelo de simulação de uma parte do sistema de produção da empresa utilizando o software Arena. A intenção foi que este protótipo reproduzisse a realidade da parte do sistema em questão, para que assim pudesse ser utilizado como ferramenta para análises de possíveis mudanças estratégicas no sistema produtivo.

O trabalho foi desenvolvido em 03 fases, construção do modelo, validação do modelo e estudos estratégicos sobre o sistema analisado. Após a conclusão do modelo, comparando os resultados obtidos aos resultados do sistema real, o modelo foi validado. Com o objetivo de demonstrar que a Simulação é ferramenta eficaz para o auxílio à tomada de decisões, simulou-se dois novos cenários, onde foram consideradas hipóteses de mudanças estratégicas no sistema. A partir da análise dos novos cenários, foi possível comprovar que a ferramenta simulação a eventos discretos é muito eficaz para suporte às tomadas de decisões, atingindo assim o objetivo do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Pesquisa Operacional, Simulação a eventos discretos, Lavra Subterrânea

ABSTRACT

The approach of this worked is the Mine Planning at Jacobina Mineração e Comércio. Your Manly objective is to prove the usefulness of discrete event simulation of Mine Operations for decision making. The part of JMC production system was simulated in Arena Software, with to intend to simulation model represents the actual system, to utilize the model with tool for decision making analyses.

The worked was development in 03 phases: construction of the simulation model, validation of the simulation model and Strategy Study about the system analysis. Comparing the results of simulation model with results of actual system, the simulation model was validated. With objective to demonstrated that the discrete event simulation is the efficient tool for support of decision making, two news scenarios were simulated, considering strategic changes. From the analyses of news scenarios, was possible attested that the simulation tool is very effective to support the decision making analyses.

KEYWORDS: Operational Research, discrete event simulation, Underground Mining.

Capítulo 01 - Introdução e metodologia

1.1 - Introdução

De acordo com Schriber (1974) apud Freitas Filho (2008), “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorram ao longo do tempo”.

Considerando a definição acima, Pegden (1991) apud Freitas Filho (2008), apresenta uma definição mais completa, abrangendo todo o processo de simulação. Ele cita que “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Neste contexto, observa-se que na época de Schriber (1974) ainda era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para se estudar e analisar o comportamento de sistemas, pois no conceito de Schriber ainda não é especificado que o modelo deva ser computacional. Já na definição de Pedgen (1991) observa-se a importância da utilização de recursos de informática em atividades de simulação.

Segundo Freitas Filho (2008), mais do que nunca, a simulação computacional tem sido utilizada. O crescimento da utilização dessa ferramenta deve-se, sobretudo, à atual facilidade de uso e sofisticação dos ambientes de desenvolvimento de modelos computacionais, aliadas ao crescente poder de processamento das estações de trabalho. Contando com interfaces gráficas cada vez mais amigáveis, destinadas às mais diversas plataformas e, principalmente, fazendo intenso uso da animação dos sistemas que estão sendo simulados, a simulação computacional deixou para trás o estigma de ser utilizada apenas “quando tudo mais já foi tentado”.

“A simulação tem sido cada vez mais aceita e empregada como uma técnica que permite aos analistas dos mais diversos seguimentos (administradores, engenheiros, biólogos, técnicos em informática, etc.) verificarem ou encaminharem soluções, com a profundidade desejada, aos problemas com os quais lidam diariamente”. (Freitas Filho, 2008)

Neste trabalho procurou-se demonstrar, através do software ARENA, que a simulação computacional, é uma ferramenta útil como ferramenta de análise estratégica das atividades operacionais de extração de minério da mina João Belo, pertencente à

Jacobina Mineração, podendo assim, ser utilizada para auxiliar à tomada de decisões na empresa.

1.2 - Objetivos

Objetivo Geral

Demonstrar a simulação computacional a eventos discretos como ferramenta de apoio eficaz às atividades de tomada de decisões na Jacobina mineração e comércio, a partir do desenvolvimento de um modelo de simulação, utilizando o software Arena, do sistema de extração de minério e estéril de uma das minas da empresa.

Objetivos Específicos

- Simular, utilizando o Software Arena, o cenário atual das atividades de extração de minério da Mina João Belo da Jacobina Mineração.
- Provar que o modelo de simulação obtido representa parte do sistema real que se tentou simular.
- Apresentar à empresa, análises de cenários alternativos para o sistema analisado, demonstrando vantagens e desvantagens na adoção destes cenários, provando, a partir destas análises, que a simulação computacional, é uma ferramenta eficaz para auxílio à tomada de decisão.

1.3 - Justificativa e Relevância

Atualmente todo o processo de dimensionamento de recursos para cumprimento do Plano de Produção da Mina de Jacobina, e todo processo de análise de cenários, são desenvolvidos com base em variáveis determinísticas, utilizando Planilhas em Microsoft Excel. Logo, muitas vezes as decisões são tomadas de forma intuitiva sem uma análise baseada em ferramentas que valorizam a lógica.

Observou-se uma necessidade em demonstrar à empresa a Simulação a Eventos Discretos, como ferramenta para suporte a este tipo de análise, pois esta considera a

estocasticidade das variáveis, ou seja, a variabilidade presente em todos os sistemas reais, aumentando assim a confiabilidade das decisões.

Dessa forma, o trabalho foi justificado diante da atual situação do processo de tomada de decisão na empresa.

1.4 - Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado como segue. No presente capítulo, é contextualizada a utilização da ferramenta de simulação computacional, além de apresentadas a justificativa e relevância do presente trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica de conceitos e aplicações de simulação computacional, enfocando a utilização da ferramenta em atividades de mineração.

No capítulo 3 é descrito em detalhes o problema abordado.

No capítulo 4 é apresentado o modelo de simulação desenvolvido para o sistema abordado.

No capítulo 5 o modelo é validado através de comparações entre resultados obtidos a partir do modelo e resultados obtidos a partir do sistema real.

No capítulo 6 foram analisadas propostas de cenários futuros para o sistema analisado, utilizando a simulação computacional, visando desta forma, comprovar que a simulação realmente é uma ferramenta eficaz para auxílio às tomadas de decisões gerenciais na empresa.

No capítulo 7 são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos.

O capítulo 8 conclui o trabalho e apresenta propostas para trabalhos futuros.

1.5 - Metodologia

Esta seção apresenta o método de pesquisa utilizado neste trabalho. Segundo Lakatos e Marconi (1991), “método de pesquisa é um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que orientam a geração de conhecimentos válidos, indicando um caminho a ser seguido”.

Segundo Silva e Menezes (2000), “pesquisar significa, de forma bem simples, buscar respostas para indagações propostas”, porém a pesquisa pode ser classificada

segundo sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos, conforme apresentado na tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Classificações de uma pesquisa

Classificação	Tipos de Pesquisa	Descrição
Natureza	Básica	Objetiva gerar conhecimento novos e úteis para o avanço da ciência de problemas específicos.
	Aplicada	Objetiva gerar conhecimento para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos.
Abordagem	Quantitativa	Pesquisa aplicada através de estudos estatísticos voltados à quantificação do objeto de estudo
	Qualitativa	Pesquisa onde o processo de interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicos no processo de pesquisa. Os dados são analisados indutivamente.
Objetivos	Exploratório	Visa proporcionar maior familiaridade com o objetivo de estudo, tentando torná-lo explícito, ou construir hipóteses.
	Descritiva	Visa descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou ainda o estabelecimento de relação entre variáveis
	Explicativa	Visa identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos. Aprofunda o conhecimento porque explica o "porquê" das coisas.
Procedimentos técnicos	Bibliográfica	Quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e, atualmente, de material disponibilizado na Internet.
	Documental	Quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
	Experimental	Quando se determina um objeto de estudo. Selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo. Definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.
	Levantamento	Quando a pesquisa envolve a interrogação direta às pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
	Estudo de Caso	Quando envolve o estudo profundo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o se amplo e detalhado conhecimento.

Pesquisa-Ação	Quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. O pesquisador e os participantes estão envolvidos de modo cooperativo e participativo.
Pesquisa-Participante	Quando a pesquisa se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e os membros da situação investigada.
Expost-Facto	Quando o "experimento" se realiza após o acontecimento dos fatos.

Fonte: Adaptado de Silva, E. L. e Menezes, E. M. (2000).

Levando-se em consideração a classificação e a tipologia de pesquisa apresentada na tabela, este trabalho está enquadrado em uma pesquisa de natureza aplicada por objetivar a proposição de uma solução a um problema específico. Quanto à sua abordagem é uma pesquisa quantitativa, pois se desenvolve através de estudos estatísticos voltados à quantificação do objeto de estudo.

Já quanto ao objetivo, está classificada como uma pesquisa exploratória por buscar um maior entendimento do processo alvo. E finalmente, quanto aos procedimentos técnicos, é uma pesquisa bibliográfica (esta opção será detalhada nos parágrafos seguintes) e também experimental, pois, focalizando o objeto em estudo, atua sobre variáveis do mesmo, definindo as formas de controle e de observação dos efeitos que as mesmas produzem no objeto.

1.6 - Etapas do Projeto

O trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

a) Conhecimento do sistema a ser analisado

Esta etapa consistiu na familiarização com o sistema a ser analisado. Nesta etapa foi conhecida toda a rotina de planejamento, execução e controle do processo de mineração da unidade de Jacobina. Projetos de melhorias em fase de andamento ou ainda em fase de planejamento também foram analisados.

b) Identificação da demanda

Após a identificação de todas as variáveis relevantes envolvidas no sistema, foi analisada a demanda da utilização da simulação no sistema. Ressalta-se que a simulação está sendo utilizada visando comprovar sua eficiência como ferramenta de apoio à

tomada de decisões relacionadas ao sistema de produção. Dessa forma, foi selecionado uma parte do sistema produtivo da JMC e um período definido, visando utilizá-los como projeto piloto. Considera-se que atualmente a empresa utiliza técnicas de simulações pontuais e determinísticas para análises do sistema e cenários futuros para o mesmo, logo não possui um simulador estocástico que utiliza um software reconhecido no mercado como o Arena.

e) Coleta de dados

Esta etapa foi realizada *in loco*, onde foram acompanhadas todas as atividades do processo de mineração.

Além da coleta *in loco* foram analisados relatórios da área visando obter mais informações e feitas entrevistas com pessoal envolvido no cotidiano da operação.

f) Protótipo

O Protótipo consistiu na construção do modelo em papel visando modelar o sistema operacional da mineração, para que dessa forma, facilitasse o desenvolvimento do modelo utilizando o *software* Arena.

g) Construção do modelo do cenário atual

Esta etapa foi realizada utilizando-se uma versão *full* do *Software* Arena. Ressalta-se que a Yamana possui uma licença que foi concedida ao pesquisador para utilização na unidade de Jacobina. Junto ao modelo foi desenvolvido um arquivo em Excel para entrada dos dados que caracterizam o sistema produtivo. O objetivo da entrada de dados via Excel, foi desenvolver um modelo flexível, ou seja, de fácil alteração para respostas rápidas a análises de cenários variados, além de possibilitar que usuários que não tenham conhecimento do Arena utilizem o modelo sem grandes dificuldades.

i) Validação do modelo do cenário atual

Com o modelo do cenário atual pronto, foram realizados testes visando validá-lo. A validação tem o objetivo de provar que o modelo construído realmente representa o sistema real. Estes testes consistem na comparação entre alguns resultados obtidos com a simulação e resultados obtidos no sistema real. Um exemplo é comparar a quantidade de minério transportada para a usina de beneficiamento em certo período de tempo no sistema real à quantidade transportada na simulação no mesmo período de tempo e sob as mesmas condições operacionais.

l) Testes dos modelos dos cenários futuros

A partir dos modelos de simulação, foram realizados testes visando obter as vantagens e desvantagens da adoção de novos cenários no sistema real. Foram avaliados dois cenários como modelo:

1. Substituição dos turnos de 06 para 08 horas;
2. Análise da capacidade da Mina João Belo com a estrutura atual de equipamentos, visando posicionar a atual estrutura da Mina ao projeto de expansão 8.000 t/dia.

m) Validação dos modelos dos cenários futuros

Os modelos de cenários futuros foram também validados. Como estes cenários ainda não existem na realidade, estas validações foram realizadas utilizando-se a capacidade analítica dos envolvidos no projeto.

n) Apresentação dos resultados

Apresentação do trabalho como dissertação de mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro preto.

Capítulo 02 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre o tema simulação computacional e sua aplicação como ferramenta de apoio à tomada de decisões estratégicas em empresas do ramo de mineração.

2.1. Simulação Computacional

2.1.1. Conceitos e Vantagens

A Simulação é uma das ferramentas da Pesquisa Operacional (P.O), considerando, segundo Andrade (1989) apud Ramos Neto (2003) que, a P.O. é multidisciplinar e engloba ciências como a economia, estatística, matemática e a computação, sendo voltada para a análise e tomada de decisões. São dois os tipos de modelos usuais em P.O.: otimização e simulação.

Os modelos de otimização são aplicáveis quando todas as variáveis do sistema são determinísticas e são estruturados para a escolha de uma única alternativa, que será considerada ótima, segundo algum critério preestabelecido.

Os modelos de simulação devem ser usados em sistemas que possuem variáveis estocásticas. Estes modelos possibilitam a análise de diversos cenários para o processo de decisão. Cada cenário pode ser visto como uma configuração específica do sistema em análise. Assim, a simulação não produz uma solução ótima e única e, sim, uma resposta do sistema a uma determinada mudança de sua configuração.

Considerou-se que variáveis determinísticas, são aquelas que não possuem variações em sua ocorrência, ou seja, possuem um valor constante. As variáveis estocásticas são aquelas que variam durante sua ocorrência, ou seja, em cada ocorrência pode-se obter um valor específico repetido ou não, sendo este tipo de variável o mais presente em sistemas reais.

Segundo Sakurada (2003), a simulação pode ser definida como uma ferramenta de apoio a tomadas de decisão que utiliza modelos para reproduzir um sistema em estudo e resolver problemas cuja solução analítica se mostre inviável. A crescente

popularidade desta ferramenta pode ser atribuída aos avanços da tecnologia computacional, e a sua aplicabilidade no estudo de problemas complexos.

Outro conceito considera a simulação como uma ferramenta que possibilita expressar uma realidade em um ambiente virtual. Por sua flexibilidade, a Simulação contempla a variabilidade do sistema, gerando resultados dinâmicos, de acordo com os parâmetros estipulados. A sua utilização possibilita uma melhor visualização e entendimento do sistema real. (STEFFEN, 2005)

A simulação, segundo Pegden (1990), é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

A simulação tem sido uma técnica de planejamento largamente difundida no mundo atual, principalmente nos EUA, Japão e Europa. No Brasil esta técnica tem sido utilizada, principalmente no ambiente das grandes empresas, desde a década de setenta. (Prado, 2004)

O conceito de simulação mais aceito atualmente, de acordo com Prado (2004), é que a Simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital.

Neste contexto, conclui-se que a simulação é uma ferramenta pertencente à área da Pesquisa Operacional, que utiliza modelos construídos no computador, que representam o comportamento do sistema real, para fazer diversas análises em relação ao sistema atual ou a possíveis alterações estratégicas neste.

Uma das vantagens da simulação com relação a outras técnicas de apoio à tomada de decisão é justamente a observação da estocasticidade (variabilidade) dos sistemas, que não é levada em conta quando os mesmos são representados por modelos analítico/determinísticos. (Law & Kelton, 1991, apud Borba, 1998).

Além desta vantagem citam-se outras características que justificam a utilização desta técnica:

- Permite testar várias alternativas para a situação atual sem interferir na realidade, poupando tempo e evitando a implantação de alternativas avaliadas de forma insuficiente;
- Permite a observação de alternativas simuladas em longo prazo, ou seja, longos períodos de tempo, em poucos minutos.

- Permite análises antecipadas do sucesso ou insucesso de alterações feitas em sistemas existentes ou na criação de novos sistemas a um custo muito baixo, em relação a testes feitos depois de implantado o projeto em questão.

2.1.2. Tipos de Simulação

Segundo Ventura (2005), existe diversas maneiras de classificar a simulação, uma das maneiras utilizadas é a seguinte:

- Estática ou dinâmica: A maioria das simulações, dos modelos de operações, é dinâmica. O Software Arena foi desenvolvido com esta idéia, com esta visão, buscando a melhor forma de representar modelos dinâmicos.
- Contínuo ou Discreto: No modelo contínuo o estado do sistema pode mudar a cada momento. Um exemplo seria o nível da maré da praia. No modelo discreto as mudanças ocorrem em pontos separados no tempo. Como por exemplo, peças que chegam e saem de uma etapa de um processo produtivo ou descansos de funcionários. Também é possível a presença de elementos com as duas características no mesmo modelo.
- Determinístico ou estocástico: Os modelos que não possuem uma variação de entradas (inputs) são determinísticos. Já os modelos estocásticos possuem uma variação de entradas, por exemplo, a chegada de clientes a um banco em intervalos de tempo. Um modelo pode possuir os dois tipos, tanto determinístico como estocástico, para componentes diferentes. O Arena trabalha facilmente com ambos e aceita diferentes tipos de distribuição de probabilidades para representar a variabilidade destes componentes.

O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho pode ser classificado como discreto, dinâmico e estocástico.

2.2. Terminologia básica utilizada em modelagem e Simulação de Sistemas

Diversos termos técnicos são utilizados em projetos de simulação. Nessa seção será apresentado o conceito de alguns termos que serão muito utilizados na seqüência deste trabalho.

- **Entidades e Atributos:** As entidades são a parte dinâmica do sistema a ser analisado. É o que moverá entre as estações de trabalho, que são os pontos onde ocorre algum atendimento às entidades. Já os atributos, segundo Freitas Filho (2008), são as características próprias das entidades, isto é, aquelas que a definem totalmente. Os atributos associados às entidades também dependem do tipo de investigação que está sendo levada a efeito. Resumindo, atributo é uma característica particular de cada entidade, e quando esse é alterado em alguma estação de trabalho, só será alterado para aquela entidade. Ex: Tempo de deslocamento de uma entidade de uma estação a outra, é um atributo daquela entidade, ou seja, quando a entidade passa pela estação de trabalho inicial, cria-se um atributo para a entidade de valor zero, quando a entidade passa pela estação de trabalho final, lê-se o tempo novamente, registrando assim o tempo de deslocamento daquela entidade. Outro exemplo de atributo é a capacidade de uma entidade que é característica particular dela.
- **Recursos:** Um recurso, segundo Freitas Filho (2008), é considerado uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas, em uma estação de trabalho. Um recurso pode ter a capacidade de servir uma ou mais entidades dinâmicas ao mesmo tempo. Se uma entidade dinâmica não puder se apoderar de um recurso solicitado, ela deverá aguardar por ele em uma fila. A política de uma fila depende das características do sistema, o mais comum é o FIFO (First in, first out), primeiro a entrar, primeiro a sair. No entanto pode-se considerar outra política, tal como, dar prioridade para algum tipo de entidade que chegue para ser atendida pelo recurso.
- **Variáveis de estado:** São as variáveis que determinam o estado de um sistema. Segundo Freitas Filho (2008) as variáveis de estado constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do que está ocorrendo no sistema (ou no modelo representando este sistema) num determinado instante no tempo, com relação aos objetos de estudo. As variáveis são características do sistema que se deseja analisar, exemplo, tamanho de filas para atendimento em uma estação de trabalho. Ao contrário dos atributos, as variáveis não são características particulares das entidades, são características do sistema, logo podem ser alteradas por qualquer entidade.

- Eventos: Segundo Freitas Filho (2008) eventos são acontecimentos, ocorrências, programados ou não, os quais, quando ocorrem, provocam uma mudança de estado em um sistema. Ex: Chegada de uma entidade no sistema analisado.

2.3. Desenvolvendo um modelo de simulação computacional

Law e McComas (1992) mostram oito elementos fundamentais para o sucesso de um projeto de simulação. Eles estão divididos em três classes: técnica, gerencial e precisão dos dados.

Técnica:

- Conhecer sobre a metodologia de simulação, modelos estocásticos de pesquisa operacional e teoria das probabilidades e estatística;
- Modelar a aleatoriedade do sistema de maneira razoável;
- Escolher o software de simulação adequado e utilizá-lo corretamente;
- Usar procedimentos estatísticos apropriados para interpretar os dados de entrada e saída da simulação.

Gerencial:

- Formular corretamente o problema;
- Empregar técnicas de gerenciamento de projetos.

Precisão dos dados:

- Obter boa informação sobre os procedimentos de operacionalização do sistema e lógica de controle;

- Estabelecer a validade e credibilidade do modelo.

Levando-se em consideração estes elementos, deve-se seguir um método no estudo de simulação. Law e Kelton (1991) desenvolveram uma estrutura para gerenciar as diferentes etapas do trabalho. A figura 1 ilustra a seqüência de etapas a serem consideradas.

A primeira etapa consiste em formular o problema e planejar o estudo. Nesta fase é identificada a demanda de desenvolvimento do modelo de simulação para o sistema que se deseja analisar. A partir de comprovada a demanda, planeja-se o desenvolvimento do projeto, a etapa de planejamento é muito importante, pois ela será o rumo a ser seguido durante o desenrolar do projeto.

Depois de planejado o projeto, a próxima etapa consiste em coletar os dados e formular o modelo. Está é a fase mais importante, pois o modelo só será representativo, caso os dados coletados corresponderem à realidade do problema. Nesta fase, é importante o envolvimento do pesquisador junto ao sistema e as pessoas que dele fazem parte. É importante a organização da coleta de dados em forma de tabelas e questionários.

Com os dados e o protótipo do projeto em mãos, a próxima etapa é a construção do programa computacional. Nesta etapa, os dados coletados serão inseridos no programa visando desenvolver o modelo computacional. Na próxima etapa o modelo precisa ser validado a partir de uma ou mais rodadas pilotos.

A partir da validação do modelo faz-se o planejamento de experimentos, que consiste em fazer várias rodadas, visando coletar um número suficiente de dados para as análises estatísticas de saída.

Logo, depois da conclusão do modelo é hora das rodadas produtivas visando análise de cenários futuros para o sistema.

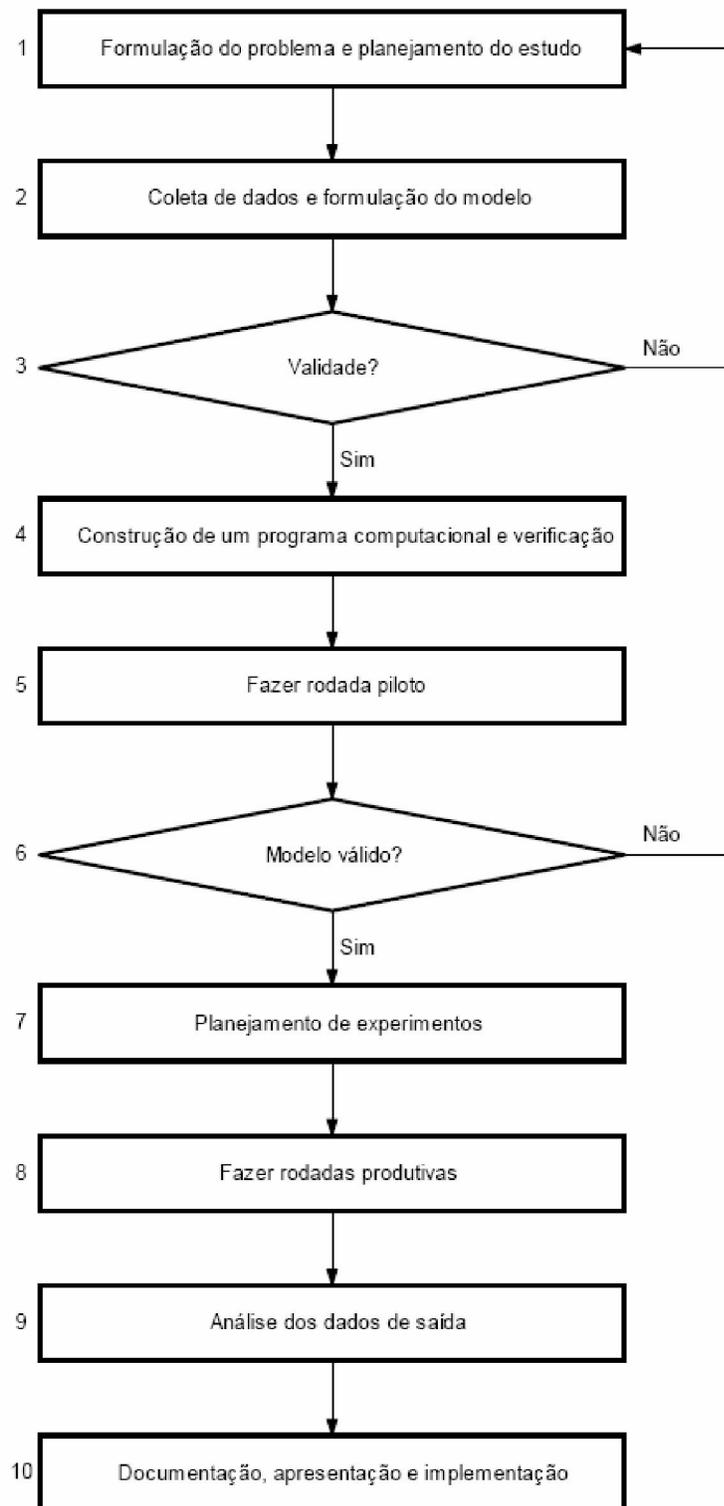


Figura 1: Passos num estudo de simulação
Fonte: Law e Kelton, 1991

2.4 Usando o Software Arena em Simulação

Uma das áreas da simulação é justamente a simulação de processos por computador, categoria na qual se enquadra a simulação utilizando o Software Arena.

Por “processos”, entende-se uma situação onde elementos estáticos, formando um ambiente bem definido com suas regras e propriedades, interagem com elementos dinâmicos, que fluem dentro desse ambiente.

O programa Arena surgiu em 1993, da junção de dois outros programas denominados SIMAN e CINEMA. Segundo Prado (2004), o SIMAN é uma linguagem de simulação e, em 1983, deu nome ao primeiro programa de simulação para computadores pessoais (PC). O CINEMA foi o primeiro programa para animação de simulação em PC e surgiu em 1984. O Software Arena é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados.

A construção do modelo é feita através da seleção do módulo que contém as características do processo a ser modelado. O modelador não precisa necessariamente conhecer a linguagem SIMAN para construir um modelo. Utilizando os templates disponibilizados pelo Software Arena, o usuário pode extrair um módulo (construção por blocos, drag-and-drop), localizá-lo no sistema analisado e parametrizá-lo de acordo com as características do sistema.

Tal como a maioria dos softwares de simulação, o Arena visualiza o sistema a ser modelado como constituído de um conjunto de estações de trabalho que prestarão serviços a entidades (clientes) que se movem através do sistema. O movimento pode ser feito pela própria entidade ou por transportadores ou correias. (PRADO, 2004)

Assim, segundo Prado (2004), para montarmos um modelo com o Arena, deve-se inicialmente, construir um desenho mostrando o sistema, constituído de (ver Figura 2):

- Estações de trabalho (onde a entidade receberá algum serviço)
- Opções de fluxo, para a entidade, entre as estações de trabalho

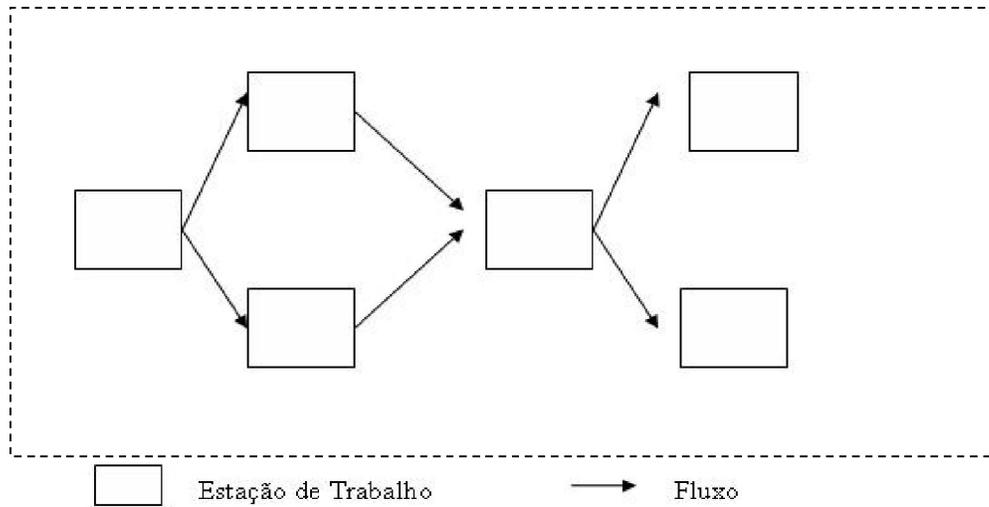


Figura 2: Estrutura básica de um modelo de simulação
Fonte: Prado, 2004

Além de identificar as entidades, as estações de trabalho e as opções de fluxo das entidades, é necessário identificar as variáveis que irão dimensionar o sistema, exemplo, tempo de permanência das entidades na fila. É a partir da análise final dos valores assumidos por estas variáveis durante a simulação que serão tiradas conclusões sobre o sistema.

2.5. Aplicações da Simulação na Mineração

Segundo Ramos Neto (2003) a mineração pode ser incluída como sendo um desses sistemas passíveis de serem simulados, por possuir operações complexas, variáveis aleatórias e por ser necessária a avaliação de estratégias para estas operações.

Sturgul (1999) apud Carvalho (2003) levantou em uma seqüência cronológica, as aplicações mais relevantes de simulação na mineração.

- Em 1961, Rist descreveu um modelo para determinar o número ótimo de trens no transporte de uma mina subterrânea, usando técnicas de Monte Carlo.

- Em 1964, o modelo de Rist foi ampliado por Harvey.
- Em 1965, Sanford desenvolveu uma dissertação de mestrado sobre simulação de correias transportadoras.
- Em 1965, Calder e Waring apresentaram uma discussão sobre um pacote computacional de simulação desenvolvido para a mina de Carol no Canadá.
- Em 1967, O'Neil e Manula usaram um modelo de simulação para manuseio de material em uma mina a céu aberto.
- Em 1967, Manula e Venkataraman simularam um sistema de carga e transporte em uma mina a céu aberto.
- Em 1968, Bucklen, Suboleski et al voltaram a discutir a questão da simulação de transporte por trens em minas subterrâneas.
- Em 1969, Cross e Williamson, assumindo que todos os tempos eram determinísticos, construíram um modelo computacional para estudar alocação fixa versus alocação dinâmica de caminhões, em uma mina de cobre nos Estados Unidos.
- Em 1969, Suboleski e Lucas criaram um programa denominado Simulator 1 que simulava operações em minas subterrâneas que operavam no método de câmaras e pilares.
- Em 1973, Bauer e Calder mostraram as vantagens do uso de GPSS para simular operações em minas a céu aberto.
- Em 1976, Bobilier, Kahan et al usaram GPSS para simular transporte por trens em minas subterrâneas.

- Em 1982, Steiker também usou GPSS para simular sistema de transporte em mina subterrânea.
- Em 1987, Sturgul e Yi basearam-se no estudo de Cross e Williamson e construíram um modelo em GPSS, assumindo um processo estocástico ao invés de determinístico para o cálculo dos tempos. Sturgul mostrou como GPSS pode ser usado na simulação de problemas de mineração.
- Em 1989, Sturgul e Harrison usaram GPSS para simular uma operação de lavra com o objetivo de selecionar métodos de lavra e equipamentos.
- Além dos trabalhos citados acima, Basu e Baafi (1999), Knights e Bonates (1999), Konyukh, Galiyev e Li (1999), Panagiotou (1999), Sturgul e Li (1997) e Vagenas (1999) relacionaram uma série de trabalhos de simulação em mineração, que são mostrados a seguir.
- Em 1964, Elbrond desenvolveu um modelo de simulação de um sistema de transporte por trens para a mina subterrânea de ferro da LKAB, em Kiruna, Suécia.
- Em 1970, Wilke relatou o desenvolvimento de um modelo de simulação para estudar um sistema de transporte por trens em uma mina subterrânea de carvão na Alemanha.
- Em 1975, Redling usou um pacote conhecido como SIGUT para a modelagem de sistemas de correias transportadoras e carregamento e transporte, tratando dados de natureza estocástica, em minas subterrâneas de carvão, na Alemanha.
- Em 1976, Wilke et al descreveram trabalho de simulação realizado para determinar se o critério de despacho melhoraria a eficiência de um sistema subterrâneo de carregamento e transporte por trens.

- Em 1982, Wilke descreveu o desenvolvimento de um programa de computador para simular a Mina Bong, na Libéria. O objetivo principal do simulador era minimizar custos com carregamento e transporte.
- Em 1984, Nogueira descreveu a aplicação de um modelo de simulação para melhorar a operação de escavadeiras e caminhões na mina a céu aberto de ferro Cauê, da CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), em Itabira/MG.
- Em 1984, White e Jones divulgaram 7 programas desenvolvidos nos Estados Unidos para simular operações de lavra, em minas de carvão a céu aberto, com aplicação de escavadeira de arrasto.
- Em 1990, Braga et al descreveram a aplicação de um modelo de simulação para determinação dos limites da cava final e seqüência de remoção de blocos da mina de fosfato da Arafertil, em Araxá/MG.
- Em 1990, Tavares e Rúbio descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação usado para prever o desempenho de recuperação de carvão e determinar o teor de cinzas da alimentação, em uma planta de beneficiamento da Companhia Riograndense de Mineração.
- Em 1991, Baunach, Grimson e Wagstaff, usando SIMAN e CINEMA, identificaram gargalos de produção em um sistema de manuseio de material, envolvendo seis minas de carvão.
- Em 1992, Vagenas et al descreveram o desenvolvimento do METAFORA, um simulador para controle de despacho de sistemas de carregamento e transporte com escavadeiras e caminhões para minas a céu aberto. O programa foi escrito em Turbo Pascal e usava CAD para a visualização do movimento dos caminhões.

- Em 1992, Tsiflakos et al apresentaram um método interativo para modelagem de sistemas de mineração por simulação que usava modelagem orientada a objeto e visualização gráfica.
- Em 1992, Lanna et al desenvolveram um modelo de simulação para dimensionamento da frota de caminhões da mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.
- Em 1992, Pereira descreveu um modelo de simulação para estudar o efeito de alocação dinâmica na produtividade, comparado ao do modelo convencional de despacho, na mina de ferro Conceição da CVRD, em Itabira/MG.
- Em 1992, Faria desenvolveu um modelo de simulação para avaliar a operação de transporte por caminhões e determinar o custo adicional envolvido nas operações de blendagem, da mina de ferro da Ferteco Mineração, em Minas Gerais.
- Em 1992, Hoare e Willis, usando SIMAN e CINEMA, simularam um sistema de caminhões e britadores, variando o número de caminhões, numa mina de chumbo e zinco no oeste da Austrália.
- Em 1993, Mutagwaba et al descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação, escrito em C++, usando técnicas de projeto orientado a objeto, para servir como ferramenta para tomada de decisão em sistemas de transporte de mina.
- Em 1993, Espinoza relatou os resultados obtidos no desenvolvimento de aproximadamente vinte projetos de simulação para a mina de cobre El Teniente da Codelco, no Chile.
- Em 1994, Mevorach desenvolveu um simulador para operações de “stackers” e correias transportadoras em uma mina de linhito, na Grécia.

- Em 1994, Bustamante, Giacamen e Barra desenvolveram um modelo de simulação em GPSS/H e Proof Animation para a usina de fundição de cobre de El Teniente, da Codelco, no Chile. Este modelo foi uma interessante contribuição, pois usou simulação discreta para um sistema com variáveis inerentemente contínuas.
- Em 1994, Kolonja e Mutmansky usaram modelos de simulação e animação para avaliar a eficiência de vários procedimentos de despacho de caminhões em uma mina a céu aberto.
- Em 1994, Hunt usou SLAMSYSTEM para simular um sistema de transporte numa mina subterrânea do Colorado.
- Em 1995, Sturgul et al aplicaram GPSS/H e PROOF Animation em Cabillo e Rawhide (minas de carvão a céu aberto), Wyoming, para responder questões do tipo “o que aconteceria, se”, visando aumento de produção.
- Em 1995, Jacobsen et al usaram modelos de simulação e animação para determinar o número ótimo de caminhões, escavadeiras e barcas no estágio de projeto da mina e para determinar quando um novo caminhão deveria ser adicionado à frota durante a operação da mina de Lihir (mina de ouro a céu aberto), em Papua Nova Guiné.
- Em 1995, Sturgul fez uma abordagem superficial sobre aplicações de simulação e animação na mineração. Neste trabalho, ele cita a existência de alguns sistemas de simulação e animação tais como SIMAN, CINEMA e ARENA, GPSS/H e PROOF Animation, SLAMSYSTEM, MODSIM III / SIMFACTORY / SIMPROCESS e WITNESS. Cita também aplicações destes sistemas na simulação de alguns modelos específicos para mineração.
- Em 1996, Sturgul e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para prever a produção para uma variedade de combinações de carregadeiras e

caminhões com um sistema de despacho em Hibbing (mina de ferro a céu aberto), Minnesota.

- Em 1996, Sturgul, Jacobsen e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para analisar tráfego em duas mãos, num plano inclinado, em The Greens Creek Mine, Alaska.
- Em 1996, Baafi e Ataepour, usando ARENA, construíram modelos de simulação e animação para comparar a produtividade de um sistema caminhão e escavadeira com e sem despacho.
- Em 1996, Runciman, Vagenas e Newson, usando WITNESS, simularam diversas operações em uma mina subterrânea, superando as expectativas.
- Em 1997, Galiyev usou simulação de mina para analisar alternativas de combinações de tecnologias e equipamentos, estudar os melhores trajetos para transporte, locais de escavadeiras, previsão de produção e pesquisar a confiabilidade do equipamento, no Kazaquistão.
- Em 1997, Panagiotou et al apresentaram um conjunto de programas chamado STRAPAC 2 que foi desenvolvido para assistir aos engenheiros no planejamento e análise de operações de escavadeiras e caminhões em minas a céu aberto. O simulador foi escrito em MS – Visual C++, enquanto o modelo de simulação de máquina foi escrito em GPSS/H.
- Em 1997, Medved et al descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação escrito em GPSS/H para estudar o sistema de transporte de caminhões, na mina de urânio Zirovski Vrh., na Eslovênia. O modelo foi usado para analisar distintos cenários de padrões de tráfego, utilização dos caminhões e custo operacional.

- Em 1997, Erdem et al apresentaram uma série de modelos de simulação por computador que foram desenvolvidos como parte de um sistema inteligente para otimizar a operação de escavadeiras de arrasto em minas de carvão a céu aberto.
- Em 1997, Bazante desenvolveu um modelo para avaliar a eficácia do sistema de escavadeiras e caminhões na mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.
- Em 1997, Vargas descreveu um modelo de simulação discreta para analisar a viabilidade de instalação de uma pilha de homogeneização no projeto de mineração de níquel de Minorco's Lomas, na Venezuela.
- Pavlovic (1997) e Lazic et al (1998) simularam operações contínuas em uma mina de linhito, na Iugoslávia, utilizando programas em FORTRAN.
- Em 1998, Agioutantis et al descreveram o desenvolvimento de um simulador para estudar o desempenho de equipamentos, na mina a céu aberto de linhito de Northern Field, na Grécia. Um pacote de simulação visual chamado Micro Saint também foi usado.
- Em 1998, uma equipe de simulação da Fluor Daniel, coordenada por Rod Hoare, simulou operações na interface mina / planta de beneficiamento e ferrovia / porto e também realizou estudos de expansão de capacidade de várias instalações e estudos de aumento de áreas de armazenagem.
- Em 1998, Konyukh usou GPSS/H e Proof Animation para escolher a tecnologia de transporte mais produtiva e compor o sistema sem gargalos, para minas subterrâneas da Rússia.
- Em 1998, Rakishev, em Almaty, Kazaquistão, simulou um sistema escavadeira / ferrovia, onde fatores tais como confiabilidade de equipamento e duração de processos foram introduzidos aleatoriamente.

- Em 1998, Li desenvolveu, na China, um ambiente de simulação visual sem programação, para sistemas de mineração.
- Em 1998, Sturgul e Knights desenvolveram um modelo de simulação, usando a linguagem GPSS/H para verificar estimativas de produção para o primeiro ano de operação da mina de cobre El Abra, no Chile.
- Em 1998, Knights e Muñoz usaram a linguagem de simulação SLAM – II para modelar o tempo perdido em filas em um sistema de carregamento e transporte semi-automatizado de uma mina subterrânea.
- Em 1998, Quesada et al usaram as linguagens de simulação e animação SIMAN e ARENA para modelar a produtividade de LHD's em operações de uma mina subterrânea.
- Dubiel e Laing (1998), Vagenas et al (1998) e Yazici e Baiden (1999) registraram desenvolvimento e aplicações de simulação a eventos discretos em companhias de mineração pelo Inco Limited e Noranda e Falconbridge Limited.
- Em 1999, Runciman et al relataram aplicações das ferramentas de simulação Witness pelo Lanner Group e Auto Mod pelo Autosimulations Inc., nos Estados Unidos.

Segundo Carvalho (2003) é pertinente mencionar mais dois casos de aplicação de simulação em minerações da região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

- Em 1995, Pinto cita, resumidamente, o uso do SIMUL na construção de um modelo para simulação de perfuração numa mina pertencente às Minerações Brasileiras Reunidas (MBR).
- Em 1997, Carvalho e Duarte, usando um simulador da Nordberg, estudaram várias alternativas para operar totalmente a seco a planta de peneiramento e

britagem da Samarco Mineração S.A. Até tempo atrás a planta estava funcionando da maneira prevista, confirmando os resultados da simulação.

Como se pode notar, pelas citações acima, a evolução da modelagem e simulação para mineração foi muito rápida, porém, segundo Pinto (1999), o número de aplicações ainda é muito pequeno devido a duas limitações básicas:

- a) inflexibilidade dos modelos tipo “pacotes computacionais fechados”;
- b) falta de adequação das linguagens atualmente existentes.

Ramos Neto (2003) afirma também que a grande dificuldade para a difusão do uso da simulação na mineração se deve, principalmente, ao fato de não haver um simulador específico para mineração no mercado. Alia-se a isto a falta de informação, por parte dos profissionais da área, sobre a ampla faixa de aplicações dessa ferramenta na mineração. Apesar de Pinto (1999) ter desenvolvido o sistema denominado SIMIN, que é um simulador para mineração, este ainda não possui uma versão comercial e requer conhecimentos do software Delphi (Delphi é marca da Borland Software Corporation) para ser operado. Com isto, torna-se válida a procura por simuladores específicos para área mineral, visando a facilitar o uso e, conseqüentemente, aumentar a aplicação da simulação nas operações de lavra de minas.

Ramos Neto (2003) desenvolveu um trabalho onde apresenta um conjunto de módulos de simulação, denominado template, específico para simular operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto no programa Arena. Esse template foi desenvolvido por Ramos Neto (2003) e é inédito. Ele visa a facilitar o uso da simulação na mineração e poderá ser usado por profissionais da área mineral, mesmo que estes não possuam conhecimentos avançados de simulação ou mesmo do próprio programa Arena.

Os modelos desenvolvidos para simular as operações em minerações podem ser usados como ferramenta para avaliação de cenários. Segundo Ramos Neto (2003) através da simulação pode-se, por exemplo:

- Permitir ao engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta e/ou 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.

2.6. Apresentando o ambiente Arena

Antes de se referir ao modelo desenvolvido utilizando o *Software* Arena, julgou-se importante apresentar de uma maneira resumida o ambiente de trabalho do Arena e alguns dos seus recursos que foram mais utilizados no desenvolvimento do modelo deste trabalho, visando uma maior familiarização com o *software*. Ressalta-se que todo conteúdo dessa seção teve como fonte bibliográfica a apostila “Introdução ao Software Arena” desenvolvida pela Paragon, empresa fornecedora do *software* no Brasil.

O Arena segue os padrões do MS Office®, com comandos e botões semelhantes e menus que agregam funções semelhantes às encontradas em outros softwares Windows®. Um usuário do MS Word®, por exemplo, ao abrir o ARENA® saberá de pronto como salvar ou abrir um arquivo de modelo, pois os botões para isso são iguais, e os comandos "Abrir" e "Salvar" encontram-se também no menu "Arquivo".

A seguir é apresentado o modelo da área de trabalho do Arena:

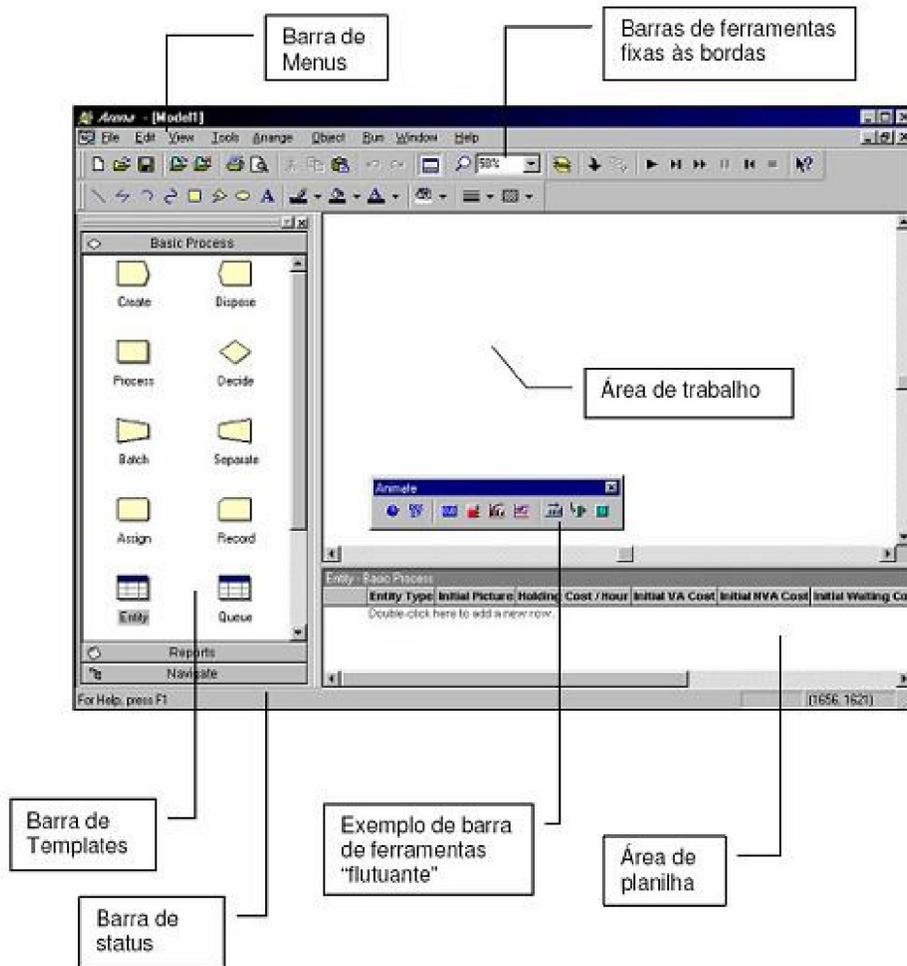


Figura 3: Ambiente de trabalho do software Arena
Fonte: Introdução ao Software Arena (Paragon)

Na figura 03 pode-se observar as principais barras que compõem o Arena. Em resumo pode-se dizer que a área de trabalho é utilizada para montagem do fluxograma a partir dos módulos existentes na barra de templates.

Cada programador do Software tem suas habilidades de desenvolvimento de modelos de simulação, logo dificilmente o modelo desenvolvido por um programador ficará idêntico ao de um segundo.

A construção do modelo dentro do ARENA é feita através dos elementos disponibilizados nos templates. Estes elementos são denominados “módulos”, e são de dois tipos distintos:

- Módulos de Fluxograma: são usados para construir o fluxograma dentro da área de trabalho. Cada módulo pode ser repetidamente colocado quantas vezes se fizerem necessárias para a construção do modelo. Possuem pontos de entrada e

saída, usados para estabelecer interconexões e criar o fluxo do processo. Um duplo clique neste módulo abre uma janela que permite configurar as ações referentes a ele. Também é possível editar estes dados na janela de planilha, que fica logo abaixo da área de trabalho. A planilha apresentada irá mudar conforme forem selecionados diferentes módulos. Na figura 04 por exemplo, é apresentado o módulo de fluxograma Process.

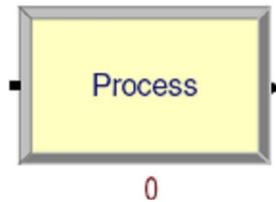


Figura 4: Módulo Process do Software Arena
Fonte: Introdução ao Software Arena (Paragon)

- Módulos de Dados: apesar de aparecerem na janela do template, não são colocados na área de trabalho. Ao serem selecionados, apresentam sua lista de dados na área de planilha, onde podem ser editadas, excluídas ou inseridas novas informações. Na figura 05 é apresentado o módulo de dados Entity.



Figura 5: Módulo Entity do Software Arena
Fonte: Introdução ao Software Arena (Paragon)

Ao construir um fluxograma, é usado o ponto de vista da parte dinâmica do sistema, ou seja, aquilo que se movimenta ou “passa” dentro do sistema. Por exemplo, em um processo de uma linha de produção, este elemento é uma peça, se for um hospital, são os pacientes, se for uma agência bancária, são os clientes. Esta parte que percorre o fluxo é chamada de “entidade”, e o fluxograma representa a estrutura estática ou fixa do sistema, assim como os processos de decisão e desvio correspondentes.

A seguir são apresentados alguns dos módulos utilizados no desenvolvimento do modelo em questão:

- Create: Este módulo de fluxograma (Figura 06) serve para introduzir as entidades no modelo segundo intervalos de tempo definidos. Ao se clicar duas vezes sobre ele, é apresentada a seguinte janela de opções (Figura 07):

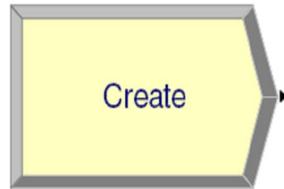


Figura 6: Módulo Entity do Sotware Arena
Fonte: Introdução ao Software Arena (Paragon)

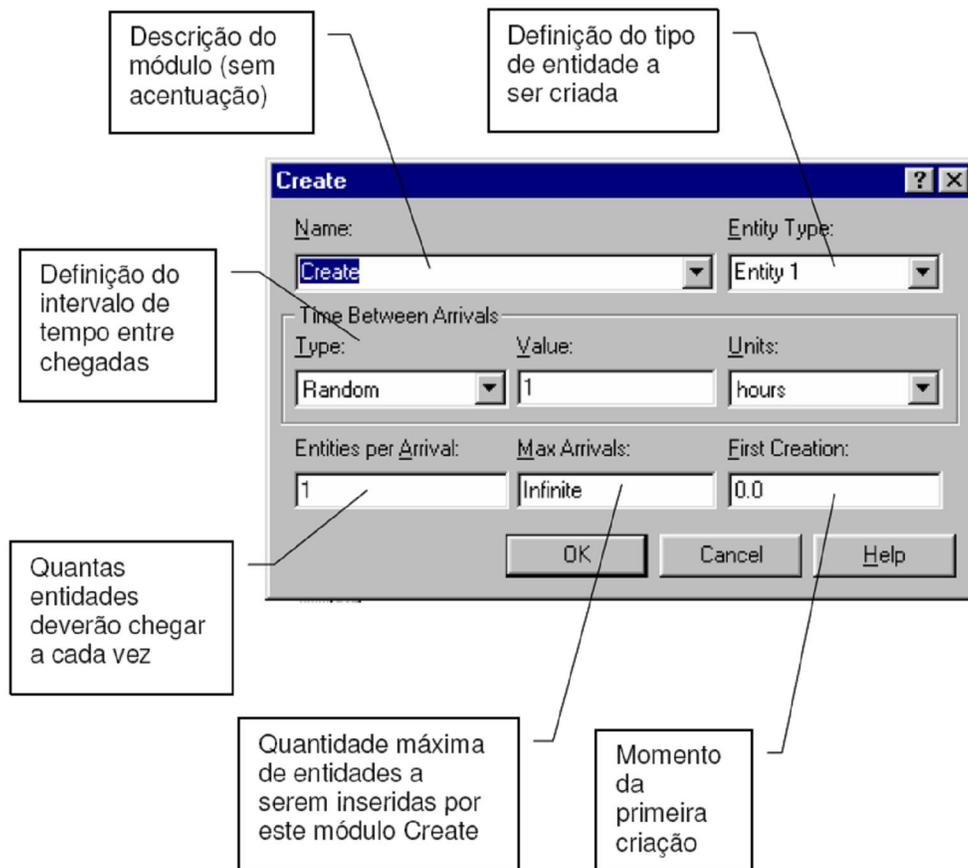


Figura 7: Tela de edição do módulo create do software Arena
Fonte: Introdução ao Software Arena (Paragon)

- Process: O módulo de fluxograma Process tem a função de representar qualquer ação dentro do sistema que leve um tempo para ser cumprida. Também é capaz

de representar a ocupação de uma máquina ou operador (recurso). A janela de opções do módulo Process está apresentada a seguir na figura 08:

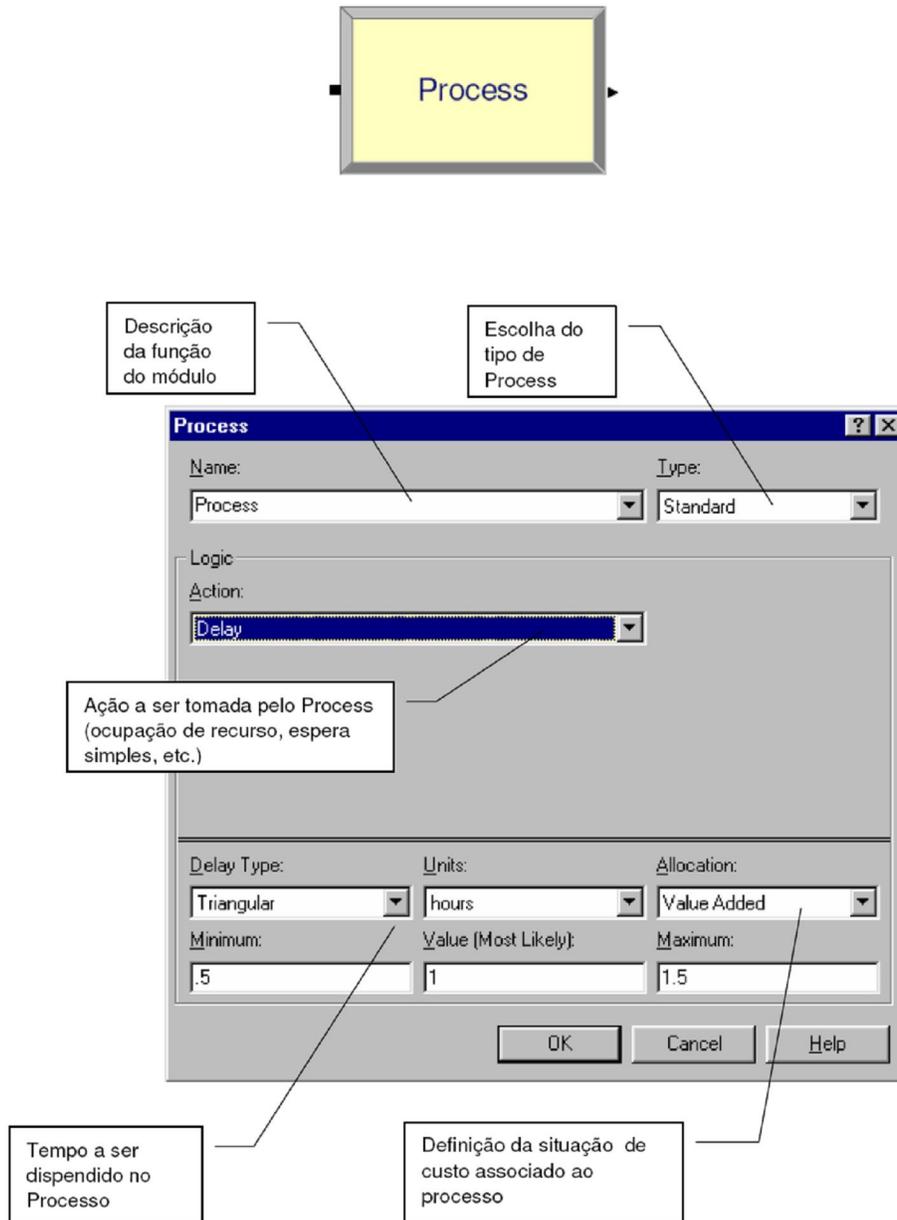


Figura 8: Tela de edição do módulo process do software Arena
Fonte: Introdução ao software Arena (Paragon)

- Assign: O módulo ASSIGN serve para alterar ou associar valores às variáveis, atributos de entidades, alterar a figura das entidades e outros parâmetros ou variáveis do sistema. Sua janela de diálogo está mostrada na figura 09:

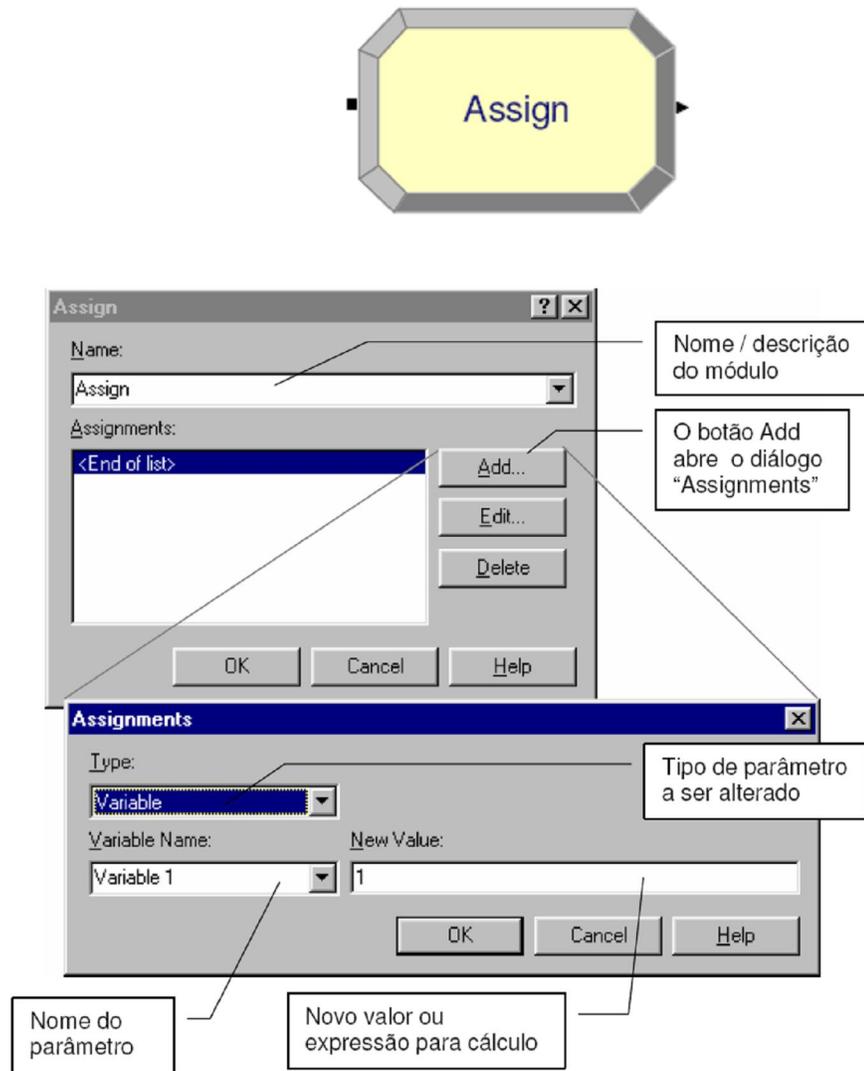


Figura 9: Tela de edição do módulo assign do software Arena
Fonte: Introdução ao software Arena (Paragon)

No modelo desenvolvido foi utilizado muito a construção de estações de trabalho, pois fica mais fácil contemplar a variável deslocamento de uma estação a outra. Segundo Prado (2004), a estação de trabalho é o conjunto dos módulos Station + Process + Leave. O módulo Station é utilizado para mostrar que a entidade ocupou uma estação e o módulo Leave é utilizado para informar que a entidade desocupou uma estação e mostrar também como ela será transportada à estação seguinte.

Capítulo 03 - Descrição do Sistema Abordado

3.1. Introdução

A Jacobina Mineração e Comércio (JMC) é uma empresa do grupo Yamana Gold, situada na cidade de Jacobina, estado da Bahia. A Yamana Gold é uma mineradora canadense, que tem como produto o ouro e concentrado de cobre. A mineradora possui minas em operação no Brasil, Argentina, Chile e futuramente México.

A unidade da Yamana Gold em Jacobina tem como produto final o Ouro. O processo produtivo da empresa está dividido em duas fases: A extração do minério e o beneficiamento deste na planta metalúrgica.

O minério extraído que abastece a planta metalúrgica da JMC contém uma média de 2g de Ouro para cada tonelada extraída. São consumidas na planta, atualmente, cerca de 6.500 toneladas de minério por dia, o que classifica a JMC como uma das maiores Minas Subterrâneas do Brasil em movimentação de massa.

O minério que chega à planta metalúrgica é extraído pelo método de lavra subterrânea *sublevel open stoping* (desmonte por subníveis). A empresa possui quatro minas para retirada do minério de ouro:

- Mina João Belo;
- Mina Morro do Vento;
- Mina Canavieiras;
- Mina Basal.

A parcela média de produção de cada mina no ano de 2008 está apresentada na figura 10.

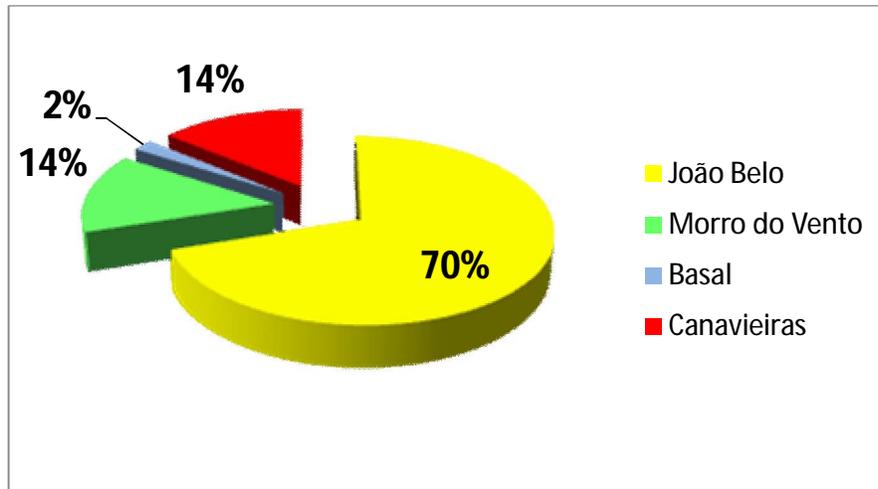


Figura 10: Composição da extração de minério por mina da JMC
Fonte: Dados da empresa, Agosto 2008.

Na figura 11 é apresentado o mapa geológico de localização das quatro Minas da empresa e a localização da planta. Em resumo, o minério é extraído das quatro minas, transportado à planta e beneficiado, visando à extração do ouro.

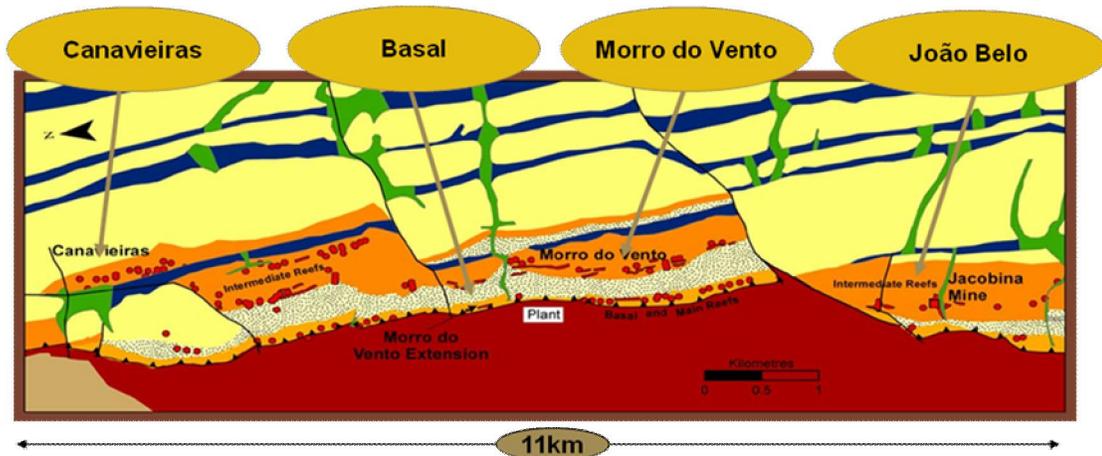


Figura 11: Mapa Geológico de localização da JMC
Fonte: Dados da empresa, Agosto 2008

3.2. Aspectos Geológicos

Conforme dados apresentados pela equipe de geologia da JMC, as jazidas exploradas pela Jacobina Mineração e Comércio Ltda, estão inseridas numa seqüência de meta-sedimentos conglomeráticos, quartzitos e pelitos de idade proterozóica, depositada sobre uma superfície singular do embasamento arqueano.

As mineralizações mais importantes estão associadas a níveis conglomeráticos tabulares de seixos médios e grandes, semi-arredondados e selecionados, da formação Serra do Córrego, e foram depositadas em um sistema de drenagem fluvial, anastomosada, com rumo leste-oeste. O ouro encontra-se finamente disseminado nas matrizes deste conglomerado.

Evidências sedimentológicas sustentam a teoria de uma origem singenética para as mineralizações, embora redistribuições locais tenham ocorrido. Sob o ponto de vista estrutural, o Grupo Jacobina é descrito como um monoclinal mergulhando forte para leste. Está subdividido em blocos separados por falhas, originados principalmente por esforços de compressão provenientes de sudoeste. Rochas básicas geralmente ocupam os planos de falhas.

O Grupo Jacobina, no geral, apresenta três ciclos deposicionais que, da base para o topo, são os constituintes das formações Serra do Córrego, Rio do Ouro e Cruz das Almas.

3.3. Lavra Subterrânea na JMC

Como citado na introdução deste capítulo, o processo produtivo da JMC é composto por quatro minas subterrâneas: Mina João Belo, Mina Morro do Vento, Mina Canavieiras e Mina Basal.

O destino final de todo o minério extraído destas minas é o beneficiamento na planta metalúrgica da empresa. A recuperação de ouro na planta metalúrgica é de aproximadamente 94 %.

Antes de ser transportado à planta de beneficiamento, o minério extraído das minas pode ou não passar por uma estocagem estratégica. Para a Mina de João Belo a grande maioria do minério extraído passa por este processo, no Pátio da Jaqueira.

O minério de ouro extraído das minas apresenta as seguintes características, segundo dados da empresa:

- Caracterização mineralógica: meta-conglomerados de quartzo, com matriz quartzosa, estando o ouro finamente disseminado na matriz;
- Composição química média: Quartzo (SiO₂) - 91,0%, Ouro (Au) - 2,0 a 4,5 g Au/t, Pirita (FeS₂), Fucsita, Clorita, Calcopirita (CuFeO₄), Esfarelita (ZnS), Galena (PbS), e inúmeras outras substâncias em teores bastante reduzidos e variáveis;

- Granulometria do minério: 36” para run of mine e 5” para o britado;
- Umidade: 2%;
- Peso específico aparente do minério: 1,67 t/m³.

As estruturas de apoio às operações nas minas constam de:

- Rede elétrica e transformadores de energia;
- Oficina mecânica para máquinas pesadas, caminhões e veículos;
- Lavador de veículos;
- Rampa de lubrificação;
- Posto de combustível óleo diesel para uso exclusivo da empresa;
- Casa de afiação de bits;
- Compressores;
- Escritório.

Os equipamentos para as operações de produção da mina são os seguintes:

- Jumbo eletrohidráulico;
- Fan Drill eletrohidráulico;
- Carregadeira tipo LHD;
- Caminhões articulados Caterpillar de 40 tons de capacidade para subsolo;
- Caminhões Scania de 40 toneladas para superfície;
- Sistema para carregamento de explosivos tipo Anfoloader;
- Sistema para carregamento de explosivo tipo emulsão bombeada;
- Veículo com plataforma elevatória para instalações e equipagem;
- Caminhão plataforma dotado de guincho Munck para transporte de materiais para instalações e equipagem;
- Caminhão Comboio dotado de tanque de combustível e óleos para manutenção preventiva dos equipamentos da mina;
- Veículos para apoio de manutenção;
- Veículos para supervisão;
- Compressor de ar;
- Transformador de tensão;
- Ventilador Principal;
- Ventiladores auxiliares;

- Sistema de bombeamento.

Utilizando-se de toda essa estrutura, o processo para retirada do minério é dividido em três etapas:

1. Desenvolvimento exploratório: O desenvolvimento exploratório é a fase da produção onde são abertas as galerias para acesso ao corpo de minério. Nesta fase o único produto é o estéril. A medição da produção desta fase é feita em metros (m) e pela tonelagem de estéril extraída, isso porque o que interessa é o avanço das galerias da mina para chegada ao corpo de minério.
2. Desenvolvimento produtivo: O desenvolvimento produtivo acontece dentro do corpo de minério, visando formar os blocos para desmonte nas atividades de Lavra. Logo, neste tipo de desenvolvimento o produto é o minério. A medição é feita em metros e pela tonelagem de minério extraída.
3. Lavra: O método de lavra utilizado na JMC é o *sublevel open stoping* (desmonte por subníveis). Para realização da lavra, antes acontece o desenvolvimento produtivo dentro do corpo de minério, onde ocorre a abertura de galerias de subníveis. A partir daí o bloco localizado entre estas galerias é desmontado. Na figura 12, N-555, N-535 e N-500 são as galerias de desenvolvimento, as linhas em azul no Bloco 1.340/500 são as linhas de perfuração vertical para desmonte do bloco e retirada do material.

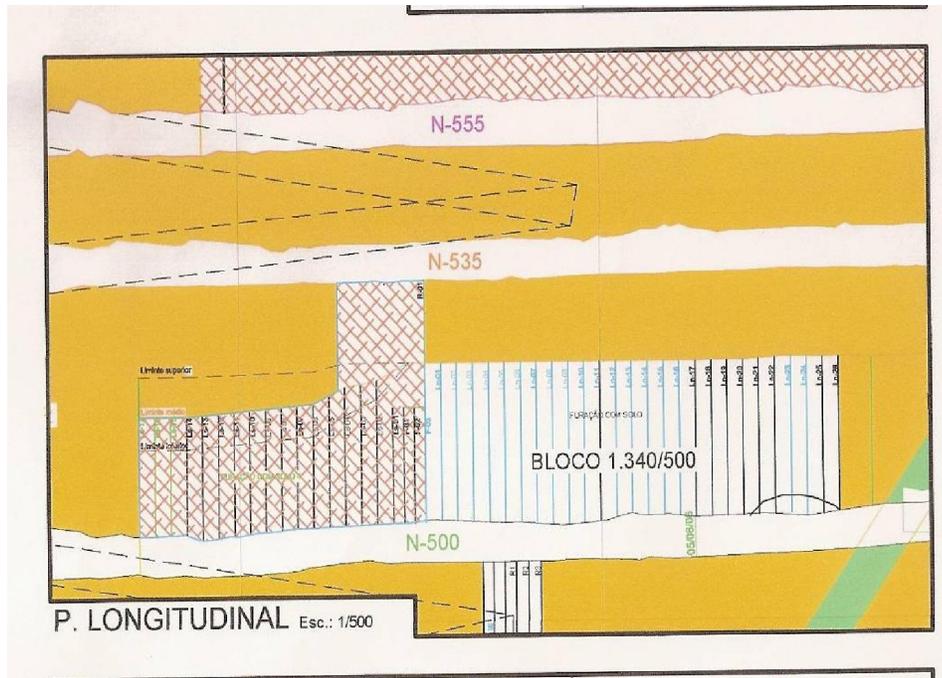


Figura 12: Método de Lavra Sublevel Open Stopping
Fonte: Dados da empresa (2008)

Tanto para as atividades de desenvolvimento como para as atividades de lavra, a seqüência de tarefas para retirada do minério ou estéril são bem parecidas:

1. Perfuração. A perfuração é a parte do processo onde a rocha é perfurada para inserção do explosivo. A perfuração é feita utilizando um equipamento chamado jumbo, quando a perfuração é horizontal, e um equipamento chamado Fandril, quando a perfuração é vertical. A figura 13 mostra um jumbo e um Fandril. A perfuração horizontal é feita no desenvolvimento da mina, sendo este exploratório ou produtivo. Já a perfuração vertical é feita no processo de lavra. O objetivo da perfuração horizontal é perfurar para continuar o avanço da galeria de desenvolvimento. Já o objetivo da perfuração vertical é perfurar o bloco (*Stope*), entre uma galeria e outra, visando desmontá-lo, veja figura 12. Desta forma, a empresa mantém um saldo de reserva perfurada, ou seja, a perfuração está um passo a frente do desmonte para garantir o cumprimento do Plano de Produção. A figura 14 ilustra um Jumbo em atividade de perfuração horizontal.



Figura 13: Equipamentos de Perfuração (Jumbo e Fandril)
Fonte: Arquivos JMC (2008)



Figura 14: Perfuração Horizontal (Jumbo)
Fonte: Arquivos JMC

- Desmonte: Após a perfuração a frente está liberada para a próxima etapa do processo, o desmonte. O desmonte consiste em inserir explosivos nos furos feitos na perfuração, detonar, para que ocorra a liberação de minério, quando o processo é desenvolvimento produtivo ou lavra, e estéril, quando o processo é o desenvolvimento exploratório. O objetivo da atividade de desmonte é fragmentar a rocha, para que esta seja transportada, para a usina de beneficiamento, quando o produto é minério, ou para um local de depósito, quando o produto é o estéril. A atividade de desmonte consiste em duas etapas, a primeira é a fase de carregamento da frente, ou seja, fase onde o explosivo é inserido nos furos e preparados para a detonação. Atualmente, a empresa utiliza dois tipos de explosivos, o granulado, carregado pelas equipes de blasters e a emulsão, bombeada por um equipamento próprio. A segunda fase é a detonação, nesta fase, toda a mina é evacuada. Ocorrem ao todo 03 (três) intervalos de

detonações ao longo do dia, sendo que, após a detonação a mina fica paralisada por mais algum tempo para que as condições do ambiente se estabilizem para a entrada de pessoas no local. Como a empresa trabalha em 03 turnos de trabalho, o intervalo entre estes turnos são utilizados para as detonações de frentes. Os horários dos turnos são das 23:15 às 06:00, das 07:15 às 14:00 e das 15:15 às 22:00 horas. Logo, no intervalo de 1 (uma hora) e quinze minutos existentes entre os turnos, são feitas as detonações. Atualmente a empresa está inserindo uma nova política de turnos de trabalho, onde os novos horários serão: 00:00 h às 08:00 h, 08:00 h às 16 h e das 16:00 h às 00:00 h. A substituição dos horários de turno será um dos cenários futuros analisados neste trabalho.

2. Suporte à mina: Sempre após uma detonação, a frente de desenvolvimento precisa ser preparada para que ocorra a retirada do minério ou estéril produzido no local. A preparação consiste em abatimento de rochas soltas, “chocos”, que permanecem no local. A preparação da frente de desenvolvimento é feita em horário normal de trabalho dos turnos. A preparação pode ser manual ou utilizando um equipamento denominado Scaler. A figura 15 ilustra um equipamento Scaler para abatimento de “chocos” nas minas da JMC. O Scaler utiliza uma garra para retirar as rochas que permaneceram presas, porém sem segurança, após a detonação.



Figura 15: Equipamento Scaler para abatimento de choccos
Fonte: Arquivos JMC (2008)

3. Carregamento: Após a preparação da frente, a próxima etapa será o carregamento dos caminhões para que o material formado nas detonações, estéril ou minério, seja retirado da mina e transportado para o respectivo destino. A empresa possui 02 tipos de carregadeiras, as LHD's e as Toros. Sempre quando

o carregamento é feito em frentes de lavra, utiliza-se carregadeiras com controle remoto, pois é grande o perigo de deslocamento de rocha. As figuras 16 e 17 ilustram as carregadeiras LHD utilizadas.



Figura 16: Carregadeira LHD
Fonte: Arquivos JMC (2008)



Figura 17: LHD para carregamento subterrâneo
Fonte: Arquivos JMC

4. Transporte: O transporte consiste basicamente em transportar o minério ou estéril para o seu respectivo destino. A empresa utiliza 03 tipos de caminhões, os Caterpillars AD45, os Volvo A35D e os Scania SB. Ressalta-se que existe apenas 01 caminhão tipo volvo.

Nas figuras 18 e 19 encontra-se ilustrado um caminhão Caterpillar AD45.



Figura 18: Caminhão tipo Caterpillar AD45
Fonte: Arquivos da empresa

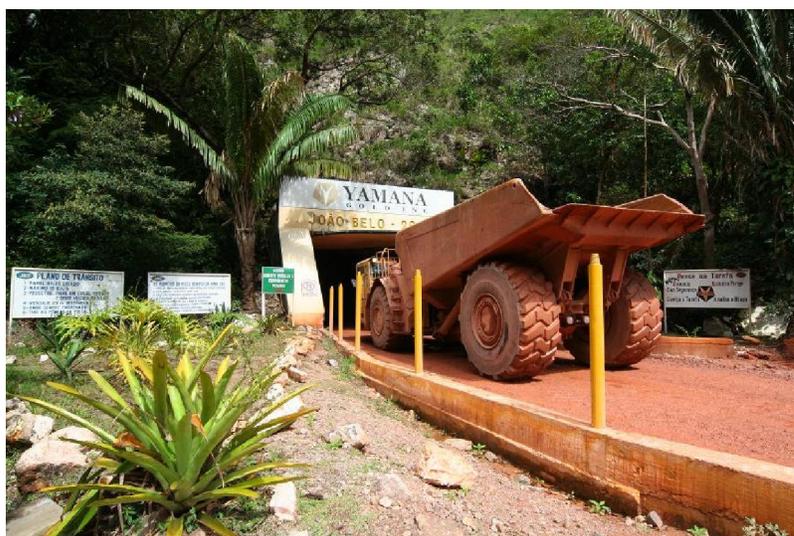


Figura 19: Caminhão Caterpillar AD45 entrando na Mina João Belo
Fonte: Arquivos da empresa

3.4 O sistema simulado – A mina de João Belo

A mina subterrânea de João Belo tem trabalhado a uma capacidade nominal média de 3.500 t/dia de minério para alimentação da planta metalúrgica, perfazendo um total aproximado de 100.000 t/mês em regime de 30 dias/mês e aproximadamente 1,2 milhão de toneladas/ano. A vida útil da mina será de aproximadamente oito anos (2016), salvo novas informações de pesquisa geológica.

A mina João Belo é lavrada utilizando o método de lavra subterrâneo *sublevel open stoping* (desmonte em subníveis). As figuras 20 e 21 mostram como se dá a lavra por este método.

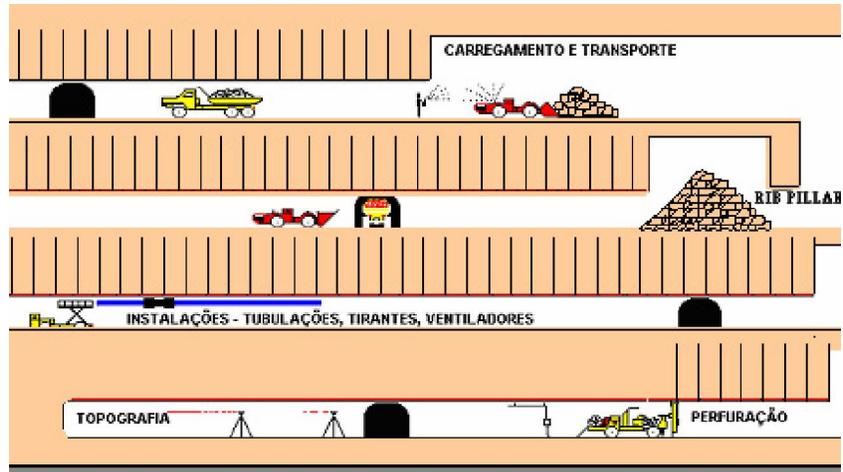


Figura 20: Ilustração Mina Subterrânea
Fonte: Arquivos JMC (2008)

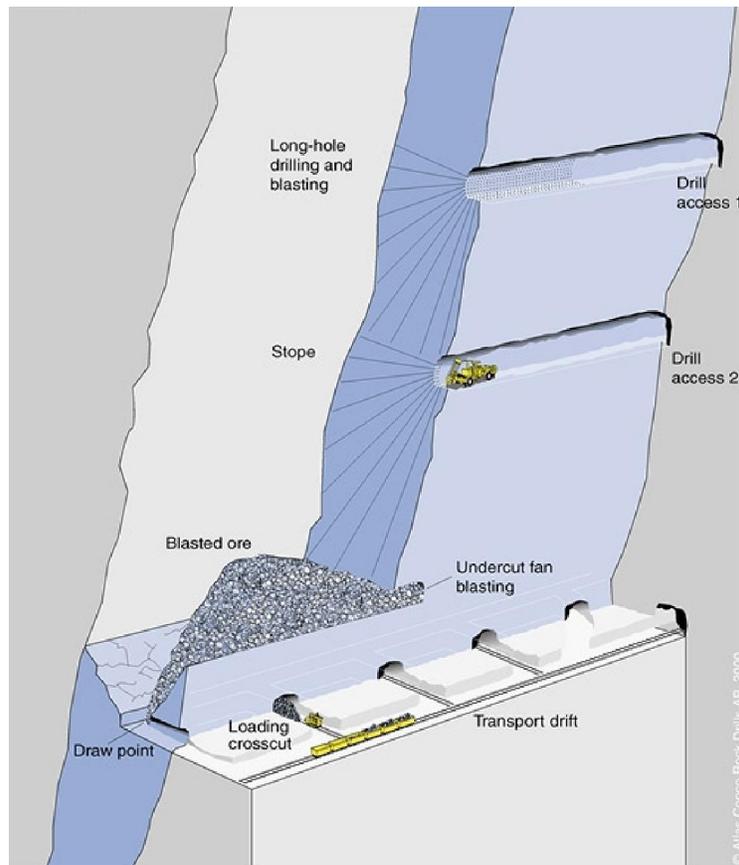


Figura 21: Visão do método de Lavra Subterrânea *Sublevel Open Stopping*
Fonte: Arquivos JMC

O corpo mineralizado com formato tabular, direção Norte-Sul e mergulho variando de 55° a 70° para Leste, é acessado por meio de rampas e travessas de maneira

que galerias possam ser desenvolvidas ao longo de sua direção para norte e para sul a partir da parte central até as extremidades da área economicamente lavrável.

As galerias possuem seções médias de 5m de altura por 5m de largura ao longo do corpo mineralizado em toda sua extensão. Estas galerias são chamadas de sub-níveis de furação.

As galerias são desenvolvidas a uma distância vertical de 20 m a 45 m de acordo com o desenvolvimento já existente, e espessura do corpo para que os furos, realizados para cima e para baixo a partir da galeria (Perfuração Vertical), tenham um comprimento máximo de 30m, determinado pela capacidade do equipamento de perfuração de lavra (Fandrill).

Blocos para lavra são determinados com alturas variáveis entre 60m e 90m de altura e comprimento variável até aproximadamente 140m. Entre os blocos são deixados pilares horizontais com 10 m de altura e pilares verticais de 10 m de comprimento, conforme figura 20.

Na base dos blocos de lavra, paralelamente ao subnível de furação, são desenvolvidas as galerias para transporte e travessas a 60° interligando-as com o sub nível de furação. Na figura 21 é possível observar uma galeria de transporte, onde é encontrada toda a estrutura de suporte ao desenvolvimento da mina (ventilação, tubulação, rede elétrica, etc).

Para o início do desmonte de lavra devem ser desenvolvidas chaminés em uma das extremidades do bloco interligando os sub-níveis entre si, de forma a deixar uma face livre para o início do desmonte.

A partir dos sub-níveis, equipamentos para perfuração de lavra (Fandrill) fazem a perfuração do corpo de minério para a carga de explosivos e desmonte.

O material desmontado cai no sub-nível inferior do bloco e é carregado e transportado através da travessa e da galeria de transporte. Esta extração é executada por meio de carregadeiras do tipo LHD. As carregadeiras LHD transportam o minério até locais para a carga em caminhões que o transportam para a superfície da mina e, posteriormente, para o pátio da britagem na planta metalúrgica.

A lavra é executada no nível aurífero denominado LMPC Reef. O corpo mineralizado apresenta direção N-S e mergulho aproximado de 60° W-E e espessura média acima de 11m. A área economicamente lavrável apresenta comprimento de 700m, da coordenada 8.750.900 até a coordenada 8.751.600, da cota 820m até a cota 475m.

Como acesso principal da mina está sendo utilizada a galeria existente no nível 670 (Altitude), anteriormente utilizada como ferrovia. Esta galeria foi alargada em alguns trechos para permitir a passagem dos equipamentos utilizados na operação da mina. Atualmente, a Mina já foi desenvolvida até o nível 370 (altitude) em processo de desenvolvimento para o nível 335 (altitude).

As galerias são desenvolvidas no contato do corpo com a capa, onde existem indicadores geológicos que facilitam a determinação dos limites mineralizados e a determinação da direção das galerias.

Visando garantir o avanço do desenvolvimento e lavra do minério na Mina de João Belo a empresa possui uma frota de jumbos, fandrills, carregadeiras, caminhões e equipamentos de apoio.

Portanto, os equipamentos da mina se revezam nas frentes, dependendo do estado em que cada frente se encontra. Enquanto uma frente está sendo perfurada, outra já foi detonada, outra está em carregamento. Ressalta-se que a seqüência das atividades em qualquer frente sempre será perfurar, detonar, carregar e transportar. Logo, cria-se um ciclo de atividades, onde sempre se tem minério e estéril disponíveis para carregamento e transporte. Ressalta-se também que a empresa possui uma reserva de blocos já perfurados, visando garantir que as atividades de produção não interrompam por falta de minério.

Para extração do minério da Mina de João Belo a JMC conta com uma estrutura de equipamentos e pessoal. São ao todo:

- Jumbos: 03
- Fandrill: 04
- Carregadeiras: 04
- Caminhões: 07 caminhões tipo Caterpillar AD45 e 04 Caminhões tipo Scania.

A empresa possui um estoque estratégico entre a mina de João belo e a planta, o Pátio da Jaqueira. Neste pátio, é depositado todo o minério que sai da mina, minério este transportado pelos 07 caminhões Caterpillar AD45. A partir daí, os 04 caminhões Scania transportam o minério, do pátio ao britador da planta.



Figura 22: Caminhão Scania transportando minério Jaqueira – Britador
Fonte: Arquivos JMC

Os caminhões Scanias são mais econômicos que os demais, logo são indicados para maiores distâncias, pois consomem menos diesel, pneus mais baratos e transportam a mesma quantidade de minério, 40 toneladas.

Já o estéril pode ter dois destinos, podendo ficar dentro da mina, onde é depositado em locais onde a lavra já aconteceu, ou pode ser destinado à superfície, onde é depositado em pilhas de estéril. A opção mais, vantajosa para a empresa é que o estéril fique dentro da mina, pois assim, terá menor gasto com o transporte.

Dessa forma, no processo da Mina de João Belo, o minério e o estéril são retirados de dentro da mina por 07 caminhões tipo Caterpillar AD45 e depositados em um pátio de estocagem, no caso do minério, e no depósito de estéril no caso contrário. Do pátio de estocagem à planta de beneficiamento, utilizam-se 04 caminhões Scanias. Logo os caminhões trabalham em ciclos.

Os percursos de cada caminhão não são ininterruptos, pois se considera que durante as trocas de turnos (aproximadamente 01:15 minutos para cada troca) os caminhões ficam parados, além disso os caminhões não têm uma disponibilidade 100%, pois estes necessitam fazerem paradas para manutenção.

Nem sempre, devido a paradas para a manutenção, os 13 caminhões que trabalham em João Belo estão disponíveis para a atividade de transporte de minério e estéril. A figura 22 ilustra o pátio da britagem primária da planta metalúrgica.



Figura 23: Pátio de descarga área da Britagem
Fonte: Arquivos JMC

Capítulo 04 - O modelo de simulação

4.1. O sistema e o tempo a ser simulado

Como já citado anteriormente o sistema a ser simulado é o processo de extração de minério e estéril da mina de João Belo e o processo de transporte de minério do Pátio da Jaqueira à planta de beneficiamento.

O tempo considerado na simulação foi o período de 1 (um) mês, que é o menor tempo de programação da produção realizado pelo Planejamento de Mina. O mês utilizado como exemplo foi o mês de Março.

Ressalta-se que do tempo de 01 (um) mês será subtraído o total de horas destinadas à troca de turnos, artifício utilizado em simulações que evita dispêndio de modelagem com tempos considerados improdutivos.

A partir daí pode-se validar o modelo construído comparando o que foi obtido na simulação com o que realmente foi obtido no mês, podendo-se, a partir daí, caso o modelo esteja compatível, testar possíveis cenários e o que poderia acontecer se estes fossem adotados. Os cenários futuros utilizados como exemplo serão a troca do regime de turno (de 06 para 08 horas) e o estudo da capacidade de extração de João Belo com a atual quantidade e disponibilidade de equipamentos.

O maior prazo para o programa de produção das minas da JMC é o *Life of Mine* da mina, a partir daí, todo ano este plano é reprogramado gerando o Plano Anual de Produção. Todas as atividades da mina visam atingir o Plano Anual de Produção, que é apresentado dividido em metas mensais.

Todo mês o departamento de planejamento de Mina faz a reprogramação apresentando as metas do mês de forma detalhada, ou seja, as frentes de desenvolvimento e os blocos de lavra que serão trabalhados. A reprogramação mensal pode ser igual à apresentada no Plano Anual de Produção ou diferente dependendo da situação atual das minas.

As tabelas 2, 3 e 4 ilustram um plano mensal de produção da empresa, considerando as frentes de desenvolvimento, produtivo e exploratório, e os blocos de lavra a serem trabalhados em um mês aleatório.

Tabela 2: Programação Mensal de frentes de desenvolvimento exploratório da mina

João Belo

DESENVOLVIMENTO							
PROGRAMAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO EXPLORATÓRIO							
PRIORID.	CORPO	FRENTE	ESTÉRIL		MINÉRIO		TOTAL
			MET.(m)	TONEL.(t)	MET.(m)	TONEL.(t)	
4	JBN	TRAV N 435 LMPC/ARB sul	0	0	0	0	0
7	JBN	RAMPA 400-370 sul	40	2.710	0	0	40
6	JBN	RAMPA 400-370 norte	40	2.710	0	0	40
5	JBN	X-CUT N 400	40	2.710	0	0	40
12	JBN	Trav. sond. N 400 ARB sul	30	1.430	0	0	30
13	JBN	Trav. sond. N 400 ARB norte	30	1.430	0	0	30
19	JBN	Trav. N 500 JBN 2 (LMPC/ARB)	20	1.237	0	0	20
14	JBN	RAMPA 470 (conexão R 435 JBN-1)	45	3.049	0	0	45
15	JBN	Nicho de sondagem N 665 sul	20	953	0	0	20
23	JBN	N 730 norte(Ventilação)	0	0	0	0	0
3	MVT	R 720/695	40	2.710	0	0	40
2	MVT	909 MU Sul	50	2.383	0	0	50
1	BAS	N 630 N (túnel para CAN)	20	1.354	0	0	20
2	BAS	Ponto carga Túnel	0	0	0	0	0
3	BAS	Rampa 600/570	15	1.016	0	0	15
4	BAS	Cross cut N 570	40	2.710	0	0	40
6	BAS	Rampa 570/550	30	2.033	0	0	30
5	BAS	Trav. Sondagem	0	0	0	0	0
9	CAN	Crosscut - 469	40	2.708	0	0	40
10	CAN	Rampa - N 530 PIR	40	2.708	0	0	40
11	CAN	Rampa - N469/N445	50	3.385	0	0	50
12	CAN	Rampa - acesso - LIB/PIR	70	4.739	0	0	70
13	CAN	Nicho sond. Rampa LIB/PIR	18	713	0	0	18
14	CAN	Ponto de carga - rampa LIB/PIR	14	948	0	0	14
17	CAN	Crosscut - 495	5	339	0	0	5
1	CAN	Túnel - Canavieiras Sul/Basal	25	1.693	0	0	25
15	CAN	Rampa principal Can. Sul	60	4.062	0	0	60
16	CAN	Muckbay 1 - rampa principal	15	1.016	0	0	15
2	CAN	Trav. MU3/MU1 norte	12	573	0	0	12

Fonte: Arquivos JMC (2008)

Tabela 3: Programação Mensal de frentes de desenvolvimento produtivo da mina João

Belo

PROGRAMAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO								
PRIORID.	Corpo	Frente	ESTÉRIL		MINÉRIO		TOTAL	
			MET.(m)	TONEL.(t)	MET.(m)	TONEL.(t)		TEOR (g/t)
3	JBN	Nível 435 ARB S	13	804	32	1.949	1,60	45
	JBN	Trav 435 S (0893)	0	0	0	0	0,00	0
2	JBN	Trav 435 N	0	0	15	928	1,60	15
1	JBN	Nível 435 HWN	13	804	32	1.949	1,60	45
8	JBN	N 400 ARB sul	5	309	25	1.547	1,60	30
9	JBN	N 400 ARB norte	0	0	30	1.856	1,60	30
10	JBN	Trav ARB 400 N	0	0	0	0	1,60	0
11	JBN	Trav ARB 400 S	0	0	0	0	1,60	0
	JBN	Nível 500 HWS JBN-2	0	0	0	0	0,00	0
21	JBN	Trav. N 500 JBN 2 (830)	0	0	9	538	1,60	9
22	JBN	Trav. N 500 JBN 2 (760)	0	0	9	557	1,60	9
16	JBN	Nível 665 HWS	15	928	15	928	1,60	30
20	JBN	N 700 HWS	10	619	10	619	1,60	20
17	JBN	N 765 HWS	6	371	14	866	1,60	20
18	JBN	Trav N 765 sul	4	247	8	495	1,60	12
1	MVT	877 MU Sul	0	0	0	0	0,00	0
7	BAS	N 630 norte	0	0	35	2.165	1,50	35
8	BAS	N 600 norte	0	0	25	1.547	1,50	25
3	CAN	N 495 MU1 norte	0	0	30	1.433	3	30
4	CAN	N 495 MU3 norte	0	0	45	2.150	2,60	45
5	CAN	N 495 MU2 sul	20	956	30	1.433	2,60	50
6	CAN	N 495 MU2 norte	18	860	32	1.505	2,60	50
7	CAN	N 495 LU sul	0	0	10	478	2,60	10
8	CAN	N 495 LU norte	15	717	35	1.672	2,60	50

Fonte: Arquivos JMC (2008)

Tabela 4: Programação Mensal de frentes de lavra da mina João Belo

CORPO	BLOCO	LAVRA					
		TONEL.(t)	TEOR (g/t)	Intervalo dos Leques		Fatores Operacionais	
				LQ.INICIO	LQ.FINAL	DIL(%)	UNDER
JBN	1.530/605	7.229	1,52	Linha 3	Linha 14	10,0%	
JBN	1.130/435-ARB	50.462	2,44	L1n teto 470	0,0	12,0%	
JBN	795/730	17.133	1,58	L12s	L23s	10,0%	
JBN	857/730- LMPC	22.332	1,74	Face Livre	L0n	10,0%	
MVT	4205/845	9.486	1,47	L32	L14 piso	10,0%	
MVT	3870/795	4.113	2,10	Linha 37 Piso	Linha 42 teto	10,0%	
CAN	8135/515-MU 1 nort	1.467	3,54	L105	L106	13,0%	
CAN	Piritoso 8556/550	2.556	2,30	L11	L25	10,0%	

Fonte: Arquivos JMC (2008)

Para o mês apresentado foram programadas 25 frentes de desenvolvimento exploratório, onde será desenvolvida uma média de 32 metros por frente, 10 frentes de desenvolvimento produtivo e 8 blocos de lavra.

A partir deste plano, a Gerência de Operação das Minas terá que programar as atividades dos equipamentos disponíveis para cumprir o plano.

4.2. A estrutura do modelo

A principal característica que se procurou desenvolver no modelo foi a flexibilidade, visando facilitar a adaptação do modelo de simulação aos cenários a serem analisados. Para isso foi desenvolvido uma interface do modelo com um arquivo de entrada de dados desenvolvido no Excel. Desta forma, todas as características do modelo, tais como frentes a serem trabalhadas, principais distâncias, número de equipamentos e disponibilidade destes, são inseridas via Excel.

Neste contexto, usuários que não tenham conhecimento de programação na linguagem do *software* Arena poderão utilizar o modelo para análises, sem dificuldades, fazendo alterações nas características do sistema via arquivo Excel e rodando o modelo normalmente.

A figura 23 ilustra o modelo de entrada de dados via Excel, a figura 24 o menu do modelo desenvolvido no Arena e a figura 25 a tela de animação do modelo.

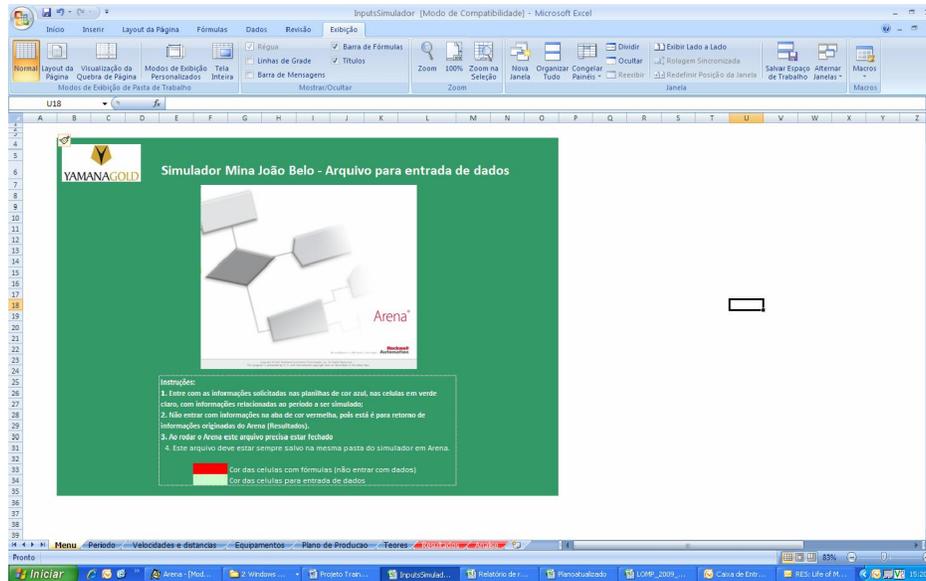


Figura 24: Arquivo de entrada de dados via Excel
Fonte: Desenvolvido pelo autor

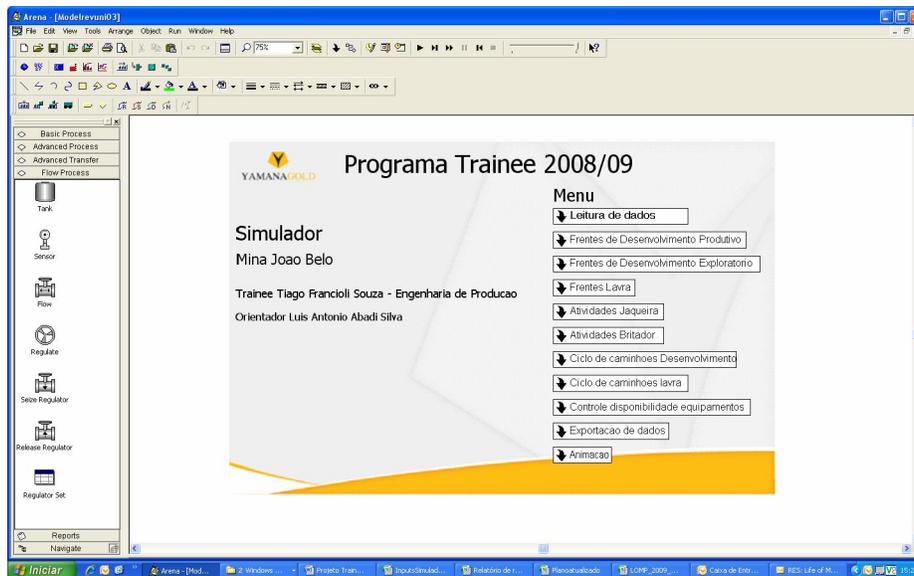


Figura 25: Menu do modelo de simulação via Arena
Fonte: Desenvolvido pelo autor

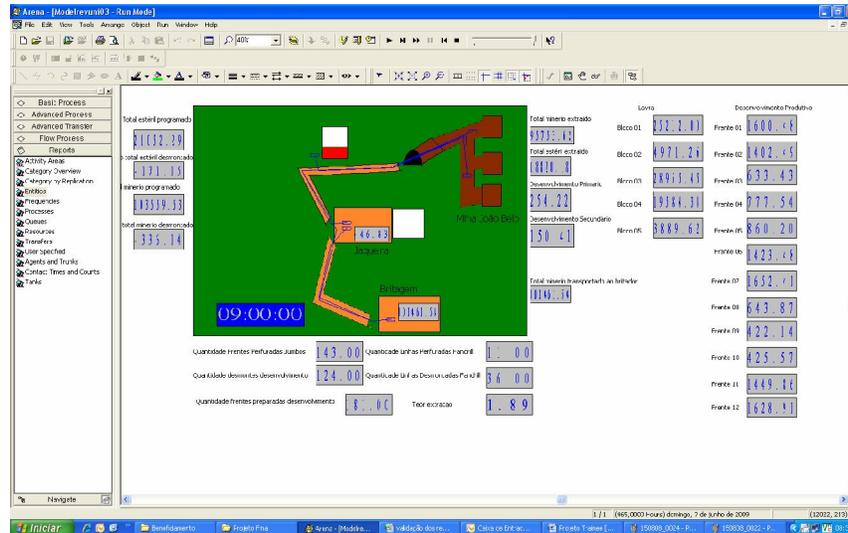


Figura 21: Tela de animação do modelo em Arena
Fonte: Desenvolvido pelo autor

Para construção do sistema de simulação foram definidos os componentes do modelo, apresentados a seguir:

1) Entidades e atributos:

No processo de extração da mina de João Belo, o principal objetivo é alimentar a planta de beneficiamento com o minério extraído. Considera-se também, que no desenvolvimento exploratório, ocorre a movimentação de estéril. Como tanto o minério e o estéril são transportados por caminhões, uma das entidades desse sistema são os caminhões. Logo os caminhões, entidades do modelo de simulação, são atendidos pelas estações de trabalho, carga, descarga ou manutenção. Como se tem mais de um tipo de caminhão, Scania e Caterpillar, logo foram desenvolvidos mais de um tipo de entidade caminhões no modelo. Foram criadas também entidades para cada frente considerada no tempo (mês) a ser simulado, visando representar as atividades perfuração, desmonte, etc. O objetivo principal deste ambiente de simulação das atividades das frentes é informar através de variáveis, as frentes que estarão com minério ou estéril disponíveis para carregamento, visando determinar o fluxo das entidades caminhões no ambiente de simulação. Logo os dois ambientes, atividades nas frentes e ciclo dos caminhões interagem entre si através das variáveis materiais (minério e estéril) disponíveis para transporte. A figura 26 ilustra graficamente o modelo.

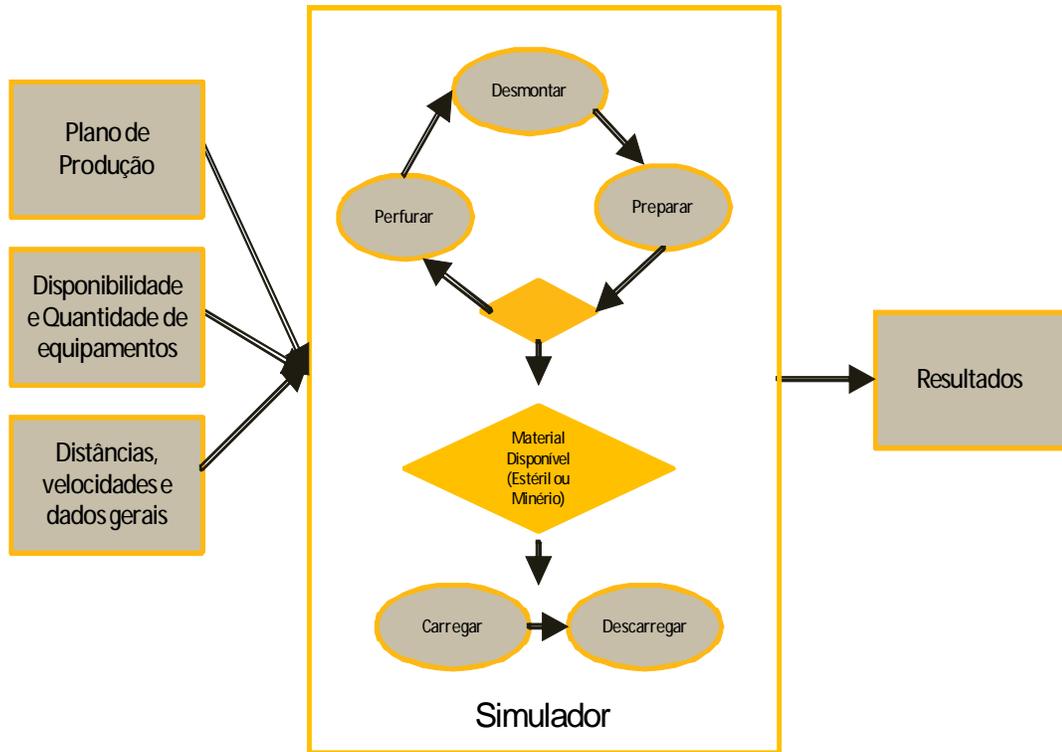


Figura 27: Fluxo de informações no modelo
Fonte: Desenvolvido pelo auto

De acordo com a figura 26, o simulador recebe via Excel todas as informações do período a ser simulado, através do arquivo de entrada de dados em Excel (Plano de Produção, equipamentos, disponibilidades, distâncias, velocidades, etc). Após ler as informações, o simulador roda o modelo, através da interface das atividades das frentes com os ciclos dos caminhões, fornecendo os resultados para análise.

2) Estações de trabalho:

As estações de trabalho são os locais onde os caminhões ou as entidades das frentes ocupam alguma parte do seu tempo desenvolvendo uma atividade. As principais estações de trabalho do sistema são os locais de carga e descarga de minério ou estéril, para os caminhões, e as atividades de perfuração, desmonte e preparação da frente, para as entidades das frentes. Logo os caminhões, trabalham em um ciclo constante de carga de minério ou estéril e descarga destes nos seus respectivos destinos. As entidades que representam as atividades das frentes são atendidas em estações de trabalho das atividades de perfuração,

desmonte e preparação da frente de acordo com a disponibilidade e quantidade dos equipamentos jumbos, fandrills, equipes de blasters, etc.

3) Recursos:

Nas estações de trabalhos os caminhões são atendidos por recursos, as carregadeiras, no caso do carregamento. Logo se as carregadeiras não estiverem disponíveis nas estações de trabalho, por motivo de manutenção ou por estarem em outra frente, os caminhões terão que esperar até que essas estejam disponíveis para continuarem os ciclos de carga e descarga. O mesmo procedimento vale para os outros equipamentos, tais como, jumbos, fandrill, scaler, etc, onde cada frente espera a disponibilidade do equipamento para realizar a atividade específica.

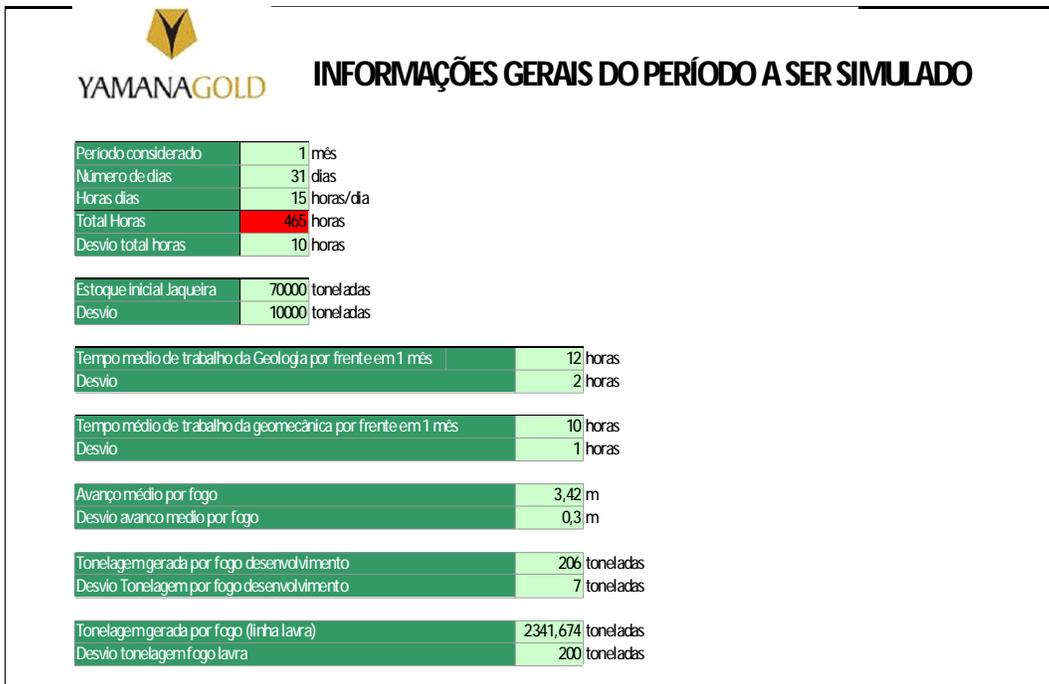
4) Variáveis do modelo:

No modelo de simulação construído foram consideradas ao todo 156 variáveis para caracterização no modelo dos acontecimentos do sistema real, que representam desde a disponibilidade de equipamentos aos teores de extração das frentes.

Como citado, para a entrada das características do período a ser simulado, foi desenvolvido um arquivo Excel. O arquivo em Excel para entrada de dados consta da seguinte estrutura:

1) Entrada de dados gerais:

Nesta planilha o usuário deverá informar dados gerais do modelo, tais como período considerado a ser simulado, horas efetivas de trabalho por dia (retirando horários de trocas de turno), avanço por fogo, tonelagem gerada por fogo, etc. A figura 28 ilustra a tela de entrada de dados gerais via Excel.



The screenshot displays the 'YAMANA GOLD' logo and the title 'INFORMAÇÕES GERAIS DO PERÍODO A SER SIMULADO'. It contains several data tables with green headers and values. The 'Total Horas' value is highlighted in red.

YAMANA GOLD		INFORMAÇÕES GERAIS DO PERÍODO A SER SIMULADO	
Período considerado	1	mês	
Número de dias	31	dias	
Horas/dias	15	horas/dia	
Total Horas	465	horas	
Desvio total horas	10	horas	
Estoque inicial Jaqueira	70000	toneladas	
Desvio	10000	toneladas	
Tempo médio de trabalho da Geologia por frente em 1 mês	12	horas	
Desvio	2	horas	
Tempo médio de trabalho da geomecânica por frente em 1 mês	10	horas	
Desvio	1	horas	
Avanço médio por fogo	3,42	m	
Desvio avanço médio por fogo	0,3	m	
Tonelagem gerada por fogo desenvolvimento	206	toneladas	
Desvio Tonelagem por fogo desenvolvimento	7	toneladas	
Tonelagem gerada por fogo (linha lavra)	2341,674	toneladas	
Desvio tonelagem fogo lavra	200	toneladas	

Figura 22: Tela de entrada de dados gerais via Excel
Fonte: Elaborado pelo autor

2) Velocidades e distâncias:

Nesta planilha o usuário deverá entrar com as velocidades e distância das frentes programadas para o período simulado. A tabela 5 mostra os dados de entrada das velocidades médias dos Caterpillars em situações diferenciadas e os dados de entrada das distâncias (Km) entre as frentes de desenvolvimento produtivo aos pontos de destino.

Tabela 5: Entrada de dados de distâncias e velocidades

Caterpillar		
Velocidade média (Km/h)	carregado	vazio
subindo	10	12
descendo	12	12
plano	22	25

Distâncias Desenvolvimento Produtivo (Km)	Destino			
	Boca da Mina	Jaqueira	Britador	Depósito de Estéril
N 700 LMPC-S	1,841	2,432	5,032	0
N 665 LMPC-S	1,841	2,432	5,032	0
Trav. N 700-S (893)	1,841	2,432	5,032	0
Trav N 400 ARB N (1423)	2,56	3,151	5,751	0
Trav N 400 ARB S (1002)	2,56	3,151	5,751	0
N 400 ARB-N	2,56	3,151	5,751	0
N 400 ARB-S	2,56	3,151	5,751	0
Trav. N 435 ARB-S (0869)	2,509	3,1	5,7	0
N 370 (II) ARB-S + Travessa	2,865	3,456	6,056	0
N 370 (II) ARB-N + Travessa	2,865	3,456	6,056	0
N 500 ARB S JB-2	1,557	2,398	4,998	0
Frente 12	1,841	2,432	5,032	0

Fonte: Elaborado pelo autor

3) Equipamentos:

Esta planilha é utilizada para entrada das quantidades, capacidades produtivas e disponibilidades dos equipamentos programados para trabalharem na mina João Belo para o período simulado. A tabela 6 apresenta os dados de entrada relativos aos jumbos. Esta tabela nos indica, por exemplo, que até 11 jumbos trabalhando podem ser considerados neste modelo. Desta forma, o usuário colocará 1 na coluna quantidade, caso aquele jumbo for utilizado na produção, a disponibilidade dele, a produção dele (tempo para perfurar uma frente) e o desvio padrão do tempo de produção por frente, considerando assim a característica estocástica do sistema.

Tabela 6: Entrada de dados dos equipamentos

Equipamentos disponíveis	Quantidade	Disponibilidade	Horas disponíveis	Produção (h/frente)	Desvio produção (hora por frente)
1	1	0,74	344,1	2,5	1
2	1	0,72	334,8	2,5	1
3	1	0,74	344,1	2,5	1
4	0	0,89	413,85	0	1
5	0	0,89	413,85	0	1
6	0	0,89	413,85	0	1
7	0	0,89	413,85	0	1
8	0	0,89	413,85	0	1
9	0	0,89	413,85	0	1
10	0	0,89	413,85	0	1
11	0	0,89	413,85	0	1
Total	3		4333,8		

Fonte: Elaborado pelo autor

4) Plano de Produção:

Nesta Planilha o usuário entrará com todo o Plano de Produção do período detalhado por frentes, blocos e prioridade. A tabela 7 ilustra os dados de entrada referentes ao plano das frentes de desenvolvimento produtivo.

Tabela 7: Entrada de dados do Plano de Produção

Nível	Prioridade							
	1	2	3	4	5	6	7	8
N 700 LMPC-S	1.547	0	0	0	0	0	0	0
N 665 LMPC-S	0	1.237	0	0	0	0	0	0
Trav. N 700-S (893)	0	0	557	0	0	0		0
Trav N 400 ARB N (1423)	0	0	0	619	0	0	0	0
Trav N 400 ARB S (1002)	0	0	0	0	619	0	0	0
N 400 ARB-N	0	0	0	0	0	1.355	0	0
N 400 ARB-S	0	0	0	0	0	0	1.547	0
Trav. N 435 ARB-S (0869)	0	0	0	0	0	0	0	557

Fonte: Elaborado pelo autor

5) Teores:

Planilha utilizada para entrada dos teores por frente e desvios esperados dos teores de cada frente e bloco a serem trabalhados. A tabela 8 ilustra os dados de entrada dos teores das frentes de desenvolvimento produtivo

Tabela 8: Entrada de dados dos teores

Desenvolvimento Produtivo (Teores)	
Nível	Estoque inicial da frente
Frente prioridade 01	1,00
Frente prioridade 02	1,00
Frente prioridade 03	1,40
Frente prioridade 04	2,00
Frente prioridade 05	2,00
Frente prioridade 06	2,72
Frente prioridade 07	2,39
Frente prioridade 08	1,65
Frente prioridade 09	2,20
Frente prioridade 10	1,39
Frente prioridade 11	1,65

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o modelo desenvolvido no Arena, visando organizar o modelo, foram desenvolvidos submodelos dentro do modelo que comunicam entre si com objetivo de representar a realidade do sistema. Os submodelos são descritos a seguir:

1) Submodelo leitura de dados:

Este submodelo foi desenvolvido para leitura dos dados via Excel. Dentro dos blocos utilizados para programação no Arena, tem-se o bloco *ReadWrite*, no *template Advanced Process*, que é utilizado para leitura de informações originadas de arquivos de outros formatos. Este bloco foi o principal utilizado neste submodelo.

2) Submodelo frentes de desenvolvimento produtivo:

Este submodelo foi utilizado para representar as atividades de perfuração, desmonte, preparação de frentes (abatimento de “chocos”), visando disponibilizar minério para o carregamento e transporte. Foi criada uma entidade para cada frente, ao todo 30 frentes de desenvolvimento produtivo. Desta forma, o processo de perfurar, desmontar e preparar a frente só é iniciado se o usuário informar via arquivo Excel se tem avanço programado para frente em questão. Como exemplo, em Março foram programadas 11 frentes de desenvolvimento produtivo para João Belo. Assim foi informado via Excel o total de minério programado para cada frente e o Arena irá trabalhar com a frente até a quantidade programada ser atingida ou o tempo de simulação chegar ao fim. Ressalta-se que as atividades na frente são

limitadas pela quantidade e disponibilidade de equipamentos (Jumbos, equipe de blaster e equipe de abatimento de choco ou scaler), logo se o equipamento estiver sendo utilizado por uma frente, ele fica indisponível para utilização em outra frente. Ao concluir o ciclo de atividades a frente disponibiliza o minério desmontado para as atividades de carregamento e transporte. Logo o processo de perfuração, desmonte, etc só retornará a acontecer, caso o minério disponibilizado seja todo transportado e caso ainda tenha minério planejado para a frente, ou seja, se o Plano de Produção programado para a frente não tiver sido atingido.

3) Submodelo frentes de desenvolvimento exploratório:

O submodelo frentes de desenvolvimento exploratório segue a mesma estrutura do submodelo frentes de desenvolvimento produtivo, no entanto, o plano é para retirada de estéril. Ressalta-se que os equipamentos de perfuração (jumbos), as equipes de blasters, os equipamentos de limpeza e a equipe de limpeza (scaler e equipe abatedora de choco) são os mesmos utilizados no desenvolvimento produtivo. Desta forma os equipamentos se revezam entre as frentes de acordo com as prioridades do Plano de Produção.

4) Submodelo frentes de Lavra:

Neste submodelo são representadas as atividades nas frentes de lavra. Ressalta-se que a estrutura consiste na mesma do desenvolvimento, no entanto, é considerado o conceito de linhas de perfuração. No arquivo de entrada de dados via Excel, é informada a quantidade de linhas programadas para um determinado bloco, as linhas que já foram perfuradas (reserva perfurada) e as linhas a perfurar. Desta forma, o modelo irá testar em todas as frentes se possui alguma linha a ser perfurada e utilizará o Fandriill para perfuração, e a partir daí desmontará 02 linhas por vez (orientação do Planejamento de Mina) para disponibilizar o minério para carregamento.

5) Submodelo Atividades Jaqueira:

Este submodelo foi desenvolvido para representação das atividades da Jaqueira, ele recebe as entidades caminhões Caterpillar AD45 que retiram minério da mina e as entidades caminhões Scania e terceirizados que transportam minério da Jaqueira

para o britador. O usuário deverá entrar com o estoque inicial da Jaqueira via Excel, a partir daí o Arena retornará o estoque final.

6) Submodelo atividades britador:

Neste submodelo foram representadas as atividades de movimentação de minério na área da britagem, onde são recebidas as entidades caminhões Scania e caminhões terceirizados que descarregam minério no pátio da britagem, contabilizando assim, o total de minério transportado para a britagem.

7) Submodelo ciclo de caminhões desenvolvimento:

Este submodelo representa os ciclos dos caminhões Caterpillar AD45 destinados às atividades de desenvolvimento (exploratório e produtivo), considerando o ponto de carga e descarga. Inicialmente, a entidade caminhão vai à frente de desenvolvimento (produtivo ou exploratório) que tenha minério ou estéril disponível respeitando a prioridade apresentada no Plano de produção. Depois de carregado a entidade caminhão vai para o pátio jaqueira, em caso de desenvolvimento produtivo, ou para o local de deposição de estéril, em caso de desenvolvimento exploratório. Ressalta-se que os caminhões são carregados por carregadeiras, desta forma, quando uma carregadeira esta trabalhando em uma frente, ela fica indisponível para trabalhar em outras frentes.

8) Submodelo ciclo de caminhões lavra:

Submodelo que representa o ciclo de caminhões Caterpillar AD45 destinados às atividades de lavra, seguindo a mesma lógica do submodelo ciclo de caminhões do desenvolvimento.

9) Submodelo controle disponibilidade equipamentos:

Foram criadas entidades para cada equipamento visando definir sua disponibilidade. Desta forma, ao iniciar a simulação é criada uma entidade para cada equipamento. A entidade disponibilidade do equipamento tem um atributo de valor inicial 1. Ao passar o tempo de disponibilidade do equipamento, o atributo da entidade passa a ter valor 2. Desta forma, o modelo antes de utilizar qualquer equipamento testará se ele está disponível ou não, ou seja, se o atributo está com valor 1 ou 2.

10) Submodelo Teores:

Este submodelo irá calcular o resultado do teor médio final de extração, através da média ponderada pela quantidade de minério extraída de cada frente, considerando a variação esperada para o teor de cada frente. Logo o modelo irá sortear teores para cada frente, considerando o intervalo do teor esperado pela Geologia.

11) Submodelo Animação:

É o submodelo de animação visual da simulação, utilizado na apresentação de resultados.

4.3. O fluxo das entidades no modelo

Para que o modelo de simulação represente o sistema real, as entidades precisam mover-se pelo sistema. Como se tem várias opções de rotas para movimentação dos caminhões que entram na mina para retirada de minério ou estéril, diversos artifícios foram utilizados para representação destas atividades. As premissas adotadas foram:

- No modelo as entidades caminhões Caterpillar para lavra e desenvolvimento foram criadas separadamente
- Tanto no desenvolvimento quanto na lavra, os caminhões terão que decidir em que frente irá carregar. Uma resposta óbvia é que o caminhão irá para frente onde se tem minério e carregadeira disponível. Esta decisão é feita no modelo por um bloco *decide 2-condition*, onde o teste é se a frente prioritária está disponível, ou seja, se tem material a ser carregado, valor indicado pela variável quantidade de material na frente, definido pela entidade da frente explicado na secção 4.2. Se a condição, ter material disponível para o carregamento, não for satisfeita, testa-se a segunda opção de frente e assim sucessivamente. Além da condição de ter material na frente testa-se também se há carregadeira disponível para realizar a tarefa. Ressalta-se que se algum caminhão já foi enviado a uma frente, o modelo testa se tem outra frente que está disponível e com carregadeira, caso contrário, espera-se na fila, até uma frente apresentar todas as condições necessários para o carregamento. A variável material disponível na frente é determinada pelas atividades na frente: Perfurar, desmontar, etc., logo só é

disponibilizado material para carregamento após o ciclo de atividades na frente estiver completo.

- Quando inicia o processo de carregamento em uma frente, ou seja, é satisfeita a condição da variável material na frente for maior que zero, ocupa-se o recurso carregadeira até a variável material na frente atingir o valor zero, ou seja, todo o material ter sido transportado.
- As variáveis material disponível na frente e material planejado para a frente vão diminuindo à medida que uma entidade caminhão passa na estação de trabalho.
- Quando a variável material na frente zerar, ou seja, o material na frente acabar, libera-se o recurso carregadeira e o módulo *signal* envia um sinal para o módulo *hold* da entidade artifício da respectiva frente, para liberação da frente para iniciar novamente o ciclo de perfuração, desmonte e preparo.
- Depois de carregado em uma das frentes, a entidade caminhão terá que se deslocar até a estação de trabalho, Pátio Jaqueira, em caso de minério, e para o respectivo destino em caso de estéril. Chegando ao destino o modelo somará a capacidade de um caminhão à variável total de minério transportado e o mesmo valor à variável estoque no pátio da jaqueira.
- Para as entidades caminhões Scania, a construção do modelo será mais simples, pois só testará se tem minério no pátio da jaqueira. Caso positivo a entidade passa pela estação de trabalho carregamento, e diminui-se a capacidade do caminhão da variável total de estoque no pátio. A partir daí a entidade caminhão vai para a estação de trabalho britador, descarrega e volta, aumentando em uma capacidade do caminhão a variável alimentação na planta.
- As entidades caminhões terceirizados obedecem à mesma regra das entidades Scania.

4.4. Tratando a disponibilidade dos equipamentos

Para considerar a variável disponibilidade dos equipamentos no modelo a seguinte estrutura foi adotada:

- Jumbo, fandrill, carregadeira e caminhões:
As disponibilidades desses equipamentos serão controladas através da criação de uma entidade disponibilidade para cada um. Ou seja, cria-se uma entidade junto

com um atributo disponibilidade que marcará o tempo inicial do modelo. Esta entidade ficará sendo atendida a uma proporção do tempo total a ser simulado igual à proporção de disponibilidade dos equipamentos em um mês. Dessa forma, quando o tempo vencer a entidade passa por um *assign* que torna o atributo disponibilidade indisponível. Dessa forma, o equipamento passa a ficar indisponível a todos.

Ressalta-se que as atividades de deslocamento dos equipamentos (jumbos, carregadeiras, etc) de uma frente à outra e parada para abastecimento serão subtraídas da disponibilidade, pois são horas improdutivas dos equipamentos, exceto para os caminhões, onde o deslocamento é tempo produtivo.

4.5. Tratando a variabilidade do sistema

O principal objetivo do modelo de simulação desenvolvido é trazer para as análises desenvolvidas dentro da empresa, em relação às alterações no sistema produtivo, a importância da consideração da variabilidade do sistema real.

Dessa forma, para todas as variáveis que representam alguma atividade ou características do modelo, foram consideradas sua estocasticidade particular. Um exemplo, para a capacidade dos caminhões, que são em média 40 toneladas, no entanto no sistema real as viagens de um determinado caminhão não terão sempre o valor de 40 toneladas, essa quantidade transportada irá variar a cada viagem realizada. Logo essa variabilidade da quantidade transportada foi considerada no modelo.

Para representação da variabilidade do sistema foi utilizado o conceito de Distribuição de Probabilidade, que segundo MontGomery (2004), é um modelo matemático que relaciona o valor da variável com a probabilidade de ocorrência daquele valor na população.

Neste contexto, ao desenvolver um modelo em Arena, em vez de informar um valor exato que uma variável irá assumir, informa-se uma distribuição de probabilidade e os parâmetros desta. Assim, o Arena irá sortear valores aleatórios que a variável irá assumir dentro do modelo.

Durante a coleta de dados do trabalho em análise observou-se que as variáveis do sistema: Capacidade dos equipamentos, tempos de carregamento, transporte entre

pontos fixos, tempos de perfuração, desmonte, etc. se comportavam da mesma maneira. Todas as variáveis assumiam valores em torno de um valor médio, que sob as mesmas condições não variavam entre um intervalo determinado.

Diante da situação, foi decidido utilizar para este tipo de variável de atendimento e deslocamento de entidades a distribuição de probabilidade normal.

Segundo Montgomery (2004), a Distribuição Normal é, provavelmente, a mais importante distribuição, tanto na teoria como na prática da estatística. Se x é uma variável aleatória normal, então a distribuição de probabilidade de x é definida como segue:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Onde μ é a média da amostra utilizada e σ é o desvio padrão. A partir desta distribuição assumi-se que os valores de uma determinada variável estarão entre o intervalo demonstrado na figura 28:

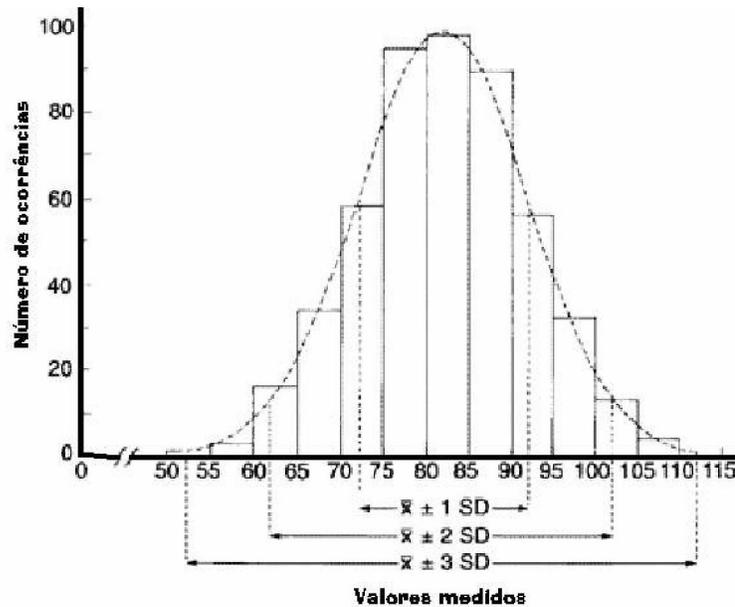


Figura 28: Distribuição Normal
Fonte: Desenvolvido pelo autor

Dessa forma ao se adotar uma distribuição Normal assumi-se que 68,26% dos valores assumidos pela variável em questão estão entre o intervalo $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$, 99,46% estão entre o intervalo $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ e 99,73% entre o intervalo $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$.

No contexto analisado observou-se a distribuição Normal como a melhor representação para as variáveis em análise. Logo foram selecionadas amostradas de cada variável em questão, determinado a média e o desvio padrão, e informado ao Arena para realização dos sorteios dos valores a serem assumidos pelo modelo.

Capítulo 05 - Resultados do modelo

5.1. Validação do modelo

Depois da construção do modelo de simulação, foram coletados dados referentes à Programação Mensal de produção do mês de Março/09. O mês de Março/09 foi utilizado como protótipo para estudo de validação do modelo.

Com as informações referentes ao mês de Março/09, o modelo foi rodado e apresentou um resultado satisfatório em relação à realidade. A tabela 09 mostra os resultados reais para as principais variáveis obtidas do sistema real e a figura 28 mostra os intervalos de resultados obtidos no Arena.

Tabela 9: Validação do modelo

Resultado Real Março		
Indicador	UND	Resultado Real
Total minério extraído	tonelada	95679,62
Total estéril extraído	tonelada	10643,88
Total minério transportado ao britador	tonelada	96162
Total desenvolvimento	metros	396,05
Teor	g/t	1,98

Fonte: Elaborado pelo autor

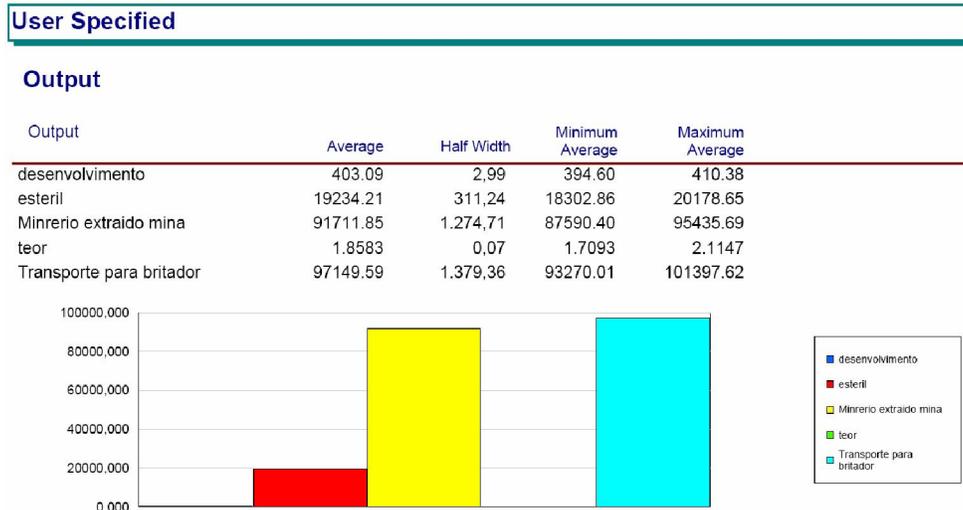


Figura 23: Resultados obtidos na simulação via Arena

Fonte: Pesquisa direta

Uma consideração importante em relação aos resultados obtidos, é que o modelo considera que a operação irá seguir o plano de produção em termos de quantidades e

prioridades. Logo o simulador é uma ferramenta de apoio ao planejamento que prevê o resultado das atividades caso este plano seja seguido.

Dessa forma, as variações encontradas principalmente para estéril transportado, consistem em não seguimento do Plano Mensal de Produção pela Operação durante a realização das atividades. Considera-se que o simulador seguiu a risca as prioridades de frentes de desenvolvimento passadas na Programação Mensal de Produção.

Neste contexto, com exceção da variável estéril é possível observar que todas as outras variáveis tiveram resultados reais dentro do intervalo (mínimo e máximo) fornecido pelo Arena.

Logo concluiu-se que o modelo apresentou resultados bem satisfatórios, validando assim o modelo de simulação desenvolvido.

5.2. Análises disponíveis nos relatórios do Arena

Após rodar o modelo de simulação, o Arena disponibiliza ao usuário uma seqüência de relatórios que poderá ser utilizada para realização de análises relacionadas às variáveis do sistema em questão.

Uma análise disponível é a utilização de tempos das entidades. A partir da entidade de cada frente, o Arena apresenta o tempo que a frente ficou ocupada em atividades de Perfuração, desmonte e limpeza e o tempo que ela ficou em espera por equipamentos, ex. caminhões e carregadeiras para limpeza da frente ou Jumbos para perfuração.

Capítulo 06 - Estudando cenários futuros

Considerando que um dos principais motivos da utilização de um simulador é a possibilidade de análises do desempenho de cenários futuros sem perturbação da realidade atual do sistema, este capítulo demonstra dois exemplos de análise futura aplicado ao simulador desenvolvido.

A análise de cenários futuros foi baseada em projetos em fase de desenvolvimento na empresa. Foram analisados dois cenários:

- 1)** Troca do sistema de turnos de trabalho de 06 para 08 horas;
- 2)** Análise da capacidade de produção da mina João Belo visando avaliar seu desempenho para o plano de 8.000 toneladas/dia.

O objetivo destas análises é levantar o efeito sob as atividades da empresa em termos de produção, ou seja, porcentagem de aumento ou perda de produção, com a adoção das novas estruturas.

6.1. Troca do sistema de turnos de trabalho

Até o mês de Abril 2009 a JMC trabalhava em sistema diário de 03 turnos de 06 horas. Considerando que as horas efetivas de produção nunca atingiram as 06 horas programadas, devido às atividades de deslocamento dos funcionários da entrada da empresa à Mina, atividades de DDS (Diálogo Diário de Segurança), retirada de materiais para produção (ex. materiais de perfuração), retirada de EPI (Equipamento de Proteção Individual), deslocamento da sala de DDS à frente de trabalho e etc. Logo as horas efetivas de trabalho diário reais se aproximavam de 05 horas por turno.

A partir de Maio, a empresa passou a adotar o turno de 08 horas. Logo espera-se um aumento nas horas efetivas do dia de 05 horas para 06 horas de trabalho efetivo. A Tabela 10, mostra as mudanças que ocorrerão:

Tabela 10: Variáveis alteradas na mudança do sistema de turnos

Variáveis alteradas - Mudanças de turnos				
Indicador	UND	Resultado atual	Resultado futuro	Var(%)
Turno	horas	6	8	33%
Horas Efetivas	horas	5	6	20%

Fonte: Desenvolvido pelo autor

A partir das mudanças efetuadas foi rodado o modelo e os resultados obtidos são apresentados na figura 24:

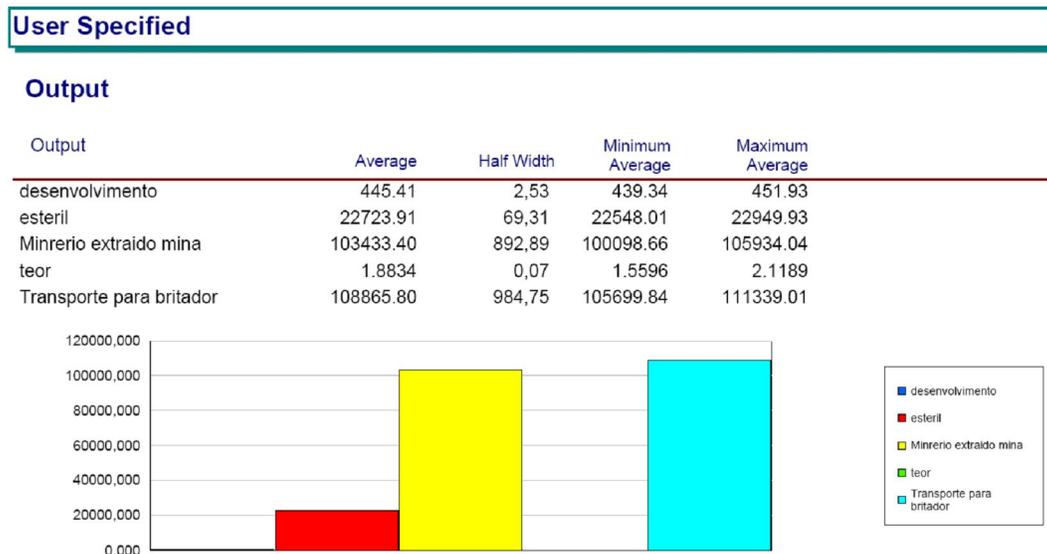


Figura 24: Resultados da simulação para a troca de turnos

Fonte: Pesquisa direta

Após os resultados obtidos via simulação é possível concluir que a empresa terá ganhos médios acima de 8% na extração de minério e ganhos aproximados de 13% em desenvolvimento total, considerando a limitação de produção do plano de Março e das disponibilidades dos equipamentos.

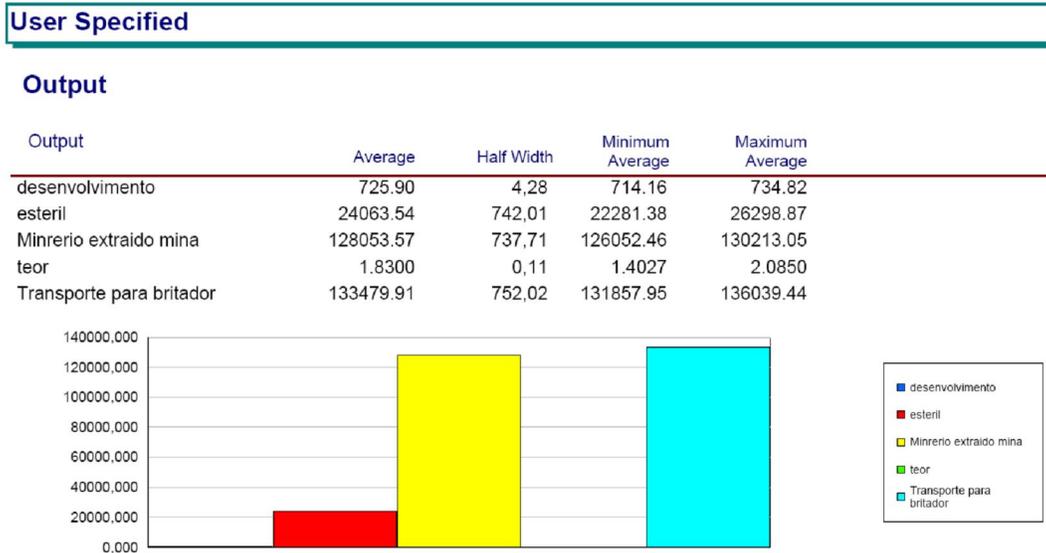
6.2. Estudo da capacidade da Mina João Belo

Considerando que a empresa tem um projeto de aumentar a produção de 6.500 toneladas por dia para 8.000 toneladas por dia, foi estudado um cenário, visando levantar a capacidade atual da Mina com os equipamentos utilizados.

Ressalta-se que para análise da capacidade da estrutura atual foi considerado que a mina possui minério em quantidade ilimitada para extração, logo os equipamentos

trabalharam todo o tempo, respeitando apenas suas limitações de disponibilidade e considerando as distâncias, velocidades e horas efetivas de trabalho no dia, Além também de se considerarem as condições atuais de produtividade dos equipamentos.

Os resultados obtidos foram apresentados na figura 25 a seguir.



Fonte: Pesquisa Direta

A partir dos resultados acima, é possível concluir que caso seja fornecido um Plano de Produção ilimitado para um mês, com a estrutura de equipamentos atual de João Belo, e considerando o turno de 08 horas a empresa terá uma ganho médio de aproximadamente 44% em tonelagem movimentada (estéril + minério) e 83% em desenvolvimento. Logo, conclui-se que a atual limitação da mina é a reserva de material disponível e não os equipamentos.

Ressalta-se que a análise considerou um tempo total de 1 mês, logo pode acontecer falta de minério na planta em dias específicos considerando a indisponibilidade dos equipamentos no dia considerado, no entanto não foram analisados dias separados e sim o ambiente mensal completo, visando levantar a capacidade da mina com a estrutura atual de equipamentos, distâncias e disponibilidades, considerando que se tenham blocos de minérios disponíveis para Lavra.

Caso a empresa se interesse pela expansão do modelo, um estudo detalhado da situação de todas as minas poderá ser realizado, visando levantar informações para o projeto de extração de 8.000 toneladas/dia.

Capítulo 07 – Implantação do Projeto e Trabalhos futuros

Este capítulo visa demonstrar as próximas etapas para incorporar o modelo de simulação às atividades da JMC e propostas de trabalhos futuros detectadas durante o desenvolvimento do projeto.

7.1. Propostas de trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste projeto foi possível detectar possíveis propostas de trabalhos futuros. A principal proposta foi o estudo da possibilidade de adquirir o *software Lingo*, para trabalho em conjunto com o Arena.

Considerando que o software Lingo é uma ferramenta de otimização, completaria assim, a utilização da Pesquisa Operacional na JMC, otimizando cenários via Lingo e testando os cenários propostos via Simulador Arena. A mesma estrutura utilizada pelo Planejamento da Mineradora Vale.

Resumindo, o modelo desenvolvido via Lingo retornará cenários ótimos de quantidades e locais da retirada de minério para um determinado período, a partir dos locais disponíveis, considerando um melhor Teor e menor custo. Desta forma, estes cenários podem ser avaliados pelo Arena em termos da estrutura de equipamentos que se tem disponível. A interface com o Excel visa facilitar a utilização por pessoas que não conhecem a programação via Lingo e /ou Arena.

Capítulo 08 – Conclusões

A partir do término do projeto, conclui-se que a simulação realmente será uma ferramenta eficaz para a empresa. A análise dos cenários futuros também foi satisfatória considerando as informações que se teve acesso.

A partir dos relatórios do Arena, é possível levantar características do sistema analisado, que muitas vezes não são vistas na rotina real do sistema, que podem vir a ser utilizadas em atividades de tomada de decisões na empresa.

Outro ponto importante, será a utilização do Arena na validação dos Planos de Produção desenvolvidos pelo Planejamento de Mina. A partir do Arena, será possível estudar se a atual estrutura é suficiente para conclusão do Plano de Produção proposto.

Neste contexto, concluiu-se que o Arena é uma ferramenta muito eficaz na análise da situação atual do sistema analisado, análises essas que podem ser utilizadas como ferramenta de apoio nas atividades gerenciais, e também na análise de possíveis cenários futuros, que consideram mudanças estratégicas no sistema real.

A estrutura proposta da utilização do Lingo em conjunto com o Arena também poderá proporcionar um ganho muito grande para auxílio à tomada de decisões na empresa e para elaboração de planos de produção mais confiáveis, tendo em vista que tal estrutura associada à pesquisa operacional vem sendo utilizada e proporcionando ganhos comprovados em empresas, como a Mineradora Vale.

A partir das citações acima pode-se afirmar que a simulação a eventos discretos se confirmou como uma ferramenta eficaz no apoio à tomada de decisões em empresas do ramo de mineração.

Dessa forma, conclui-se que o trabalho atingiu os objetivos propostos.

BIBLIOGRAFIA

Carvalho, Duílio D. T. de. Metodologia de Análise do Desempenho da Usina de Concentração da Samarco Mineração S.A. Baseada em Simulação das Operações. Duílio Donizete Teixeira de Carvalho - Ouro Preto - UFOP, 2003

FREITAS FILHO, Paulo José de. Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena. 2.ed. Florianópolis: Visual Books,2008.

Introdução ao Software Arena (Paragon,2006).

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A., Metodologia do trabalho científico. São Paulo: Atlas, 1991.

LAW, A. M. & KELTON, W. D. Simulation modeling & analysis. Singapura, McGraw Hill, 1991.

LAW, A. M. & MCCOMAS, M. G. How to select simulation software for manufacturing applications, Industrial Engineering,, p. 29-35, 1992.

RAMOS NETO, A.N. Desenvolvimento de um Template no programa Arena para a simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto. Ouro Preto: PPGEM/EM/UFOP, 113p., 2003.(Dissertação de Mestrado).

PRADO, D.(2004) – Usando o Arena em Simulação. Vol. 3.- INDG, Belo Horizonte.

PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E.,SADOWSKI, R.P. Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill, New York, USA. v. 2. 1990.

PINTO, L. R., Uso de técnicas de pesquisa operacional na otimização das operações de lavra, In: VI Congresso Brasileiro de Mineração, pp. 53-61, Salvador, Agosto/1995.

PINTO, L.R. Metodologia de análise do planejamento de lavra de minas a céu aberto baseada em simulação das operações de lavra. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1999. (Tese de Doutorado).

SAKURADA, N. ; MIYAKE, D. I. . Estudo Comparativo de Softwares de Simulação de Eventos Discretos Aplicados na Modelagem de um Exemplo de Loja de Serviços. In: XXIII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2003, Ouro Preto - MG. ENEGEP 2003. Porto Alegre : ABEPRO - Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2003.

SILVA, E. L. e MENEZES, E. M., Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação. Florianópolis : UFSC,PPGEP,LED, 113p, 2000.

STEFFEN, Diego Augusto; Cassel, Ricardo A. . Relatório Final da Simulação do abastecimento da TNT no condomínio industrial da General Motors (GM). 2005

Arquivos JMC de fotos.

MONTGOMERY, Douglas C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. LTC, Rio de Janeiro, 2004.