



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto



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



SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE NUMA MINA À CÉU ABERTO DE CARVÃO

Autor: Ivo Fernando Mambo

Orientadores: Prof. Dr. Adilson Curi

Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas 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 Minas

Ouro Preto/ MG

Abril, 2017

M263i Mambo, Ivo Fernando.
Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina a céu aberto de carvão [manuscrito] / Ivo Fernando Mambo. - 2017.
72f.: il.: graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Curi.
Coorientador: 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: Engenharia Mineral.

1. Lavra de minas - Planejamento. 2. Lavra de minas - Simulação. 3. Armazenamento e transporte de cargas. I. Curi, Adilson. II. Cabral, Ivo Eyer. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 622.01

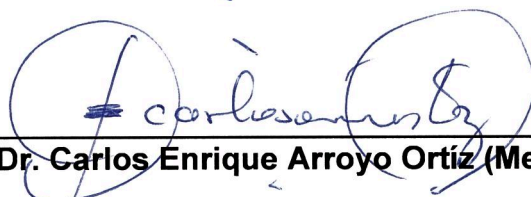
**“SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO E
TRANSPORTE NUMA MINA A CÉU ABERTO DE CARVÃO”**

AUTOR: IVO FERNANDO MAMBO

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de abril de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



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



Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (Membro) – UFMG



Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa (Membro) – UFOP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus todo poderoso, pela saúde que me proporciona em cada dia vivido.

Em segundo lugar agradeço aos meus Orientadores os Professores Adilson Curi e Ivo Eyer Cabral pelos ensinamentos e paciência que dedicaram para o sucesso deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Hernani Mota de Lima pelas dicas que tornaram este trabalho mais prático e simples.

Agradeço à minha instituição de trabalho o Instituto Superior Politécnico de Tete pela aposta na qualidade do seu corpo docente.

À UFOP incluindo todos os professores e seus colaboradores pelo carinho e recepção calorosa que me foi cedida.

Finalmente agradeço aos meus Pais Fernando Rufino U. Mambo e Belita Ismael Dalsuco e meus filhos Pemabay Náusica Iva Ivo Mambo, Edyvalda Bela Fernanda Mambo, Clayton Cristiano Ivo Mambo e Fernanda Gláucia Wilma K. C. Ivo Mambo, incluindo familiares e amigos que encorajaram me e entenderam a minha ausência para conquista de mais um título no universo acadêmico.

RESUMO

Este trabalho, visa estudar o sistema produtivo de carregamento e transporte de uma mina de carvão a céu aberto, dentro da bacia carbonífera de Moatize, localizada na Província de Tete em Moçambique. O nome da companhia não é publicado neste trabalho, por razões sigilosas. O principal desafio da mina é alcançar as metas planejadas, de produção e de utilização dos seus recursos, com intuito de incrementá-las. Desta forma, para estudar este sistema foi construído e validado um modelo de simulação computacional utilizando o *software ARENA 14.0*. A validação consistiu na comparação do histórico de produções da mina com os resultados gerados por este. Foram simulados os cenários 1 e 2, visando identificar gargalos e analisar o nível de exequibilidade do plano de movimentação das massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões, dois pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *Haulroad* (acessos principais) e um ponto de descarga no *Rompad* (pátio de estocagem de minério) em 498 e 440 horas respectivamente. Para contornar os gargalos identificados, foram simulados os cenários 3 e 4. O CENÁRIO 3 visa analisar a movimentação de massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões, três pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *Haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad* em 498 horas. O CENÁRIO 4, visa também analisar a movimentação de massas com quatro máquinas de carregamento, treze caminhões, três pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *Haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad* em 498 horas. Os resultados desses cenários, mostraram um incremento de produção, da utilização das carregadeiras e conduziram ao número ideal de pontos de descargas na PDE, o que resultou na redução de filas no sistema e no cumprimento das metas planejadas. Desta forma, os objetivos da pesquisa foram alcançados.

Palavras-chave: Mina, simulação, equipamento.

ABSTRACT

This paper aims to study the production system of an open-pit coal mine, located in Mozambique's Tete province. For confidential reasons the origin of the data will not be published in this paper. The main challenge of this company is achieve the target of production and utilization of their resources, aiming to increase them. Therefore, to study this system were built and validated a computer simulation model using ARENA 14.0. The validation consisted in comparison of the mine historical data production with the results generated through the model. From this model were identified the bottlenecks that contributes negatively to achieve the targets through the simulation of scenarios 1 and 2 that aims to analyze the feasibility of material handling, using five loaders machines, thirteen trucks, three discharge points at the west pile, one discharge point in Haulroad and one discharge point in rompad (stockpile) in period of 498 and approximately 440 hours respectively. The identified bottlenecks were reduced by simulation of two new scenarios 3 and 4:

The scenario 3 aims to analyze the mass movement using five loaders machines, thirteen trucks and three discharge points at the west pile, one discharge point in Haulroad and one discharge point in rompad in period of 498 hours.

The scenario 4 aims to analyze the mass movement using four loaders machines, thirteen trucks and three discharge points at the west pile, one discharge point in Haulroad and one discharge point in rompad in period of 498 hours.

The results of these scenarios showed an increment of production, loaders utilizations rates and the ideal number of discharge points that aims to reduce the queues (bottlenecks) in the system to reach the planned target, achieving so the objectives of the research.

Keywords: Mining, simulation, equipment.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	viii
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Etapas do trabalho.....	4
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Fases de estudo de Pesquisa Operacional (PO).....	5
2.2 Modelagem e Simulação.....	6
3.0 ESTUDO DE CASO.....	12
3.1. Desmonte e transporte de material.....	14
3.2 Ciclo operacional do sistema de carregamento e transporte de material.....	16
3.3 Gestão de atrasos operacionais.....	19
4.0 METODOLOGIA.....	23
4.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	23
a) Formulação do problema.....	24
b) Coleta e análise de dados.....	24
d) Construção do modelo de simulação do sistema produtivo real da Mina.....	26
e) Verificação de erros.....	38
f) Validação do modelo de simulação.....	38
g) Implementação do modelo.....	43
5.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	44
5.1 CENÁRIOS 1 e 2- Análise de movimentação de massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões e dois pontos de descarga na PDE, um ponto na <i>Haulroad</i> (acessos) e um ponto no <i>Rompad</i> (pátio de estocagem de minério).....	44
5.2 CENÁRIO 3- Análise de movimentação de massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões e três pontos de descarga na PDE, um ponto na <i>Haulroad</i> (acessos) e um ponto no <i>Rompad</i> (pátio de estocagem de minério).....	45

5.3 CENÁRIO 4- Análise de movimentação de massas com quatro máquinas de carregamento, treze caminhões e três pontos de descarga na PDE, um ponto na <i>Haulroad</i> (acessos) e um ponto no <i>Rompad</i> (pátio de estocagem de minério)	46
6.0 CONCLUSÕES	55
7.0 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO I	61
ANEXO II.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos equipamentos utilizados na mina em estudo.....	13
Tabela 2. Distribuição de dados de entrada no modelo de simulação.....	26
Tabela 3. Entrada de dados para o modelo de simulação (equipamentos de carregamento) ...	27
Tabela 4. Entrada de dados para o modelo de simulação (equipamentos de transporte)	29
Tabela 5 Seção de um equipamento de carregamento.....	30
Tabela 6 Códigos de destino dos materiais	31
Tabela 7. Resumo de produção trimestral da mina: dezembro/janeiro/fevereiro.....	39
Tabela 8. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de dezembro	40
Tabela 9. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de janeiro.....	41
Tabela 10. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de fevereiro	42
Tabela 11. Programação de equipamentos de carregamento.....	46
Tabela 12. Programação de equipamentos de transporte	47
Tabela 13. Comparação das produções dos cenários com produção planejada	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas da execução da dissertação	4
Figura 2. Desmonte mecânico de minério de carvão.....	14
Figura 3. Desmonte mecânico da camada de carvão com espessura de aproximadamente 90 cm.	15
Figura 4. Desmonte mecânico de estéril por meio de uma retro-escavadeira hidráulica.	16
Figura 5. Caminhão aguardando carregamento no silo de rejeito.	17
Figura 6. Caminhões transportando estéril para PDE.	18
Figura 7. Caminhão depositando estéril na PDE.....	18
Figura 8. DCA.Ciclo operacional de carregamento e transporte da mina.....	20
Figura 9. Ciclo operacional de carregamento e transporte da mina em estudo	21
Figura 10. Equipamento de carregamento ocioso, aguardando equipamento de transporte. ...	22
Figura 11. Caminhões ociosos aguardando em fila de carregamento.	22
Figura 12. Fases de construção do modelo de simulação do sistema produtivo da mina em estudo.....	24
Figura 13. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de dezembro	40
Figura 14. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de janeiro.....	41
Figura 15. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de fevereiro.....	42
Figura 16. Determinação de número mínimo de réplicas.....	45
Figura 17. Comparativo de movimentação de massas mensais simuladas vs massas planejadas	48
Figura 18. Comparativo de utilização de equipamentos de carregamento	49
Figura 19. Tempos médios de espera em filas de carregamentos	50
Figura 20. Tempos médios de espera em filas de descarga.....	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EC	Equipamento de Carregamento
FL	Frente de Lavra
EM	Especificação de Material
MP	Massas Planejadas
TM	Tipo de Material
DEST_MIN	Destino de Minério
DEST_EST	Destino de Estéril
HPO	Horas Programadas para Operação
DM	Duração da Manutenção
DMT	Distancia Média de transporte
TCC	Tempo de Ciclo de Carregamento
CM's	Caminhões
NCPO	Número de Caminhões Programados para Operação
DCPM	Designação de Caminhões Programados para Manutenção
HM	Horas de Manutenção
DM_CM	Duração da Manutenção do Caminhão
VTC	Velocidade de Transporte Carregado
VTV	Velocidade de Transporte Vazio
PDE	Pilha De Estéril
DMT	Distancia Media de Transporte
PO	Pesquisa Operacional
DCA	Diagrama de Ciclo de Atividades
DF	Disponibilidade Física
HT	Horas Trabalhadas
UT	Utilização
UT PROGR	Utilização Programada
cm	centímetros
Km	quilometro
Ton.	toneladas
Vel.	velocidade

h	hora
LT	LeTorneau
EH	Escavadeira Hidráulica
PE	Pá Elétrica
UCT	Upper Chipanga Top
UCB	Upper Chipanga Base
MC	Medium Chipanga
LCUT	Lower Chipanga Upper Top
LCUB	Lower Chipanga Upper Base
LC456	Lower Chipanga 456
OM	Outras Movimentações
UP	Utilização Programada
UMEC	Utilização Média de Equipamentos de Carregamento
F1_PDE	Frente 1 na Pilha De Estéril

1.0 INTRODUÇÃO

Os equipamentos utilizados nas minas a céu aberto cujas escalas de produção são de grande porte requerem uma análise minuciosa para que se garanta o retorno do investimento.

Para Choudhary (2015) o método clássico de transporte mais comum na mina a céu aberto é a combinação de Caminhão-Carregadeira e, esta operação consiste de quase 50 a 60% do custo total de operação na mina a céu aberto.

Para Silva (2011). “Um dimensionamento preciso da frota de equipamentos de lavra reveste-se de grande importância, uma vez que os custos envolvidos, quer de capital, quer de operação, representam, quase sempre, uma parcela considerável dos custos de uma mina”

A seção de operação de mina em estudo, trabalha com o sistema clássico de Caminhão-Carregadeira e, com base em um plano de lavra mensal são designadas as alocações dos equipamentos, as suas restrições de operação incluindo os respectivos ciclos operacionais e as massas a serem movimentadas em cada mês. Contudo, nota-se um conflito entre a gerência de operação de mina e a gerência do planejamento de lavra isto devido aos desvios observados entre as produções realizadas na mina e as programadas pela equipe de planejamento que são percebidas durante a execução do plano ou ao final do mesmo. A técnica de simulação à eventos discretos permite que se tenha uma ideia prévia dos resultados a serem obtidos caso o plano de produção previsto seja executado, podendo, portanto, ser usada para contornar estes conflitos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a exequibilidade do plano de movimentação de massas na mina em estudo, através de uso de modelo de simulação computacional.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenhar um modelo de simulação computacional que explica o comportamento do sistema produtivo real, de modo a analisá-lo visando identificar gargalos e corrigí-los para incrementar a produção da mina.
- Comparar os resultados do modelo de simulação do sistema produtivo “real” com o histórico de produção realizada na mina em estudo, para posterior validação do modelo;
- Testar quatro cenários de movimentação de massas dentro do sistema produtivo da mina com vista a incrementar em pelo menos 5,0% a produção atual (planejada), incrementar a utilização dos equipamentos de carregamento e estimar a capacidade produtiva do sistema.

1.2 Justificativa

No mercado de negócios existe uma grande competitividade entre as empresas, e algumas destas acabam abandonando este ramo devido a tomada de decisões equivocadas muitas vezes otimistas que na verdade não representam a realidade, às vezes causada pela seleção de uma técnica incorreta para a tomada de decisão.

O dimensionamento das frotas de carregamento e de transporte para a movimentação das massas mensais planejadas na Mina em estudo é feito de forma determinística com uso da planilha de cálculo do Microsoft Excel, em que não se considera a variabilidade do sistema produtivo, o que é possível utilizando um simulador tal como ARENA. Desta forma, havendo a necessidade de estudar as causas dos desvios de metas que são observados na operação da mina, é aplicada neste trabalho, a técnica de simulação para auxiliar no planejamento das operações de carregamento e transporte, com vista a identificar e contornar as causas desses desvios.

Atualmente a simulação está tendo muita aplicação e está mostrando inúmeras vantagens neste processo de tomada de decisão sobre tudo na indústria mineira uma vez que esta técnica considera a variabilidade do sistema produtivo e, representa melhor a realidade.

A título de exemplo temos as seguintes vantagens de uso da técnica de simulação:

- Facilita a análise de sistemas complexos para os tomadores de decisão sem interferir no sistema produtivo real;
- A simulação permite prever resultados de novas estratégias que se desejam implementar dentro de sistemas produtivos de uma dada companhia;
- Auxilia na identificação de gargalos, visualiza-os a partir da animação e permite compreender sistemas complexos de forma integrada num computador digital, o que na realidade não seria possível;
- A simulação é bastante flexível, já que permite estudar e selecionar diferentes cenários para posterior implementação, etc.

1.3 Etapas do trabalho

Neste capítulo são apresentadas na figura 01 as principais etapas metodológicas executadas ao longo desta dissertação que visaram o alcance dos objetivos traçados e, em seguida as mesmas são detalhadas.

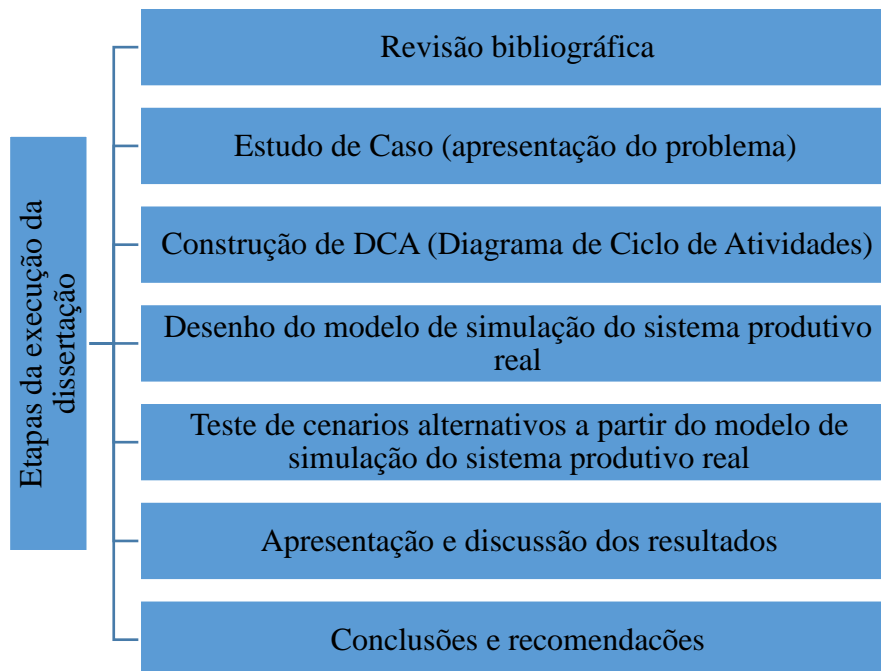


Figura 1. Etapas da execução da dissertação

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo o principal foco é direcionado a aspetos relacionados a Mina a Céu aberto, são apresentadas citações, conceitos e modelos relacionadas com: fases de estudo de pesquisa operacional, modelagem e simulação e aplicações de simulação em operações mineiras.

2.1 Fases de estudo de Pesquisa Operacional (PO)

Na visão geral da abordagem de modelagem da pesquisa operacional (PO), Hillier e Lieberman (2006), referem que uma forma de sintetizar as fases usuais de um estudo de pesquisa operacional é a seguinte:

1. Definir o problema de interesse e coletar dados;
2. Formular um modelo matemático para representar o problema;
3. Desenvolver um procedimento computacional a fim de derivar soluções para o problema a partir do modelo;
4. Testar o modelo e aprimorá-lo conforme necessário;
5. Preparar o modelo para a aplicação contínua conforme prescrito pela gerência;
6. Implementar.

Para Santos (2008) e Andrade (2009), a resolução de um problema, pelo método da Pesquisa Operacional, segue as seguintes fases:

1. **Definição do problema:** consiste na definição dos objetivos a serem atingidos, as variáveis envolvidas no problema, e as principais restrições.
2. **Construção do modelo matemático:** esta é a fase da escolha do modelo que depende do tipo de problema a ser resolvido e, apontam modelos matemáticos de programação linear como sendo os mais utilizados.
3. **Solução do modelo:** Nesta fase, a solução é encontrada a partir do modelo matemático adotado na resolução do problema.
4. **Validação do modelo:** O modelo é testado com intuito de ver se a solução obtida é condizente com o problema estudado.

5. **Implementação da solução:** Nesta fase, a solução é convertida em regras práticas para a solução do problema.

Andrade (2000) refere que para a construção de modelo de simulação algum procedimento deve ser seguido tal como: definição do problema, identificação das variáveis relevantes, formalização das equações do modelo, codificação do modelo, teste e aplicação do modelo.

Para Pinto (2002) um estudo de pesquisa operacional consiste nas seguintes etapas:

- 1 - Definição detalhada do problema a ser resolvido;
- 2 - Construção do modelo representativo do sistema;
- 3 - Solução do modelo;
- 4 - Verificação e validação do modelo;
- 5 - Implementação dos resultados obtidos.

2.2 Modelagem e Simulação

De acordo com Wainer (2009) um modelo é uma representação compreendida (abstrata e consistente) de um dado sistema que se usa para percebê-lo. Modelos podem ser concebidos de várias formas e eles tem diferentes significados de acordo com o indivíduo que o faz. Para arquitetos um modelo pode ser uma planta, para bioquímicos pode ser uma molécula tridimensional, etc.

“Um sistema devidamente dimensionado é aquele que está balanceado; a este tipo de estudo chama-se modelagem de sistemas. Para dimensionar adequadamente um sistema deve-se dedicar especial atenção aos gargalos, ou seja, pontos onde ocorrem filas” segundo Prado (1999).

Prado (1999), refere ainda que a técnica de simulação é a mais utilizada dentre as várias disponíveis para a modelagem de sistemas que podem apresentar gargalos. A teoria das filas é um método analítico que aborda o assunto através de fórmulas matemáticas, enquanto que a simulação é uma técnica que usando o computador digital, procura montar um modelo

que melhor representa o sistema em estudo. Este modelo é colocado para “rodar” e o seu comportamento é analisado.

O mesmo autor, cita que para efetuar um dimensionamento de um sistema, sempre estaremos tratando de variáveis tais como: o tempo de espera do cliente na fila, a quantidade de atendentes, etc. e, em simulação estas variáveis são randômicas e portanto, descritas por uma distribuição de probabilidade.

Wainer (2009) cita que de uma forma geral podemos ter alguns dos seguintes tipos de modelos:

- Modelos de exploração são modelos que são utilizados para perceber melhor a operação do sistema;
- Modelos de previsão são modelos que são usados para prever o comportamento futuro do sistema;
- Modelos de otimização são modelos usados para otimizar a performance de um sistema através de análises de diferentes alternativas;
- Modelos conceptuais, são modelos que são aplicados quando o sistema ainda não existe e o modelo é usado para testar diferentes opções prioritárias para construção;
- Modelos de projetos de Engenharia são modelos usados para projetar aparelhos em aplicações de engenharia;
- Modelos de protótipos rápidos, são modelos que permitem a obtenção rápida de um modelo de trabalho que pode ser usado para testar ideias e obter resultados iniciais das partes interessadas;
- Modelos de planejamento, são modelos que servem para idealizar sobre o futuro em diferentes campos de aplicação;
- Modelos de aquisição, são modelos que envolvem a escolha de um equipamento adequado (por exemplo helicópteros, aviões, submarinos, etc.) cuja aquisição é extremamente cara, permitindo que o cliente explore diferentes alternativas sem a necessidade de construir o equipamento antes de tomar a decisão;

Pinto e Neto (2004), referem que os modelos desenvolvidos para simular as operações de lavra em minas podem ser usados como ferramenta na avaliação de cenários para:

- Permitir ao engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta ou sem perturbação da produção;

- Melhorar a percepção geral da natureza de um processo, através da animação do sistema no computador;
- Estudar o dimensionamento e seleção de equipamentos utilizados nas operações de mina, como caminhões e equipamentos de carregamento;
- Dimensionar a capacidade de silos, britadores e pilhas de estoque;
- Dimensionar sistemas para escoamento da produção usando trens e navios.

Wainer (2009), define a Simulação como sendo a representação de um comportamento dinâmico de um sistema de interesse com o objetivo de obter conclusões que podem ser aplicadas ao sistema.

De acordo com Banks (1998) simulação é a operação de um processo de mundo real ou sistema ao longo do tempo.

Para Prado (1999), atualmente o conceito de simulação mais aceito é o seguinte: *“técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”*.

Segundo Kelton (2004), entidades, atributos, variáveis, recursos, filas, acumuladores estatísticos, eventos, relógio de simulação, início e término de uma atividade constituem os principais componentes de um modelo de simulação em Arena.

Para Pegden, Shannon e Sadowski (1995), citados por Chung (2004), simulação é o processo de projetar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com o mesmo, objetivando compreender o comportamento do sistema e avaliar diversas estratégias para operação do sistema.

2.3 Aplicações de simulação nas operações mineiras

A seguir são apresentadas algumas aplicações recentes de otimização e simulação com foco principal para a indústria mineira.

Ceciliano (2007), utilizou a técnica de simulação-otimização dentro da cadeia produtiva de minérios de ferro da companhia Samarco Mineração S/A. O estudo tinha como objetivo principal desenvolver um método de tomada de decisão e aplicar durante o processo de planejamento do negócio num período de 05 anos.

Coelho et al. (2014), aplicaram a simulação e otimização na análise do congestionamento do sistema produtivo de uma mina a céu aberto, localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, com objetivo de comparar os resultados produzidos por cada uma das modelagens e constataram que o modelo de otimização superestima a capacidade produtiva do sistema real por não considerar a formação de filas e a defasagem entre as soluções propostas pelos dois modelos aproximou-se a 10%.

Martins (2013) aplicou o modelo de simulação interagindo com o modelo de otimização para sustentação de tomada de decisão acerca das diversas atividades da mina de Brucutu, a título de exemplo foi: “*definição das frentes utilizadas diariamente para atender a qualidade de minério dentro dos limites impostos pela usina*” e, observou que a medida que os modelos eram atualizados de alguns detalhes operacionais da mina os resultados destes aproximavam-se cada vez mais aos realizados.

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

Marin (2009), utilizou a técnica de simulação para estudar o impacto de variabilidade operacional na execução do planejamento de lavra de uma mina a céu aberto de fosfato do Sudeste de São Paulo, através dos resultados obtidos observou os benefícios práticos da metodologia de simulação proposta, que permite fixar metas de produção mais realísticas para as condições da mina estudada.

ÇETIN (2004), simulou o sistema de carregamento e transporte para minas a céu aberto de médio porte com objetivo principal de enriquecer a análise e comparação de políticas heurísticas de despacho de caminhões assim como estudar uma regra híbrida aplicável para minas a céu aberto. Pelas análises estatísticas feitas aplicando os programas ANOVA e MINITAB concluiu que os coeficientes de determinação para medida de performance da produção dos caminhões, utilização das carregadeiras e caminhões foram de 56.7%, 84.1% e 79.6% respectivamente. Utilizou o método Tukey do teste de comparação das médias para comparar as regras básicas de despacho de caminhões, daí concluiu que os efeitos destas regras no sistema eram insignificantes e constatou que os principais fatores que afetavam a performance eram: a disponibilidade das carregadeiras e caminhões, o número de caminhões, o número de carregadeiras, a distância entre os pontos de carga e de descarga de material. Comparou os resultados da regra híbrida com a regra básica de despacho de

caminhões apenas para utilização de caminhões e observou que o coeficiente de determinação é maior para a regra híbrida mas, quando comparou as regras híbrida e básica de despacho de caminhões para utilização de caminhões e carregadeiras o coeficiente de determinação baixou para a regra híbrida.

Hodkiewicz et al. (2010), aplicaram a simulação com objetivo de refletir como a confiabilidade dos recursos de carregamento, de transporte e de manutenção influenciam nas metas reais de produção das indústrias mineiras. Os resultados mostraram que a definição de prioridades na manutenção e o nível de recursos para a sua manutenção impactava positivamente na produção e na disponibilidade dos equipamentos. Finalmente constataram que à medida em que os recursos para manutenção eram aumentados notava-se uma redução marginal nos benefícios e a estratégia de prioridade tinha pouco impacto.

Guimarães et al. (2007), desenvolveram um modelo de simulação computacional com objetivo de validar resultados obtidos pela aplicação de um modelo de programação matemática para alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto. Através de análise de diversos cenários os resultados comprovaram que a otimização assim como a simulação são ferramentas poderosas para auxiliar a tomada de decisão.

Neto e Pinto (2004), desenvolveram um “*template Mineração 1.0*” para utilizar no programa Arena com objetivo de melhorar a modelagem e a simulação de operações de carregamento e de transporte em minas a céu aberto. O mesmo foi validado a partir de comparações com o SIMIN e simulações de um sistema real, testado com dados reais da mina do Tamanduá da MBR tendo sido obtidos resultados muito próximos da realidade.

Tan et al. (2012), desenvolveram e aplicaram um modelo de otimização-simulação computacional para apoiar na gestão de operações numa mina a céu aberto de cobre. O objetivo foi determinar o número ótimo de caminhões para movimentação das massas planejadas assim como para determinar a capacidade máxima de produção da mina. Desta forma os resultados foram alcançados.

Souza (2009), aplicou a técnica de simulação à eventos discretos para tomada de decisão em uma unidade da Yamana Gold, com enfoque principal à análises de prováveis mudanças estratégicas dentro do sistema produtivo. Para tanto, simulou dois novos cenários onde considerou hipóteses de mudanças estratégicas no sistema e pelos resultados obtidos concluiu no seu estudo que a simulação a eventos discretos é uma ferramenta bastante eficaz para apoiar na tomada de decisões.

Rodrigues (2006), aplicou a simulação para analisar as metodologias de programação linear, programação dinâmica e heurísticas utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto (mina virtual). Os resultados mostraram desempenhos satisfatórios das metodologias utilizadas sob diferentes condições e, estes foram adequados aos experimentos realizados.

Carvalho (2003) aplicou a simulação para análise de desempenho da usina de concentração de minérios de ferro da companhia Samarco Mineração S.A, simulou diversos cenários e os resultados variaram positiva e negativamente conforme foi projetado cada cenário.

Pereira e Meech (2012) aplicaram a simulação numa mina a céu aberto com objetivo de comparar alguns indicadores de desempenho entre sistema de caminhões autônomos e caminhões convencionais, os resultados mostraram um aumento de produção na ordem de 14,4%, queda de consumo de combustível em 12,9%, queda de desgaste dos pneus em 7,2% e, os tempos de ciclos dos caminhões e consumo de combustível aproximaram se aos dados reais.

Pinto (1999) desenvolveu o simulador SIMIN com uso de técnicas de simulação a eventos discretos para análise de cenários de produção em minas a céu aberto. O simulador foi validado após simulação de um problema de carregamento e transporte em mina a céu aberto onde se desejava estudar duas opções de frotas de caminhões de capacidades e quantidades diferentes com objetivo de aumentar a produção e a sua utilização. Os resultados mostraram a seleção de caminhões de capacidade maior como melhor opção pois, ofereciam ganhos tanto na produção assim como na utilização.

3.0 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, é feita uma descrição minuciosa das operações de carregamento e transporte de material da mina em estudo. A mina opera 24 horas por dia com três turnos de trabalho por dia e, cada turno tem duração de oito horas de trabalho.

Trata-se de uma mina a céu aberto cujo método de lavra é por tiras e a movimentação do material é feita com frota de grande porte, isto é, frota homogênea de transporte e frota heterogênea de carregamento. As operações auxiliares são feitas por equipamentos auxiliares também de grande porte que são apresentados resumidamente na tabela 1.

Neste trabalho as operações auxiliares referem-se àquelas que são responsáveis pelas construções e manutenções das infraestruturas da mina para garantir a execução das operações principais. Algumas das operações auxiliares desenvolvidas são: construção e manutenção dos acessos, preparação das praças de trabalho (praças de carregamento, de perfuração, pátio de estocagem de minério, pilhas de estéril, leiras, supressão vegetal, etc.) enquanto que as operações principais referem-se às de desmonte, carregamento e transporte do material para diferentes destinos.

Esta mina opera com base em um plano de lavra mensal, no qual são designadas todas as operações a serem desenvolvidas ao longo do mês, onde são indicadas as frentes de lavra, são definidas as prioridades da movimentação do material, entre outras atividades. No período em estudo, a mina operava com a relação de equipamentos apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos equipamentos utilizados na mina em estudo.

Designação	Tipo ou Modelo	Capacidade	Unidades	Aplicação
Equipamentos de lavra				
Retro-escavadeira hidráulica	Hitachi EX 5500	57 (ton.)	2	Frente de lavra de minério e estéril
Pá elétrica do tipo <i>front-end-loader</i>	Letorneau LT1850	42.6 (ton.)	3	Frentes de lavra de minério e estéril
Caminhões	CAT793D	220 (ton.)	13	Transporte de material
Outros equipamentos				
Britador	Mandíbulas	Alimentador 700 (ton.)	1	Britagem de minério
Silo de rejeito		1500 (ton.)	1	Carregamento de caminhões
Equipamentos auxiliares				
Caminhão pipa	CAT777F	85000 litros	2	Minimização de poeiras na mina incluindo acessos
Tratores de esteiras	CATD11		2	Manuseio de material na Pilha de estéril e acessos
	CATD10		3	Acerto de praças de trabalho, pátio e acessos
Tratores de pneu	CAT854K		1	Acerto de praças de trabalho, pátio e acessos
Perfuratriz	Atlascopco	Pit viper275	2	Perfuração de rochas
Moto niveladoras	CAT16M		3	Nivelamento de acessos e praças de trabalho
Pá elétrica do tipo <i>front-end-loader</i>	LeTorneau 950	24.5 (ton.)	1	Alimentação do britador e construção de leiras

3.1. Desmonte e transporte de material

O material nesta mina é desmontado mecanicamente e por meio de explosivos, dependendo do tipo, espessura e consistência do mesmo.

O estéril é desmontado por meio de explosivos quando é consistente, caso contrário é desmontado mecanicamente por meio de escavadeiras ou tratores de esteiras. O minério pode também ser desmontado mecanicamente por meio de escavadeiras ou tratores de esteiras também, quando acontece da espessura da camada ser relativamente pequena tornando se inviável o desmonte por meio de escavadeira. O desmonte por meio de tratores de esteira é feito com intuito de garantir a seletividade da lavra e aumentar a produtividade dos equipamentos envolvidos nesta operação.

A figura 2 ilustra o desmonte mecânico e carregamento do minério de carvão por meio de uma retro-escavadeira hidráulica.



Figura 2. Desmonte mecânico de minério de carvão.

O trator de esteira é aplicado para desmonte de camadas de carvão menos espessas, cuja espessura média é de aproximadamente 90 cm e em seguida é alocada uma pá carregadeira para carregamento dos caminhões conforme mostra a figura 3.



Figura 3. Desmonte mecânico da camada de carvão com espessura de aproximadamente 90 cm.

Nas frentes de lavra de estéril, o carregamento é feito preferencialmente por meio de carregadeiras elétricas sobre rodas e por vezes escavadeiras hidráulicas quando se trata de material friável (figura 4) e que não necessita de desmonte por meio de explosivos, enquanto que nas frentes de lavra de minério, o carregamento é feito preferencialmente por escavadeiras. As pás elétricas são apenas utilizadas para camadas que são previamente desmontadas mecanicamente por meio de tratores de esteiras conforme ilustra as figura 3.



Figura 4. Desmante mecânico de estéril por meio de uma retro-escavadeira hidráulica.

3.2 Ciclo operacional do sistema de carregamento e transporte de material

A alocação dos caminhões é feita com base em um sistema de despacho automático de caminhões e, é detalhada mais adiante.

Inicialmente os caminhões chegam na mina e por meio do sistema de despacho são alocados às frentes de lavra e priorizando a frente de lavra de minério para garantir a alimentação do britador e a operação contínua da usina de tratamento de minério.

Nas frentes de lavra de minério, o minério é carregado em caminhões, transportado e descarregado no britador caso esteja disponível, caso contrário é depositado numa pilha pulmão devidamente identificada no pátio de estocagem de minério (*ROMPAD*). A retomada de minério desta pilha é feita por uma pá elétrica de pequeno porte LT950 que alimenta diretamente o britador durante o horário de troca de turno. Quando necessário a retomada do

minério é feita por meio de uma pá de grande porte LT1850 associada a caminhões fora-de-estrada.

Dependendo do fator de recuperação do minério na usina de beneficiamento, o rejeito grosseiro é gerado e transportado até ao silo de rejeito grosseiro por meio de correias transportadoras.

Quando a quantidade de rejeito atinge 75% da capacidade de carga do silo, são designados equipamentos de transporte (caminhões fora-de-estrada) para serem carregados de rejeito conforme ilustra a figura 5 e, em seguida transportarem o mesmo até a bacia de rejeito implantada na pilha de estéril. O silo está localizado próximo ao britador o que muitas vezes condiciona os caminhões que descarregam o minério no britador ou na pilha pulmão a passarem pelo silo de rejeito para serem carregados e posteriormente transportarem o rejeito até à bacia.



Figura 5. Caminhão aguardando carregamento no silo de rejeito.

Nas frentes de lavra de estéril, o estéril é carregado em caminhões e, em seguida é transportado para diferentes destinos tais como pilha de estéril, acessos, pátios de estocagem de minério, onde o material é manuseado por meio de tratores de esteiras, a título de exemplo temos as figuras 6 e 7 que ilustram os caminhões transportando material para pilha de estéril e trator de esteira manuseando o referido material.



Figura 6. Caminhões transportando estéril para PDE.



Figura 7. Caminhão depositando estéril na PDE.

No fim de cada atividade, uma nova atividade é designada aos caminhões e desta forma o ciclo das atividades continua conforme ilustra o DCA da figura 8.

3.3 Gestão de atrasos operacionais

A gestão de atrasos operacionais tais como troca de turno, abastecimento dos equipamentos, manutenções, tomada de refeição é apresentada a seguir.

A troca de turno é feita por meio de um veículo responsável pelo revezamento (*Van*), em que este se desloca com os operadores para revezamento do turno anterior. Este veículo desloca se em direção ao encontro dos equipamentos em que se pretende revezar os operadores e para facilitar a localização destes equipamentos é usado o rádio de comunicação de modo a minimizar os tempos improdutivos. A operação não é interrompida na totalidade para efetuar o revezamento, os equipamentos param apenas quando os operadores do novo turno chegam ao ponto de troca.

O abastecimento das máquinas de carregamento é feito nas frentes de lavra ou durante a manutenção corretiva ou preventiva, enquanto que os caminhões são abastecidos na estação de abastecimento e durante a hora de manutenção, hora de detonação, na hora de tomada de refeição quando necessário ou quando se nota falta de operador para revezar no momento da refeição. A manutenção preventiva das máquinas de carregamento sobre rodas assim como a dos caminhões é feita nas oficinas de forma programada e a manutenção das máquinas de carregamento sobre esteiras é feita na mina também de forma programada.

Em cada turno existe um determinado número de operadores que garantem o revezamento durante a operação, isto para permitir que uma parte de operadores possam tomar a refeição sem interromper a operação.

O DCA na figura 8 e o fluxograma na figura 9 descrevem as diferentes atividades desenvolvidas nas operações de carregamento e de transporte, incluindo a manutenção dos equipamentos envolvidos no sistema produtivo da mina em estudo. Estes diagramas foram desenvolvidos com objetivo de tornar mais claro o ciclo operacional de carregamento e de transporte e simultaneamente auxiliar na construção do modelo de simulação computacional.

O Diagrama de Ciclo de Atividade-DCA é uma forma de representação gráfica do sistema a ser estudado e constitui se de um conjunto de elementos interligados. São três elementos básicos: as entidades, as filas e as atividades. Um DCA é composto de um conjunto de subdiagramas que constituem os ciclos de vida de cada entidade. O ciclo de vida de cada entidade é o conjunto de atividades e filas percorridos pela entidade ao longo do sistema e representam respectivamente os estados ativos e passivos das entidades. As entidades constituem se no elemento primário do modelo e representam as classes de entidades físicas

do sistema, tais como caminhões, equipamentos de carregamento, tratores de esteiras, britador, etc. As entidades são representadas através de linhas, as atividades por retângulos e filas por círculos.

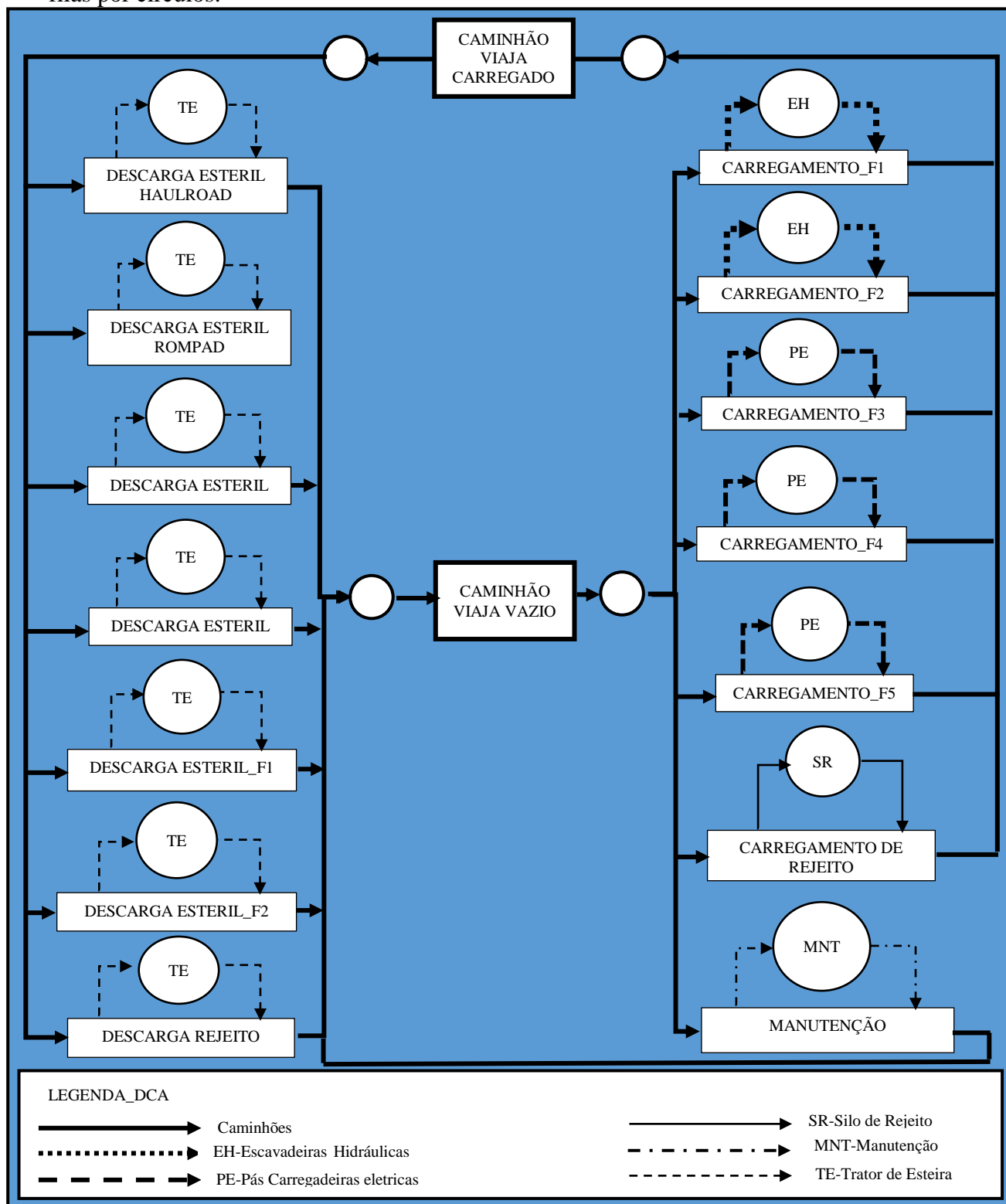


Figura 8. DCA.Ciclo operacional de carregamento e transporte da mina

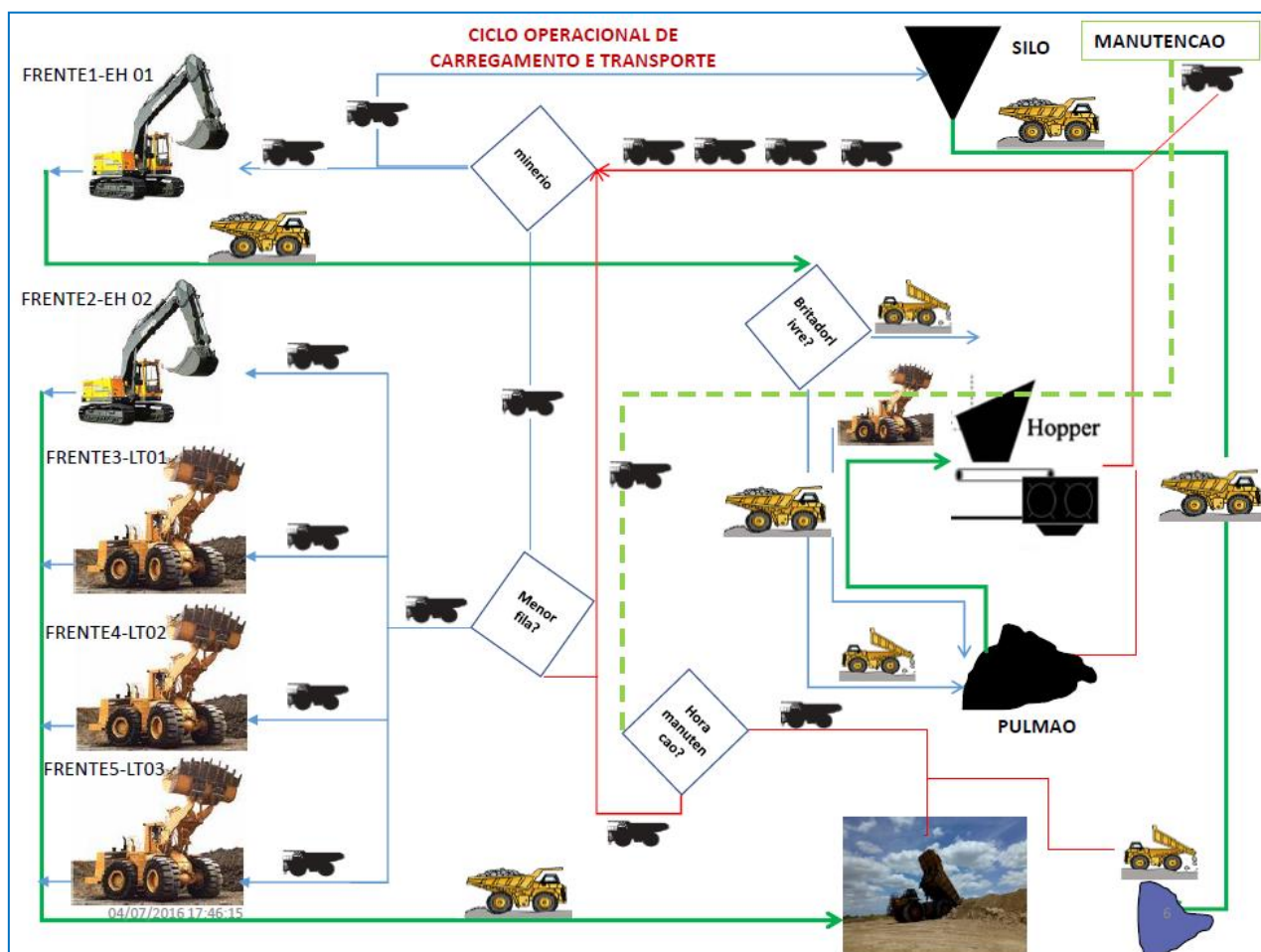


Figura 9. Ciclo operacional de carregamento e transporte da mina em estudo

Contudo, a medida que as atividades acontecem verifica se ociosidade em alguns equipamentos de carregamento assim como de transporte e a inquietação a respeito de baixa produção, baixa utilização e ociosidade dos mesmos persiste.

As figuras 10 e 11 ilustram situações de equipamento de carregamento assim como de transporte ociosos. A figura 10 ilustra uma situação em que se registra a falta de equipamentos de transporte na frente de carregamento e a figura 11 ilustra caminhões em fila na praça de carregamento.



Figura 10. Equipamento de carregamento ocioso, aguardando equipamento de transporte.



Figura 11. Caminhões ociosos aguardando em fila de carregamento.

Desta forma a produtividade e a utilização dos equipamentos diminuem consideravelmente e consequentemente os custos operacionais aumentam e a companhia fica sujeita a penalizações

por não cumprir o contrato com os seus clientes. Neste contexto com vista a evitar essas situações ou diminuir o impacto das mesmas, foi construído um modelo de simulação computacional onde quatro diferentes cenários foram testados. Os detalhes sobre a construção do modelo de simulação se encontra no capítulo 4 e os resultados provenientes da sua utilização são apresentados no capítulo 5. A descrição feita neste capítulo assim como no DCA e fluxograma na figura 9, foram por sua vez traduzidos em linguagem de programação para construção do modelo de simulação computacional cujo fluxograma é apresentado em anexo I.

A seguir, são apresentadas as diversas fases que foram seguidas para a construção e validação do modelo.

4.0 METODOLOGIA

4.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a construção do modelo de simulação computacional do sistema produtivo da mina em estudo, foram executadas as fases apresentadas na figura 12 e as mesmas são detalhadas a seguir.

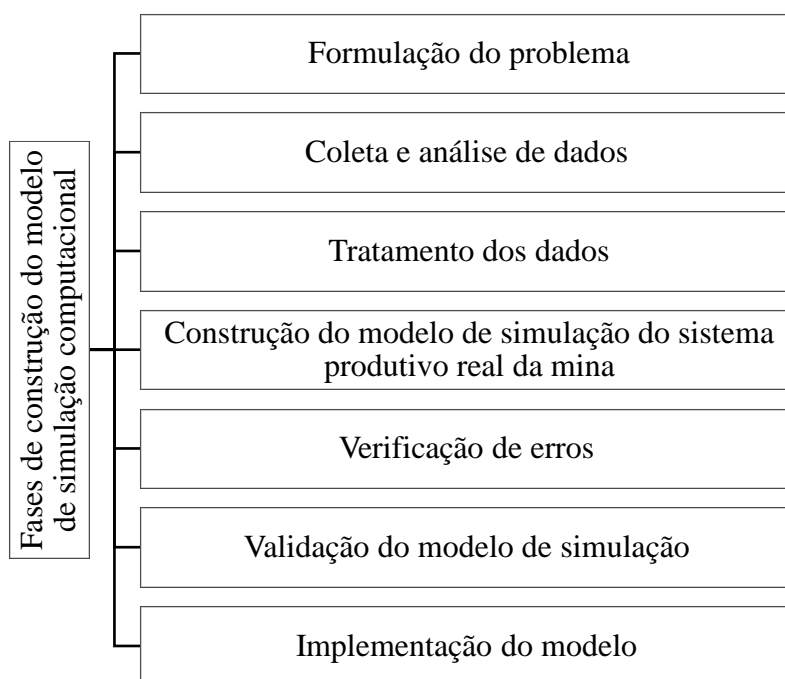


Figura 12. Fases de construção do modelo de simulação do sistema produtivo da mina em estudo

a) Formulação do problema

Para esta etapa, foi feita uma descrição no início do capítulo 3 a respeito do comportamento do ciclo funcional do sistema produtivo e por sua vez sustentado por um DCA e fluxograma na figura 9. Foram identificadas e quantificadas detalhadamente as principais variáveis envolvidas no sistema real, tais como a meta de produção que se pretende atingir, as horas programadas de operação de cada equipamento, distâncias de transporte, velocidades de transporte de caminhões vazios assim como carregados, as restrições técnicas ou seja, as limitações de produção para os equipamentos, apresentadas nas tabelas 9 e 10.

b) Coleta e análise de dados

Os dados referentes aos tempos de ciclos operacionais dos equipamentos de carregamento e de transporte que foram utilizados para entrada no programa, foram colhidos a partir de um banco de dados de produção referente a três meses, fornecido pela companhia, devidamente organizados na planilha Excel, agrupados e filtrados em função da atividade, tipo de equipamento de carregamento, tipo de operação executada, tipo de material a movimentar, etc.

Esses dados foram coletados em campo e registrados manualmente na parte diária (ficha de registro das atividades incluindo a sua duração) pelos operadores dos equipamentos e posteriormente processados na planilha de Excel pelos técnicos do sistema de despacho, uma vez que este sistema encontrava-se na fase inicial da sua implementação na mina.

A técnica utilizada para a coleta e processamento de dados foi manual, o que possibilita erros durante a coleta assim como durante o processamento dos mesmos na planilha de Excel.

Desta forma, estes dados foram tratados de forma a validá-los e aplicá-los no modelo de simulação.

c) Tratamento dos dados

Para efeitos de utilização no modelo, os dados foram agrupados tendo em consideração o tipo de atividade, tipo de equipamento de carregamento, destino do material, tipo de material e massas transportadas em cada viagem, com objetivo de determinar os respetivos tempos de ciclos. Após esta etapa os dados foram analisados com objetivo de verificar a consistência dos mesmos, ou seja, verificar se existem células vazias (espaços em branco), dados duplicados, ou mesmo discrepantes que podem ter resultado de erro de coleta ou de processamento. Foi utilizado o gráfico de caixas (*Box plot*) do MINITAB 14.7, versão para estudante com intuito de verificar a existência de dados discrepantes.

Em seguida, os dados foram introduzidos no analisador de dados (*input analyzer*), ferramenta do ARENA, com objetivo de analisar o comportamento dos dados, ou seja, verificar se um dado conjunto de dados segue uma dada distribuição teórica de probabilidade.

Na tabela 2, são apresentadas as distribuições de probabilidades seguidas pelas seguintes variáveis: tempos de ciclos de carregamento de cada tipo de máquina de carregamento, ciclo de transporte dos caminhões, massas de cada tipo de material e tempos de ciclos de descarga em diversos pontos de descargas. Por razões de simplificação, adotaram-se as mesmas distribuições de probabilidades para equipamentos idênticos de carregamento. Como exemplo temos o tempo de carregamento do estéril por uma escavadeira hidráulica que segue uma distribuição de WEIBUL com a seguinte expressão: $2+WEIB(7.72, 2.97)$.

Tabela 2. Distribuição de dados de entrada no modelo de simulação

Distribuição de Tempos de carregamento	Tempo de ciclo de carregamento			
	Recursos	Minério de carvão	Estéril	Rejeito
	EH_01	$5 + 7 * \text{BETA}(1.03, 2.15)$	$2 + \text{WEIB}(7.72, 2.97)$	
	EH_02	$5 + 7 * \text{BETA}(1.03, 2.15)$	$2 + \text{WEIB}(7.72, 2.97)$	
	PE_01		$\text{TRIA}(2, 6.46, 16)$	
	PE_02		$\text{TRIA}(2, 6.46, 16)$	
	PE_03		$\text{TRIA}(2, 6.46, 16)$	
	SILO_Rejeito			$2.72 + 2.71 * \text{BETA}(2.14, 1.97)$
Distribuição de Tempos de descarregamento	Tempo de ciclo de descarga			
	Britador		Empirical	
	Pulmão		$0.21 + \text{LOGN}(0.895, 0.691)$	
	PDE		$1 + \text{LOGN}(3.14, 5.99)$	
	HaulRoad		$1 + \text{LOGN}(3.14, 5.99)$	
	Rompad		$1 + \text{LOGN}(3.14, 5.99)$	
	Bacia de rejeito		$0.21 + \text{LOGN}(0.895, 0.691)$	
Distribuição das massas	Distribuição de Massas			
		Minério de carvão	Estéril	Rejeito
	EH_01	$\text{NORM}(187, 26.4)$	$153 + 107 * \text{BETA}(2.82, 1.7)$	
	EH_02	$\text{NORM}(187, 26.4)$	$153 + 107 * \text{BETA}(2.82, 1.7)$	
	PE_01	$\text{NORM}(166, 23.4)$	$\text{NORM}(226, 17.1)$	
	PE_02	$\text{NORM}(166, 23.4)$	$\text{NORM}(226, 17.1)$	
	SILO_Rejeito			$110 + 118 * \text{BETA}(1.35, 1.08)$
Distribuição de ciclos de transporte	Ponto de carga e descarga		Tempos de ciclos de transporte	
		Ponto de carga	Deslocamento carregado	Deslocamento vazio
	EH_01	Minerio_britador	$4.44 + \text{ERLA}(0.329, 5)$	$3.68 + \text{GAMM}(0.15, 8.22)$
	EH_02	Minerio_britador	$4.44 + \text{ERLA}(0.329, 5)$	$3.68 + \text{GAMM}(0.15, 8.22)$
	PE_01	Esteril_PDE	$9 + \text{ERLA}(0.722, 5)$	$8 + 6 * \text{BETA}(3.83, 6.93)$
	PE_02	Esteril_Haulroad	$3.22 + \text{GAMM}(0.217, 8.09)$	$3.36 + \text{GAMM}(0.162, 10.2)$
	SILO_Rejeito	Silo_bacia de rejeito	$10 + \text{ERLA}(0.683, 7)$	$9 + 7.78 * \text{BETA}(4.91, 8.37)$

d) Construção do modelo de simulação do sistema produtivo real da Mina

O modelo de simulação do sistema produtivo da mina foi construído baseando-se na descrição apresentada no capítulo de estudo de caso e simultaneamente sustentada pelo DCA. No programa de simulação utilizado para desenvolver o modelo, os caminhões são considerados

entidades enquanto que os elementos tais como carregadeiras, britadores, tratores de esteira e silo de rejeito são recursos.

Pode se considerar que o modelo é constituído de nove partes nomeadamente: leitura de dados em uma planilha de Excel, entrada de entidades no sistema, despacho de caminhões para frentes de carregamento, carregamento dos caminhões nas frentes de lavra e no silo de rejeito, deslocamento de caminhões carregados, deposição de material nos respectivos destinos, deslocamento vazio para nova frente de carregamento e exportação de informações e resultados para a planilha de excel.

Entrada de dados para o modelo via Excel

Foram criadas duas planilhas de Excel: as tabelas 3 e 4. Na planilha referente a entrada dados de para os equipamentos de carregamento isto é, a tabela 3, foram criadas 5 seções uma para cada equipamento de carregamento. Cada seção contém 10 frentes de lavra onde o equipamento de carga pode trabalhar.

Tabela 3. Entrada de dados para o modelo de simulação (equipamentos de carregamento)

EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO										
EC	FL	EM	MP	TM	DEST_MIN	DEST_EST	HPO	DM	DMT	TCC
EH5500-01	F1	LC456	65790	2	1	0	484	10	3.5	
	F2	LCUB	0	0	0	0				
	F3	LCUT	14562	2	1	0				
	F4	MC	0	0	0	0				
	F5	UCB	34654	2	1	0				5+7*BETA(1.03,2.15)
	F6	UCT	23455	2	0	0				
	F7	ESTERIL	139650	1	0	101				
	F8		469891	1	0	102				
	F9		65790	1	0	100				
	F10			2	2	102				

EH5500-02	F1	LC456	0	0	0	0	484	4		
	F2	ESTERIL	14869	1	0	101				
	F3	ESTERIL	48654	1	0	100				
	F4	MC	53823	2	2	0				
	F5	UCB	0	0	0	0				5+7*BETA(1.03,2.15)
	F6	UCT	0	0	0	0				
	F7	ESTERIL	620571	1	0	0				
	F8		0	1	0	0				
	F9	MC	0	2	1	0				
	F10			1	0	102				

LT1850-01	F1	ESTERIL	734900	1	0	102	498	5		
	F2		0	1	0	101				
	F3		0	1	0	101				
	F4		0	1	0	101				
	F5		0	1	0	101				
	F6		0	1	0	101				
	F7		0	1	0	101				TRIA(2.0, 6.4, 6.16)
	F8		0	1	0	101				
	F9		0	1	0	101				
	F10	ESTERIL	0	1	0	101				

LT1850-02	F1	ESTERIL	350520	0	0	0	498	5		
	F2		0	0	0	0				
	F3		0	0	0	0				
	F4		0	0	0	0				
	F5		0	0	0	0				
	F6		0	0	0	0				
	F7		0	2	2	0				TRIA(2.0, 6.4, 6.16)
	F8		0	0	0	0				
	F9		0	0	0	0				
	F10	ESTERIL	0	1	0	102				

LT1850-03	F1	ESTERIL	494371	0	0	0	498	5		
	F2		0	0	0	0				
	F3		0	0	0	0				
	F4		0	0	0	0				
	F5		0	0	0	0				
	F6		0	0	0	0				
	F7	ESTERIL	0	0	0	0				TRIA(2.0, 6.4, 6.16)
	F8		0	0	0	0				
	F9		0	1	0	102				
	F10	ESTERIL	0	1	0	102				

SILO	F11	Rejeito								$2.72 + 2.71 * \text{BETA}(2.14, 1.97)$
------	-----	---------	--	--	--	--	--	--	--	---

Tabela 4. Entrada de dados para o modelo de simulação (equipamentos de transporte)

EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE								
CM's	NCPO	DCPM	HPO	HM	DM_CM	VTC	VTV	
CM1001	1	1	5	5.01	NORM(10, 0.2)	17	21	
CM1002	1	1	10	10.01		17	21	
CM1003	1	1	15	15.01		17	21	
CM1004	1	1	20	20.01		17	21	
CM1005	1	1	25	25.01		17	21	
CM1006	1	1	30	30.01		17	21	
CM1007	1	1	35	35.01		17	21	
CM1008	1	1	40	40.01		17	21	
CM1009	1	1	45	45.01		17	21	
CM1010	1	1	50	50.01		17	21	
CM1011	1	1	55	55.01		17	21	
CM1012	1	1	60	60.01		17	21	
CM1013	1	1	65	65.01		17	21	
NTCPPO	13							

Um exemplo de uma seção de um equipamento pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 Seção de um equipamento de carregamento

EQUIPAMENTOS DE CARREGAMENTO

EC	FL	EM	MP	TM	DEST_MIN	DEST_EST	HPO	DM	DMT	TCC
EH5500-01	F1	LC456	3400	2	2	0	484	NORM(10.0,0.7),		5+7*BETA(1.03,2.15)
	F2	LCUB	76580	2	1	0			1.7	
	F3	LCUT	15000	2	1	0				
	F4	MC	25550	2	1	0				
	F5	UCB	15000	2	1	0				
	F6	UCT	5000	2	2	0				
	F7	ESTERIL	150000	1	0	100				
	F8	ESTERIL	35000	1	0	101				
	F9	ESTERIL	65000	1	0	102				
	F10	ESTERIL		1	0	100				

Se para uma dada seção, na coluna MP de massas planejadas para as diferentes frentes só tiver valores iguais a zero (0), isto significará que o equipamento de carregamento da referida seção não será utilizado, ou seja, o sistema irá trabalhar com um número menor de equipamento de carregamento.

A seção mostrada na tabela 5 se refere à escavadeira hidráulica EH5500_01 que irá trabalhar em 10 frentes (de F1 a F10). Para cada uma destas frentes são colocadas na coluna EM, o código do tipo de material, a massa planejada para ser lavrada na coluna MP, o código que indica se é minério ou estéril na coluna TM, o código de destino de material (indicando o ponto de descarga) nas colunas (DEST_MIN e DEST_EST) e a expressão que representa a variação do tempo de ciclo de carregamento na coluna TCC. Opcionalmente pode se registrar também a DMT na respectiva coluna. Além das informações referentes a cada frente, são informadas também o número de horas programadas para operação da máquina de carregamento (HPO) e a expressão que representa a variação do tempo de manutenção do equipamento de carregamento. Se o tipo de material a ser movimentado numa dada frente é estéril, a coluna DEST_MIN deverá conter o valor 0 e, se o tipo de material é minério a coluna DEST_EST deverá conter o valor 0.

Por exemplo, para a frente 2 (F2) da seção 1 o equipamento de carregamento (EC) é EH5500_01, o tipo de material a ser lavrado é minério cuja especificação é LCUB, a massa planejada é 76.580 toneladas, o código que indica o tipo de material se é esteril ou minério (TM) é 2, o código que indica o destino de minério (DEST_MIN) é 1, o código que indica o destino do estéril (DEST_EST) é 0, o número de horas programadas para operação (HPO) é 484, e a duração da manutenção da máquina é dada pela expressão NORM(10.0,0.7), a distância média de transporte entre os pontos de carregamento e de descarga é de 1,7 km e, o tempo de ciclo de carregamento (TCC) segue uma distribuição teórica de probabilidade cuja expressão é $5+7*BETA(1.03,2.15)$.

Nesta planilha foram introduzidas as seguintes variáveis: massas planejadas em toneladas para cada tipo de material em cada frente (MP), o código (TM) que define o tipo de material se é estéril(1) ou minério(2), os códigos que definem o destino do minério de cada frente de lavra (DEST_MIN), códigos que definem o destino do estéril (DEST_EST), número de horas programadas para operação das máquinas de carregamento antes de entrar em manutenção preventiva (HPO), número de horas programadas para a manutenção das máquinas de carregamento(DM), tempo de ciclo de carregamento (TCC), distâncias médias de transporte entre os pontos de carregamento e de descarga (DMT). A DMT é determinada pela distância entre o centro da massa do material a ser lavrado de cada frente até o ponto de descarga.

As prioridades para a movimentação de materiais são definidas pela sequência da disposição das células contando-as de cima para baixo e variando de 1 a 10 para cada seção, considerando que cada célula corresponde a uma frente de lavra. A tabela 3 apresenta os códigos referentes aos destinos dos materiais que devem ser introduzidos nas colunas DEST_MIN e DEST_EST. Por esta tabela nota se que o minério só pode ser destinado para o britador ou pilha pulmão e, o estéril pode ser destinado para PDE, *Haulroad* e *Rompad*.

Tabela 6 Códigos de destino dos materiais

Tipo de material	Frente	Destino	Código
Minério	F1 a F10	Britador	1
Minério	F1 a F10	Pilha pulmão	2
Estéril	F1 a F10	Haul road	100
Estéril	F1 a F10	Rompad	101
Estéril	F1 a F10	PDE	102

Se o equipamento de uma dada seção conseguir lavrar a massa total planejada antes do tempo previsto para a simulação terminar, pode se com intuito de se avaliar a capacidade produtiva do sistema, definir uma nova frente e um novo ponto de descarga para o equipamento trabalhar até o final da simulação. Isto é feito na linha correspondente a frente de lavra número 10 (F10) respeitando as instruções já mencionadas. As demais colunas são preenchidas como já mencionado anteriormente, sendo que a célula da massa planejada da F10 deverá ficar em branco no início da simulação, pois, somente no término da simulação é que vai se saber o quanto a mais foi produzido pelo equipamento.

Para a planilha de entrada de dados referente aos equipamentos de transporte, a tabela 4, foram introduzidos as seguintes variáveis: número de caminhões programados para operação (NCPO), designação de caminhões programados para manutenção (DCPM), número de horas programadas para operação dos caminhões antes da manutenção preventiva (HPO), velocidades de transporte de caminhões carregados e vazios (VTC e VTV) respectivamente. Na coluna CM's, são apresentados os códigos dos caminhões que estão organizados crescentemente variando de CM1001 (caminhão 01) até CM1013 (caminhão 13). Na coluna NCPO é introduzido o valor 1 (um) em cada uma das células, caso um dos 13 caminhões sejam designados para operação, no caso contrário é introduzido valor 0 (zero). No final desta coluna, na linha designada "TOTAL" aparecerá o número total dos caminhões programados para a operação. Na coluna DCPM, deve se proceder com a indicação de caminhões destinados a manutenção preventiva através de valores 0 (zero) ou 1 (um), sendo que 0 (zero) indica a indisponibilidade do caminhão para a manutenção preventiva e 1 (um) indica a disponibilidade do caminhão para a manutenção preventiva. O número de horas programadas para operação de cada caminhão é introduzido na coluna HPO. O caminhão segue para a manutenção logo que se atinge o valor HPO e o número de horas programadas para a manutenção preventiva é introduzido na coluna DM. As velocidades em km/h dos caminhões carregados e vazios são introduzidas nas células das colunas VTC e VTV.

Para todos os processos que seguem uma dada distribuição de probabilidade, as expressões correspondentes são introduzidos em diversos módulos tais como *process*, *leave* e *assign* no modelo de simulação. A título de exemplo temos: distribuições dos tempos de ciclos de carregamentos, distribuição da carga de caminhão transportando minério, estéril e rejeito, distribuições da duração das atividades de manutenções dos equipamentos de carregamento e

de transporte, distribuição da duração de deslocamentos dos caminhões carregados e vazios, distribuição do tempo de carregamento, descarga dos caminhões nos diversos pontos de carga e descarga.

Após concluída a introdução de dados de entrada na planilha de excel, este ficheiro deverá ser fechado para proceder se com a iniciação do programa de simulação. Através do modulo *readwrite* o programa lê os dados na planilha de Excel e executa.

A seguir é feita a descrição do comportamento do modelo desde a iniciação até ao seu término.

Criação de entidades

No início da simulação, no tempo igual a 0.0 é criada uma entidade fictícia chamada “LEITORA” que é responsável pela leitura dos dados da planilha do excel através de vários módulos *ReadWrite*.

Da mesma forma, no final da simulação foi criada outra entidade fictícia chamada “SAÍDA” para enviar alguns resultados para a planilha do excel através de módulos *ReadWrite*.

Através do módulo *Create* “CHEGADA_MINA” são introduzidas no modelo as entidades CAMINHÕES. O número de caminhões é fornecido a partir da planilha do excel. Cada caminhão recebe após a sua entrada um atributo “HORA MANUTENÇÃO” que corresponde ao número de horas de operação que falta para entrar em manutenção. Após o estabelecimento deste atributo os caminhões vão para um módulo *ENTER* chamado de MINA. Após este módulo é verificado se está no momento do caminhão ir para manutenção.

Despacho de caminhões

A frente na qual o caminhão vai ser carregado após a realização de uma descarga, quer seja minério ou estéril, é definida através de um despacho automático de caminhões realizado por um módulo *PickStation* “DESPACHO_CAMINHÕES”. Antes do caminhão entrar no módulo

de despacho é verificado se chegou o momento dele entrar em manutenção. Neste caso é realizada a manutenção e após a mesma, o caminhão retorna ao módulo de despacho.

A alocação é feita baseando se no menor valor de uma expressão calculada para cada frente e que leva em conta o número de caminhões em fila, o número de caminhões em rota e se o equipamento de carga está em manutenção. A expressão para cada frente é a seguinte: $NQ(\text{CARREGAMENTO FRENTE } i.\text{Queue}) + NE(\text{FRENTE } i) - 100 * \text{FAILED_RES}$.

Onde:

$NQ(\text{CARREGAMENTO FRENTE } i.\text{Queue})$ representa o número de entidades em fila de carregamento numa frente i ;

$NE(\text{FRENTE } i)$ representa o número de caminhões em rota numa frente i ;

FAILED_RES . é uma variável interna do programa que indica que o equipamento está em manutenção e é igual a -4.

Sendo satisfeita a condição da expressão já mencionada, as entidades seguem às carregadeiras disponíveis para se iniciar com o carregamento das mesmas.

Carregamento de caminhões

Após a definição do ponto de carregamento dos caminhões, fornecido pela operação de despacho, os caminhões se dirigem aos respectivos pontos de carga.

Os caminhões são carregados de diversos materiais tais como minério, estéril e rejeito. O estéril assim como o minério é carregado nas frentes de lavra por meio de escavadeiras hidráulicas e pás elétricas e o rejeito é carregado em caminhões através do silo de rejeito.

Chegando aos postos de carregamento os caminhões entram em várias filas onde aguardam até o instante do carregamento. O caminhão só é carregado se o equipamento de carregamento se encontrar ocioso. Se durante o tempo de espera na fila, o equipamento de carregamento entrar em manutenção, os caminhões que estavam na fila são enviados ao módulo de despacho para receberem um novo destino de carregamento. Isto é obtido através de uma combinação de um módulo *Hold* e um módulo *decide* que verifica se o estado do equipamento de carregamento é ocioso (“*IDLE*”) ou falhado (“*FAILED*”), no caso de estar em manutenção.

Após o carregamento, o caminhão libera a máquina de carregamento para uma nova entidade em fila ser carregado. Caso se registre a exaustão de massas planejadas numa determinada frente de lavra o equipamento de carregamento muda para uma nova frente para operação respeitando as prioridades de lavra. A mudança de frente de lavra acontece sempre que a quantidade de massas planejadas para movimentação é alcançada. As massas planejadas e movimentadas são atualizadas sempre após cada carregamento.

A expressão que traduz a quantidade das massas planejadas movimentadas em cada frente é: $QUANTIDADE_MATERIAL_Si_Fi + CARGAi$.

Onde:

$QUANTIDADE_MATERIAL_Si_Fi$ é a massa movimentada acumulada até antes da realização de um novo carregamento;

Si representa uma dada seção i onde pode operar uma máquina de carregamento;

Fi representa uma dada frente i de lavra e;

$CARGAi$ representa uma dada carga que segue uma determinada distribuição teórica, podendo ser estéril, minério ou rejeito.

Essas distribuições teóricas utilizadas no modelo estão apresentadas na tabela 2.

O carregamento de rejeito é feito através do Silo de rejeito e sempre quando a quantidade de rejeito atinge 67% da capacidade de carga do silo (1500 toneladas).

Quando este nível é atingido, assim que um caminhão acabar de descarregar no britador ou na pilha pulmão, ele é despachado para o silo para ser carregado de rejeito e em seguida realizar o transporte até a bacia de rejeito.

A condição que direciona o caminhão para silo do rejeito é dada pela expressão $ESTOQUE_REJEITO \geq 1000$. A quantidade de rejeito no silo é variável e é determinada pela expressão seguinte:

$ESTOQUE_REJEITO = QUANTIDADE_REJEITO - QUANTIDADE_REJEITO_TRANSPORTADO$, expressão que permite a diminuição da carga no silo. A geração do rejeito é dada pela expressão: $QUANTIDADE_REJEITO = QUANTIDADE_MINERIO_BRITADOR * 0.534$, onde 0.534 é o fator de geração de rejeito e, a $QUANTIDADE_REJEITO_TRANSPORTADO = QUANTIDADE_REJEITO_TRANSPORTADO + CARGA_REJEITO$.

Terminado o processo de carregamento, segue o transporte do material que é detalhado a seguir.

Transporte de material

O transporte de material é feito por entidades ou caminhões que se deslocam dentro do sistema através do módulo *leave* no qual é definido o destino ou a estação de atendimento assim como o tempo de viagem das entidades carregadas. Estas estações se referem aos vários locais de descarga de material. Temos, portanto, as estações: BRITADOR, PULMÃO, HAULROAD, ROMPAD, FRENTE1_PDE, FRENTE2_PDE, CONTRAPILHAMENTO_PDE e BACIA DE REJEITO.

O material após ser carregado em caminhões é transportado para diversos destinos segundo os códigos apresentados na tabela 3. Se for minério, ele é transportado para o britador caso esteja disponível, caso contrário é direcionado para a pilha pulmão e, a partir desta é feita a alimentação do britador como referido no capítulo de estudo de caso.

Deposição do material

O material é depositado nos pontos de descargas que estiverem disponíveis, caso contrário, os caminhões aguardam em fila de descarga. O tempo de descarga de um determinado tipo de material segue uma dada distribuição teórica cuja expressão é apresentada na tabela 2. Todos os recursos tem a capacidade de atendimento de um caminhão por vez. A PDE tem dois pontos de descarga em que cada um contém trator de esteiras para manuseio do material. O módulo *pickstation* “DESCARGA” é responsável pela seleção do ponto de descarga, cujo critério se baseia no menor número de entidades em fila. Existe um outro ponto de descarga denominado CONTRAPILHAMENTO, que foi criado com intuito de reduzir as filas em pontos de descarga e conseqüentemente aumentar a produção. Neste ponto, os caminhões são desviados condicionalmente, isto acontece, no caso em que os pontos de descarga que contém tratores de esteira se encontram indisponíveis.

Deslocamento vazio

Após a descarga os caminhões deslocam se vazios através de vários módulos *leave's* que permitem a saída dos caminhões dos diferentes pontos de descargas. Nestes módulos são definidos o tempo de viagem das entidades vazias e o destino ou a estação de atendimento, o módulo *Enter MINA*. Logo, segue para o módulo *decide* HORA MANUTENCAO_CM para verificar o momento de entrada do caminhão na manutenção preventiva. Caso não se verifique, o caminhão segue para o módulo *PickStation* “DESPACHO_CAMINHÕES” para a sua realocação conforme detalhado no subcapítulo de despacho de caminhões. Este processo de carregamento-transporte e descarga é cíclico até o término da simulação.

Manutenção preventiva

Para a manutenção de caminhões, foram designados atributos e respectivos valores com uma duração aleatória. Chegada a hora da manutenção (HM) o caminhão é desviado para a estação MANUTENÇÃO e ocupa a equipe de manutenção com uma duração segundo uma distribuição teórica NORM(5,0.13). O módulo responsável pelo desvio de caminhões para manutenção é o *decide* e a expressão é: $HORAMANUTENCAO_CAMINHAO \geq TNOW$ caso não se verifique esta condição os caminhões continuam operando normalmente. Após a manutenção o novo valor de atributo passa a ser $TNOW + HM_{j-1}$.

O caminhão apenas se dirige à estação de manutenção logo após a descarga do material, caso esteja carregado.

Concluída a manutenção do caminhão, a equipe de manutenção é liberada e o caminhão retorna ao sistema produtivo, após ser realocado pelo sistema de despacho.

Quando se atinge o momento de parada da máquina de carregamento para manutenção enquanto ela carrega um caminhão, ela finaliza o carregamento e entra em manutenção.

Terminada a manutenção, ela retorna para operação.

Exportação de informações e resultados para a planilha de Excel

Chegado ao final da simulação é exportada para a planilha de Excel a informação referente a produção de cada frente assim como a produção total do sistema. Isto é feito através de uma entidade fictícia “SAÍDA” e com os módulos *ReadWrite* como já mencionado.

A produção de cada frente é dada pela acumulação de número de carregamentos de caminhões efetuados numa dada frente. A produção total de cada seção é dada pela expressão:

$ProduçãoSecãoi = \sum_{i=1}^{10} ProduçãoFrentei$, enquanto que a produção total do sistema é dada

por:

$$ProduçãoTotalSistema = \sum_{i=1}^5 ProduçãoSecãoi .$$

A produção de cada ponto de descarga é registrada logo após quando o caminhão descarregar o material no devido destino. Para informações referentes à utilização dos recursos, tempos em que as entidades permaneceram em filas entre outras, o programa de simulação gera automaticamente um relatório específico.

e) Verificação de erros

Após a construção do modelo, o mesmo foi colocado em operação. Após a identificação e correção de erros de programação, passou-se à fase de validação do mesmo.

f) Validação do modelo de simulação

O modelo de simulação do sistema “real” da mina foi validado baseando-se na comparação dos resultados da simulação e histórico de produção da mina referente aos meses de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012.

A tabela 7, apresenta o resumo do histórico de produção trimestral da mina, dados que serviram de base de comparação para validação do modelo de simulação.

Tabela 7. Resumo de produção trimestral da mina: dezembro/janeiro/fevereiro.

	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
Estéril	3.017.215	3.371.853	4.173.567
Rejeito grosso	367.000	359.000	332.000
OM	135.960	139.650	162.630
Lc456	0	83.470	36.493
Lcub	67.245	148.902	71.946
Lcut	34.430	108.928	60.731
Mc	150.082	297.290	168.315
Ucb	565.535	128.076	277.336
Uct	194.533	17.831	137.983
Movimentação total	4.532.000	4.655.000	5.421.001
Alimentação	686.000	675.500	624.000
Lavra total de carvão	1.011.825	784.497	752.804

Fonte: relatório do quarto trimestre de 2011/2012

Onde: UCT=Upper Chipanga Top; UCB=Upper Chipanga Base; MC=Medium Chipanga; LCUT=Lower Chipanga Upper Top; LCUB=Lower Chipanga Upper Base; LC456=Lower Chipanga 456 e OM= Outras Movimentações .

Para efeitos de validação do modelo de simulação, foram comparados três cenários de movimentação de massas na mina, referentes aos meses de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012.

Foram executadas 100 replicações para cada cenário, num período de 612, 576 e 624 horas para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro respectivamente.

Os resultados da simulação são apresentados nas figuras 13, 14 e 15 e as estatísticas são resumidas nas tabelas 8, 9 e 10.

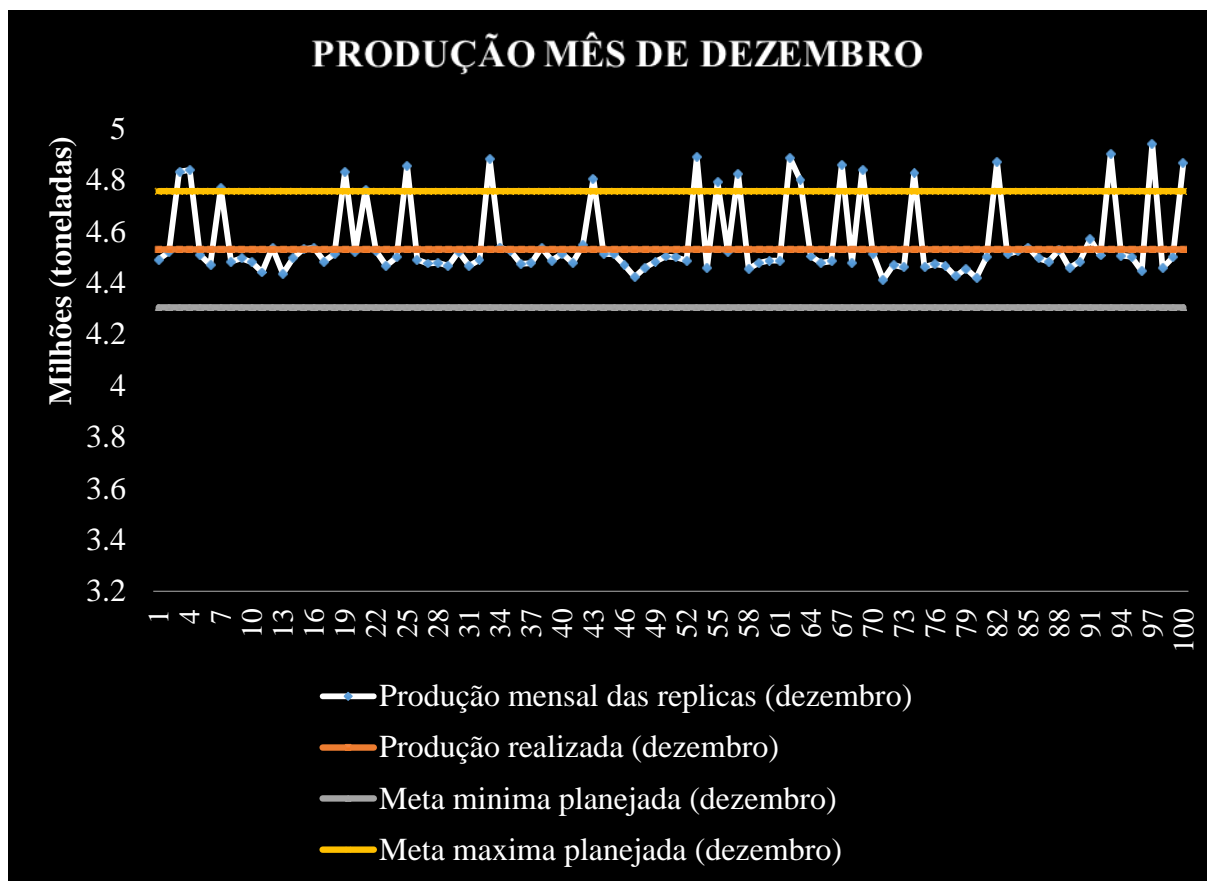


Figura 13. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de dezembro

Tabela 8. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de dezembro

MÉDIA DA PRODUÇÃO SIMULADA	4561627,4
PRODUÇÃO MÍNIMA SIMULADA	4412760
PRODUÇÃO MÁXIMA SIMULADA	4942740
ERRO	0,654%

O erro encontrado entre a média da produção simulada e a produção realizada foi calculada com base na seguinte equação:

$$Erro = \frac{Media\ da\ produção\ simulada - Produção\ Realizada}{Produção\ realizada} * 100\% \quad (1)$$

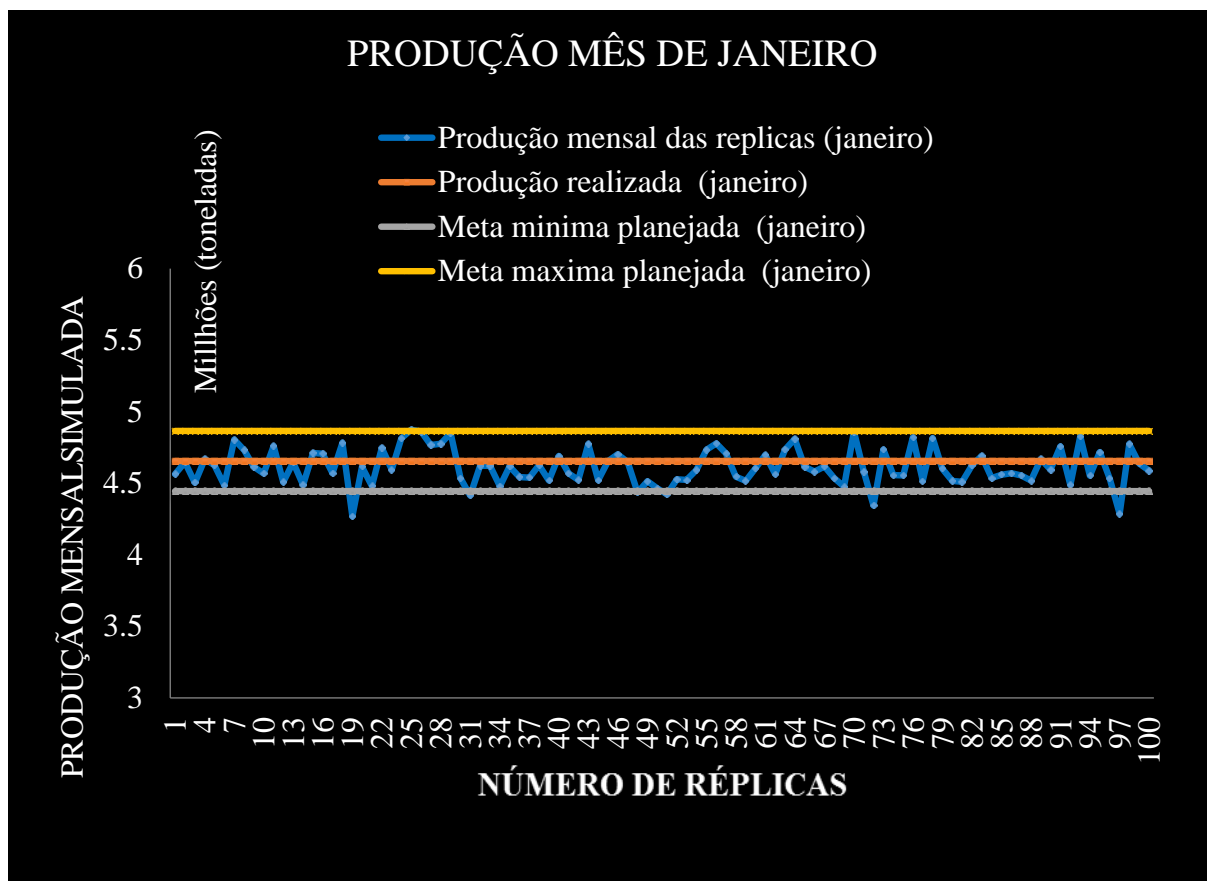


Figura 14. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de janeiro

Tabela 9. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de janeiro

MÉDIA DA PRODUÇÃO SIMULADA	4615092,364
PRODUÇÃO MÍNIMA SIMULADA	4268301,558
PRODUÇÃO MÁXIMA SIMULADA	4874270,694
ERRO	0,857%



Figura 15. Comparativo de movimentação total simulada VS movimentação total realizada referente ao mês de fevereiro

Tabela 10. Estatísticas das réplicas referentes ao mês de fevereiro

MÉDIA DA PRODUÇÃO SIMULADA	5438787
PRODUÇÃO MÍNIMA SIMULADA	5151634
PRODUÇÃO MÁXIMA SIMULADA	5859545
ERRO	0,328%

Nota-se que para o mês de dezembro cerca de 80% dos resultados da produção simulada está dentro do limite da produção planejada, com um erro de 0,654% comparativamente a produção realizada. Para o mês de janeiro 91% dos resultados da produção simulada está dentro do limite da produção planejada e, com um erro de 0,857% em relação a produção realizada. Finalmente para o mês de fevereiro, 84% dos resultados da produção simulada encontra-se dentro do limite de produção planejada, e o erro é de 0,328% comparado a produção realizada. Por estes resultados nota-se que a diferença entre as produções comparadas é bem pequena e o modelo pode ser validado pois reproduziu bem os dados registrados. Estando o modelo validado, ele pode ser utilizado para se testar cenários alternativos.

g) Implementação do modelo

A implementação do modelo consistiu na simulação de quatro cenários de movimentação de massas da mina em estudo. Os detalhes e resultados dos referidos cenários são apresentados ao longo do capítulo 5.

5.0 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é feita uma análise de movimentação de massas nos cenários 1 e 2, referentes ao plano de lavra do mês de abril. A seguir são apresentados dois novos cenários alternativos para o cumprimento do mesmo plano da mina em estudo, nomeadamente os cenários 3 e 4. Os resultados da simulação destes quatro cenários são apresentados nas figuras 17 a 20.

Nestes cenários, a simulação tem duração de 498 horas com exceção do cenário 2 que tem apenas 440 horas. Após concluída a movimentação das massas planejadas nos cenários com duração de 498 horas e, a duração da simulação não ter sido ainda atingida, através das diversas frentes de lavras “F10”, o material é movimentado para as PDE’s assim como pode ser movimentado para qualquer outro destino.

De acordo com os objetivos traçados, foram selecionados os quatro seguintes cenários para análise, mas, podem também ser testados diversos outros cenários para serem analisados.

5.1 CENÁRIOS 1 e 2- Análise de movimentação de massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões e dois pontos de descarga na PDE, um ponto na *Haulroad* (acessos) e um ponto no *Rompad* (pátio de estocagem de minério)

O cenário (1) consistiu na movimentação de massas conforme é mencionado no subcapítulo 5.1, cada ponto contendo um trator de esteira para manuseio dos materiais.

O intuito deste cenário foi analisar o nível de exequibilidade do plano de movimentação das massas. Por outro lado, objetivou-se identificar gargalos nos pontos de carregamento e de descarga e analisar os resultados das produções, utilização de equipamentos de carregamento, tempos de espera dos caminhões em filas de carregamento e de descarga assim como estimar a capacidade produtiva do sistema.

Para analisar a referida exequibilidade foram consideradas as principais variáveis do plano, respeitando as restrições que são apresentadas nas tabelas 11 e 12, ou seja, estas tabelas se referem à programação de lavras de equipamentos de carregamento e de transporte respectivamente, para o período de abril de 2012.

Para tanto, foram executadas 100 réplicas do cenário 1 com duração de 498 horas, período máximo que todas as máquinas de carregamento pudessem trabalhar.

Para o cenário 2 adotou-se o mesmo procedimento do cenário 1, mas para um período de 440 horas. Foram comparados os resultados dos cenários e observou-se que o plano podia ser cumprido na sua íntegra com o cenário 2, ou seja, em um menor tempo.

Para determinação de número mínimo de réplicas necessárias para representar o sistema foi utilizado o método de estabilização das médias acumuladas. A figura 16, mostra o percentual das diferenças das médias acumuladas. Por tanto, a figura 16 mostra que o número mínimo de réplicas necessárias é aproximadamente 28, o ponto onde o gráfico se aproxima e se mantém próximo de zero.

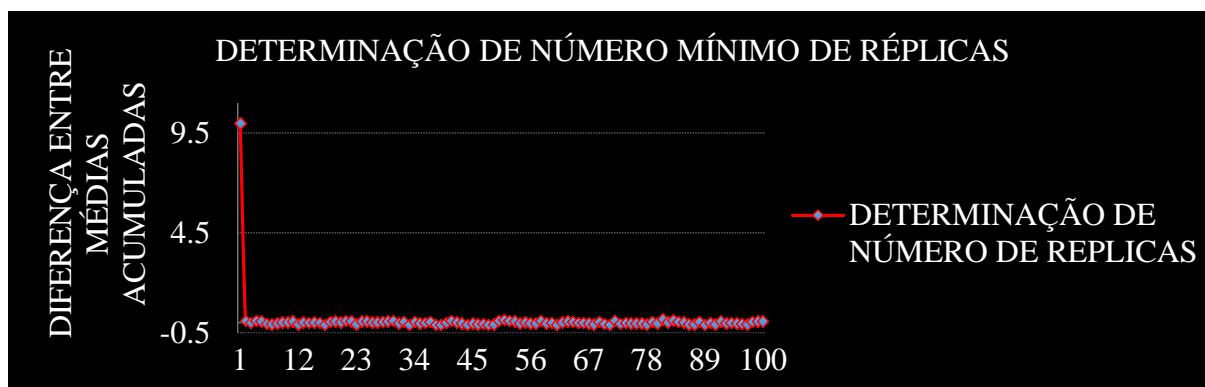


Figura 16. Determinação de número mínimo de réplicas

5.2 CENÁRIO 3- Análise de movimentação de massas com cinco máquinas de carregamento, treze caminhões e três pontos de descarga na PDE, um ponto na *Haulroad* (acessos) e um ponto no *Rompad* (pátio de estocagem de minério)

Este cenário consistiu na criação de mais um ponto de descarga “refúgio”, no qual a deposição de material é feita por contrapilhamento, totalizando desta forma três pontos de descargas. Esta técnica de deposição permite que a descarga seja feita numa área em que o manuseio do material depositado é feito posteriormente. Esta opção foi utilizada devido às restrições da disponibilidade de tratores de esteira para manuseio do material.

Para este ponto, os caminhões são desviados condicionalmente, isto acontece, no caso em que os pontos de descarga que contém tratores de esteira se encontram indisponíveis.

O intuito deste cenário foi para incrementar a produção, a utilização dos equipamentos de carregamento e reduzir o tempo de espera em filas de carregamento e de descarga.

5.3 CENÁRIO 4- Análise de movimentação de massas com quatro máquinas de carregamento, treze caminhões e três pontos de descarga na PDE, um ponto na *Haulroad* (acessos) e um ponto no *Rompad* (pátio de estocagem de minério)

Para o cenário 4, em que serão utilizadas somente quatro equipamentos de carregamento, as massas planejadas para serem lavradas por um equipamento foram redistribuídas entre os outros quatro equipamentos.

Este cenário, foi criado na expectativa de reduzir os custos operacionais e atender as metas planejadas. Para tanto, a movimentação de material foi feita com base em quatro máquinas de carregamento e treze caminhões durante 498 horas programadas. Este cenário visa também comparar a utilização simulada com a utilização programada de cada um dos equipamentos de carregamento e finalmente demonstrar a capacidade produtiva do sistema.

A seguir são apresentadas as tabelas 11 e 12 anteriormente mencionadas.

Tabela 11. Programação de equipamentos de carregamento

Dimensionamento de equipamentos de Carga									
abril									
EQUIPAMENTOS	Unidades	Distribuição de horas				Índices			Produção esperada (ton.)
		Horas de calendário	Horas trabalhadas	Horas de manutenção	Horas improdutivas	Disponibilidade Física	Utilização Física	Produtividade (t/h)	
HITACHI	1	744	484	89	170	88%	74%	1600	774400
HITACHI	1	744	484	89	170	88%	74%	1600	774400
LT 1850	1	744	498	89	157	88%	76%	1300	647400
LT 1850	1	744	498	89	157	88%	76%	1300	647400
LT 1850	1	744	498	89	157	88%	76%	1300	647400
Total	5								3,491,000.00

Fonte: adaptada de plano de lavra de mês de abril de 2011

Tabela 12. Programação de equipamentos de transporte

Dimensionamento de equipamentos de Transporte								
abril								
Caminhões	DF (%)	UT (%)	HT	Vel. (km/h)	DMT	Produtividade (ton/h)	Carga útil	Ton/Mês
CM-1001	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1002	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1003	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1004	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1005	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1006	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1007	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1008	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1009	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1010	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1011	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1013	87.00%	84.00%	544	19	2.9	511	220	278,010.00
CM-1014	87.00%	84.00%	298	19	2.9	511	220	152,292.24
TOTAL								3,488,412.24

Fonte: adaptada de plano de lavra de mês de abril de 2011

A entrada de dados para o modelo de simulação é feita nas planilhas do Excel anteriormente apresentadas, as tabelas 3 e 4 referentes aos equipamentos de carregamento e de transporte, respectivamente.

Após terem sido introduzidos os dados nas tabelas 3 e 4, procedeu-se com a corrida do modelo para os quatro cenários. Os resultados dos cenários, tais como produções, utilização das carregadeiras, os tempos médios de espera em filas de carregamento e de descarga são apresentados nas figuras 17 a 20.

A figura 17 e a tabela 13 apresentam os resultados das produções (minério e estéril) para cada réplica simulada juntamente com a produção planejada, metas mínima e máxima para o período simulado, referentes aos cenários 1, 2, 3 e 4.

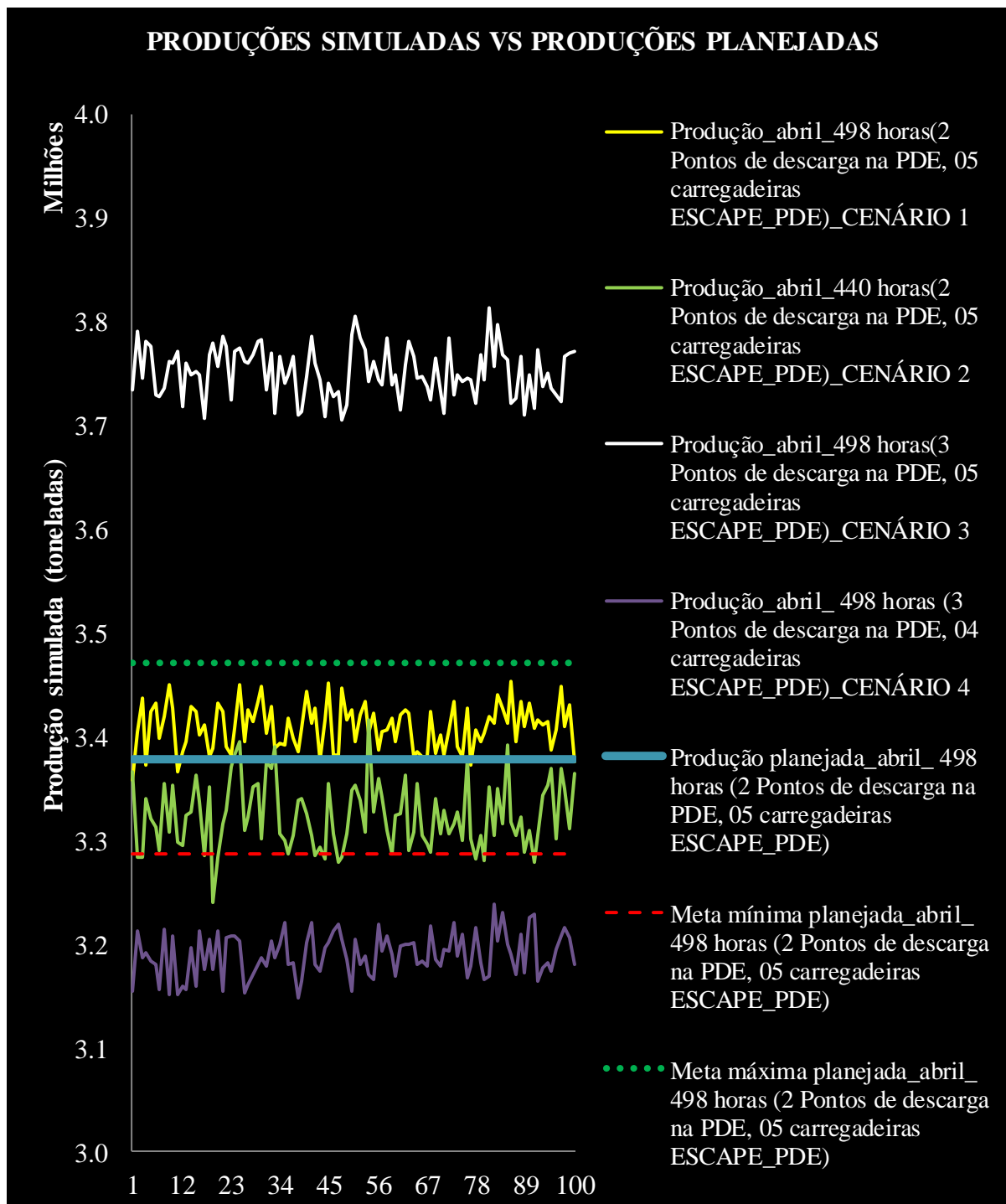


Figura 17. Comparativo de movimentação de massas mensais simuladas vs massas planejadas

Tabela 13. Comparação das produções dos cenários com produção planejada

CENÁRIO	Produção (toneladas)	Desvio em relação ao planejado (%)
1	3409626.59	1%
2	3324115.54	-1.6%
3	3751967.86	11.1%
4	3189459.03	-5.6%
PLANEJADO	3377916	
Meta máxima planejada	3471365	
Meta mínima planejada	3286983	

A tabela 13 apresenta as médias das produções de todas simulações dos quatro cenários juntamente com a produção planejada, para fins de comparação.

São apresentados também em porcentagem os desvios (erros) em relação ao planejado através da equação 1, anteriormente mencionada.

A figura 18 apresenta as taxas de utilização dos equipamentos de carregamento para os cenários 1, 2, 3 e 4 incluído a utilização programada

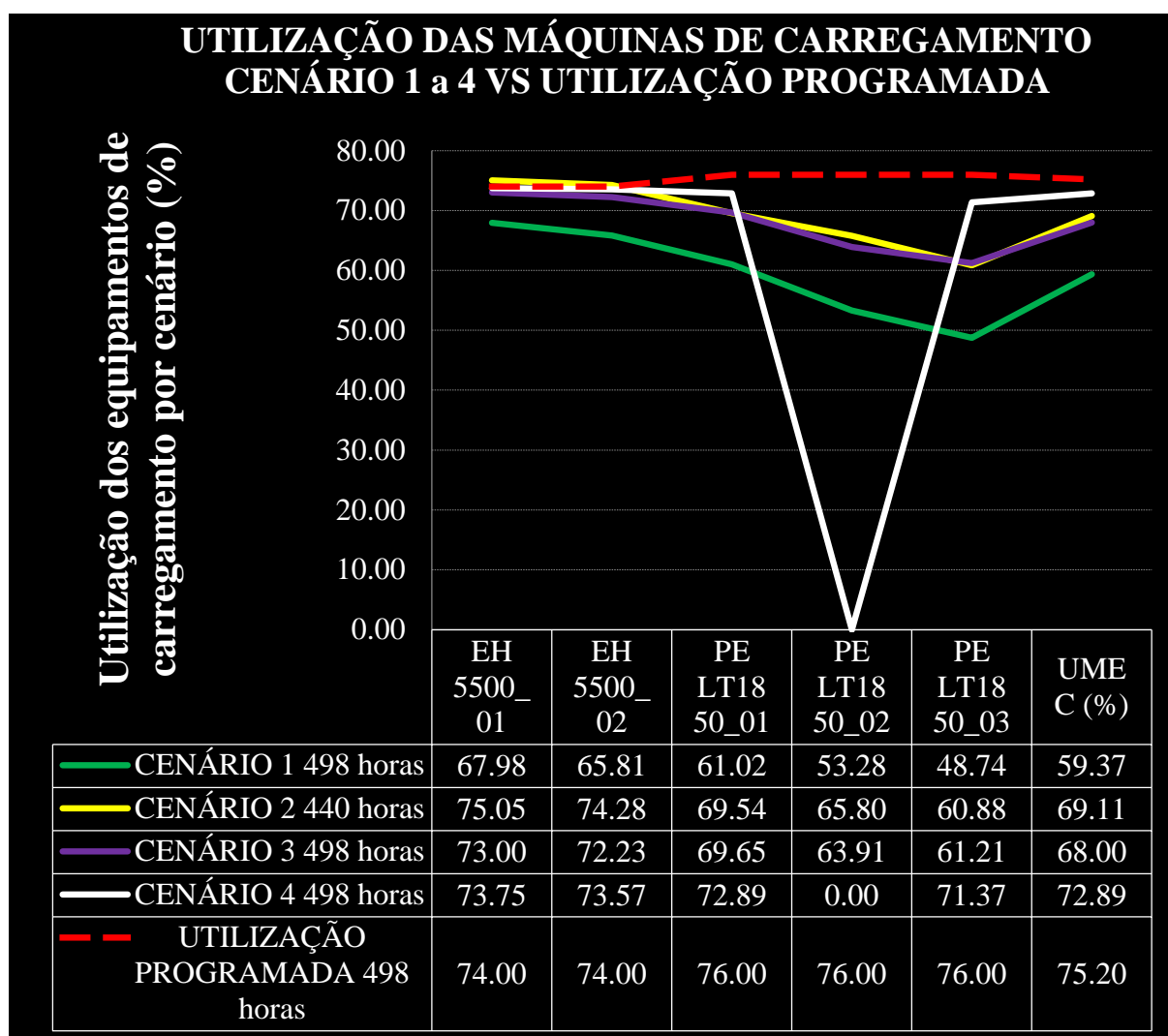


Figura 18. Comparativo de utilização de equipamentos de carregamento

A figura 19 apresenta os tempos médios de espera em filas de carregamentos dos 4 cenários.

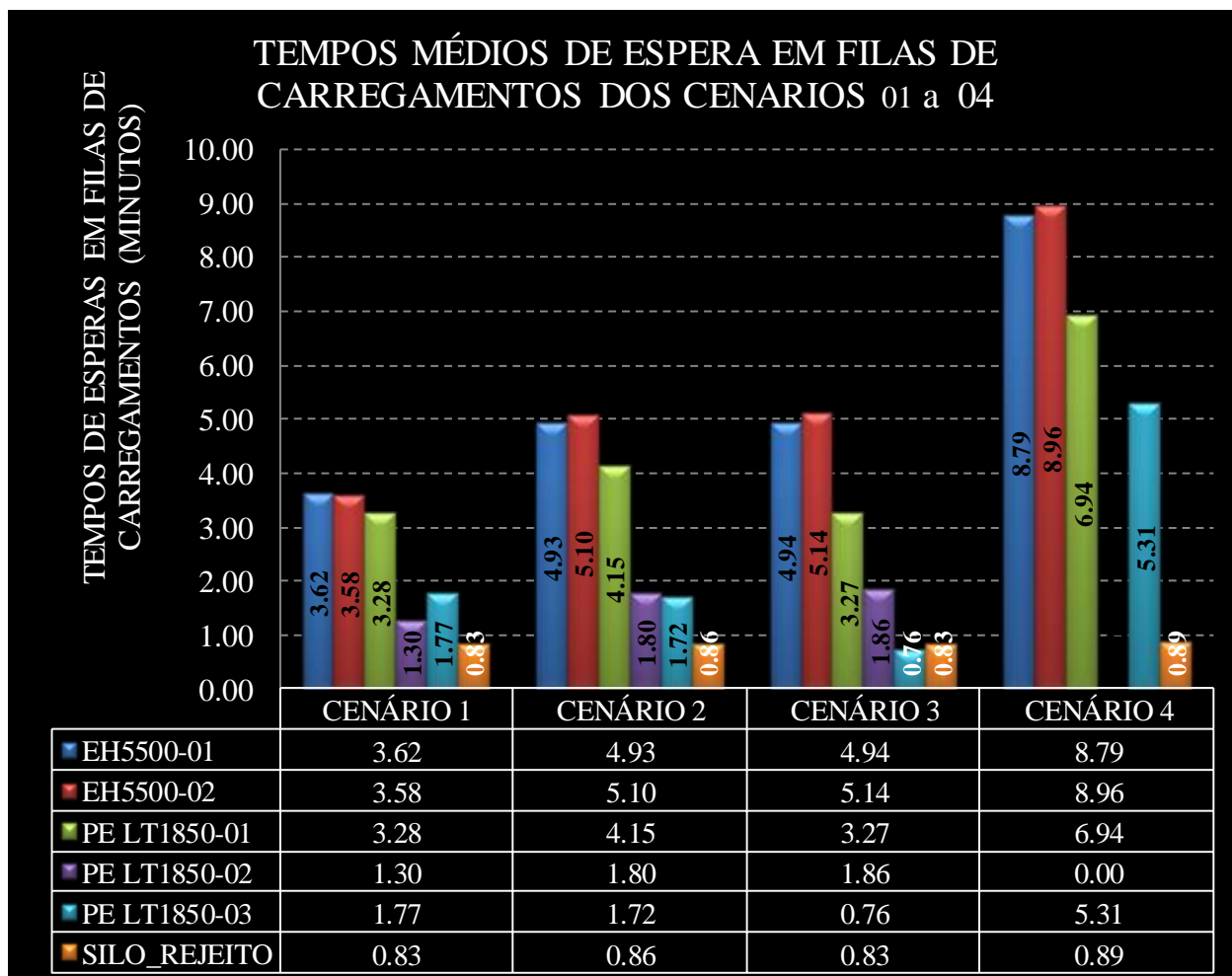


Figura 19. Tempos médios de espera em filas de carregamentos

A figura 20 apresenta os tempos médios de espera em filas de descargas dos 4 cenários.

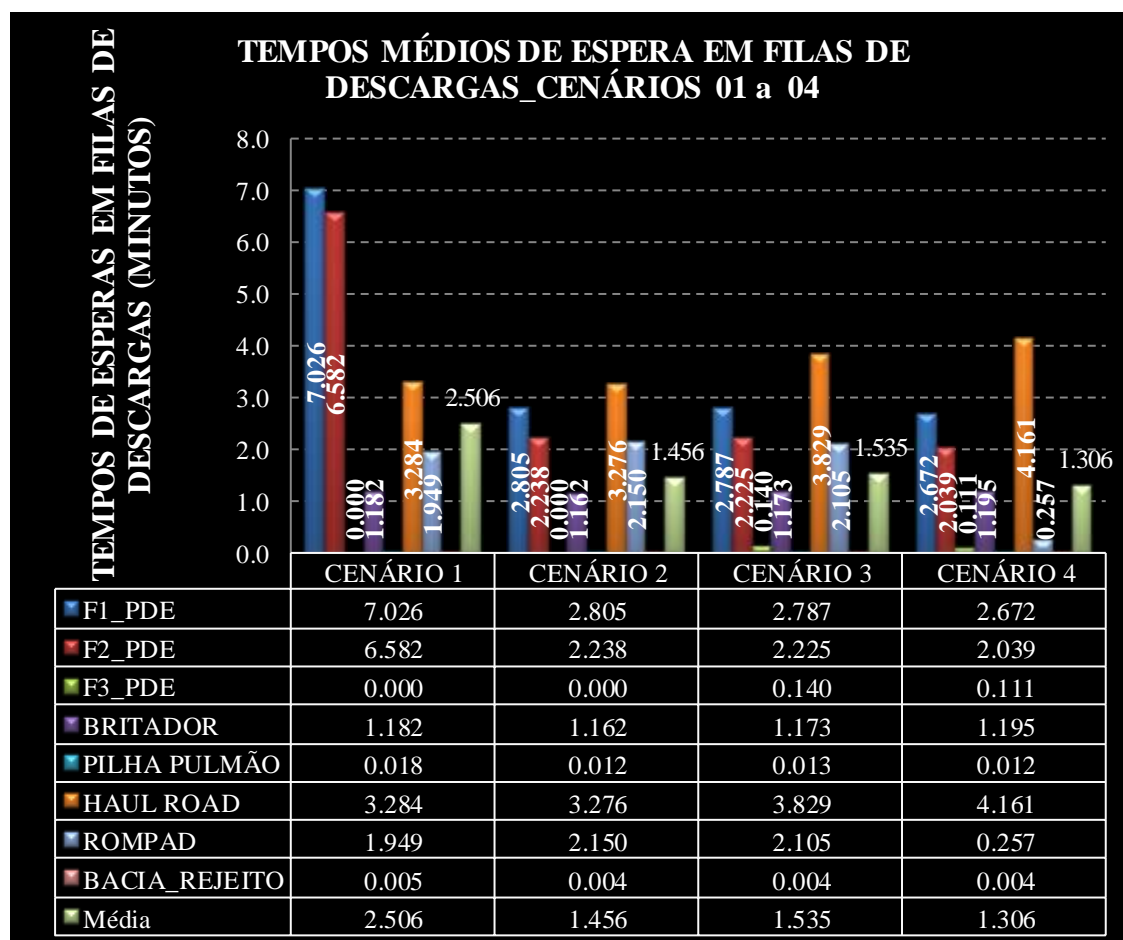


Figura 20. Tempos médios de espera em filas de descarga

Pela tabela 13, observa-se que o cenário 3 conduz à maior produção, cerca de 11,10% acima do planejado, seguido de cenário 1 com 1,00%.

Os cenários 2 e 4 apresentam desvios em relação ao planejado de -1,60% e -5,60% respectivamente. No caso do cenário 2 pode se considerar que este desvio é pequeno estando dentro da faixa da meta mínima e máxima. O cenário 2 foi rodado com um tempo de 440 horas. Se aumentássemos um pouco mais o tempo de simulação, certamente chegaríamos ao planejado com um tempo menor do que as 498 horas utilizadas nos demais cenários.

A partir das figuras 17 a 20 pode-se afirmar ainda o seguinte:

De forma geral, para os quatro cenários não houve uma variação significativa nos tempos médios de espera em filas para o britador, pilha pulmão e nem para a bacia de rejeito, ou seja, estes pontos de descarga não representam pontos de gargalos para o sistema, já que os seus valores são baixos.

A produção do cenário 1 foi com base em cinco máquinas de carregamento, treze caminhões, dois pontos de descarga na PDE (F1_PDE e F2_PDE), um ponto de descarga na *haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad* (pátio de estocagem de minério). Este cenário atingiu a produção planejada com um aumento de 1,00%, como já mencionado. Contudo, de acordo com os resultados apresentados na figura 20, o tempo médio de espera em filas de descargas na PDE foram maiores comparativamente aos demais cenários nos pontos F1_PDE e F2_PDE, isto devido ao número reduzido de pontos de descargas. Para este mesmo cenário, os tempos médios de espera em filas de carregamentos são relativamente menores nas frentes onde operaram as máquinas EH5500_01, EH5500_02, PE LT1850_01, PE LT1850_02 e no Silo de rejeito quando comparados aos restantes cenários. Os tempos médios de espera em filas de carregamento foram relativamente menores pois, parte considerável de caminhões aguardavam em filas de descargas. Isto, resultou em formação de filas nos referidos pontos e consequentemente registrou-se ociosidade dos equipamentos de carregamento, razão pela qual a utilização destes equipamentos neste cenário é baixa em relação aos demais, conforme é apresentada na figura 18.

No britador não houve formação de fila considerável por dois motivos:

1. Caso o britador estivesse indisponível o caminhão era desviado para descarregar o minério na pilha pulmão;
2. A quantidade de minério programada para ser movimentada era menor comparativamente ao estéril e, apenas duas escavadeiras foram programadas para movimentar o minério para posteriormente movimentar o estéril.

Na *Haulroad* e *Rompad* podemos considerar que os tempos médios de espera em filas de descarga são significantes e, isto deveu-se ao facto de existir apenas um ponto de descarga para cada destino. Neste caso os caminhões não tinham opção para efetuar a descarga e, deviam aguardar em fila até o caminhão em atendimento liberar o recurso.

A produção do cenário 2 consistiu na utilização de cinco máquinas de carregamento, treze caminhões, dois pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad*. Este cenário, atingiu aproximadamente a produção planejada com uma duração de operação de 440 horas, período em que todas as massas planejadas foram cumpridas. Os tempos médios de espera em filas de carregamentos neste cenário foram maiores em relação aos do cenário 01 nas frentes onde operaram as máquinas EH5500_01, EH5500_02, PE LT1850_01, PE LT1850_02 e no Silo de rejeito. Quando comparados os

tempos do cenário 2 com o 3 nota-se que o cenário 3 teve maiores tempos de espera nas frentes onde operaram as máquinas EH5500_01, EH5500_02 e PE LT1850_02. Os tempos médios de espera em filas de descargas neste cenário são menores em relação aos do cenário 1 com exceção do tempo referente a descarga no *Rompad*. Esta diferença de tempos de espera em filas de carregamento assim como de descargas deveu-se a variação do tempo de simulação, ou seja, durante as 440 horas não se observou congestionamento significativo nos pontos de descargas do cenário 2, comparativamente ao cenário 1. Estes resultados conduziram ao cumprimento das metas planejadas assim como à elevação da utilização das máquinas de carregamento em relação aos cenários 1 e 3.

O cenário 3 apresenta maior produção diferentemente dos outros cenários pois, este cenário operou com 5 máquinas de carregamento, treze caminhões, três pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad*. Neste cenário os tempos médios de espera em filas de carregamentos são menores em relação aos tempos médios de espera em filas do cenário 4 com exceção dos tempos referentes à filas onde operou a PE LT1850_02. Nos pontos F1_PDE, F2_PDE, F3_PDE e *Rompad* do cenário 03, os tempos médios de espera em filas de descargas são relativamente maiores quando comparados aos do cenário 4 e relativamente menores em relação aos cenários 1 e 2 (conforme mostram as figuras 19 e 20). Estes resultados permitiram o aumento da produção em relação aos demais cenários e, a utilização das máquinas de carregamento aumentou consideravelmente em relação ao cenário 1 e aproximou-se muito à utilização do cenário 2 (conforme mostram as figuras 17 e 18). Por outro lado pode-se afirmar que não observou-se uma maior escassez de caminhões nas frentes de carregamento e nem nos pontos de descarga mas sim, observou-se uma boa sincronização dos equipamentos de carregamento e de transporte. Este aumento deveu-se a adoção do terceiro ponto de descarga para contrapilhamento, para onde os caminhões são desviados para efetuar as descargas quando os outros pontos encontram-se indisponíveis, o que não acontece para os cenários 1 e 2.

No cenário 4, não houve cumprimento de metas devido ao reduzido número de equipamentos de carregamento comparativamente ao cenário 3. Este cenário operou com quatro máquinas de carregamento, treze caminhões, três pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad*. Contudo, não se registrou uma maior ociosidade nos equipamentos de carregamento e isto, resultou em

aumento de utilização dos equipamentos de carregamento, que se aproximou à utilização programada. O tempo médio de espera em filas de descargas foi menor comparativamente aos demais cenários com exceção do tempo referente à descarga na *Haulroad*, enquanto que o tempo médio de espera em filas de carregamento foi maior em relação aos demais cenários e, nestas condições observou-se a formação de filas. A formação de filas nas frentes de carregamento foi devido ao menor número de equipamentos de carregamento, o que resultou na baixa produção deste cenário pois, os caminhões permaneceram muito tempo em fila e não se observou uma significativa formação de filas nos pontos de descargas.

6.0 CONCLUSÕES

A simulação mostrou ser uma ferramenta bastante flexível e poderosa para ser usada em análises de sistemas produtivos complexos tal como os de mineração. Com o modelo validado, diversos cenários podem ser testados em curto espaço de tempo permitindo aos tomadores de decisão selecionar a melhor estratégia para operação.

A simulação é uma ferramenta que permite modelar e responder questões de sistemas produtivos do passado assim como do futuro. Através dele pode se identificar fatores que poderiam ter contribuído, por exemplo, para o não cumprimento das metas e, pela flexibilidade que oferece, pode-se corrigir tais fatores com vista a melhorar sistemas futuros.

Com este modelo, podem ser testados diversos outros cenários com diferentes objetivos e selecionar o melhor para operação.

Pelos resultados apresentados nas figuras 17 a 20 observa-se que o cenário 3 é o mais atrativo. Este cenário, operando com apenas cinco máquinas de carregamento, treze caminhões, três pontos de descarga na PDE, um ponto de descarga na *haulroad* e um ponto de descarga no *Rompad* notou-se um aumento considerável da produção em 11,10% comparada à produção planejada e a utilização das máquinas de carregamento aumentou significativamente.

Pode-se concluir também que o maior gargalo do sistema é devido ao reduzido número de pontos de descarga nas PDE's.

O não alcance das metas de utilizações programadas dos equipamentos de carregamento é devido ao seu sobredimensionamento, isto pode ser sustentado pelos resultados das utilizações das carregadeiras do cenário 4 comparados aos demais cenários.

A simulação demonstrou que o sistema projetado tem uma capacidade produtiva acima do planejado, ou seja, a simulação do cenário 2 evidenciou que com a mesma quantidade de recursos determinados para operação e respeitando todas as restrições impostas na programação dos equipamentos de lavra, este sistema alcança a produção desejada em menos tempo (aproximadamente 440 horas).

7.0 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

Tomando em consideração os resultados obtidos a partir do modelo de simulação e a flexibilidade que este apresenta, seguem as recomendações para a companhia:

- Implementar a técnica de simulação à eventos discretos para planejamento de lavra, pois facilita a análise do sistema produtivo de forma integrada;
- Passar a utilizar esta ferramenta para estudar o sistema produtivo da mina com vista a atender as metas planejadas, identificar gargalos, simular novos cenários e sobre eles tomar decisões seguras sem interferir no sistema real de produção;
- Implementar a técnica de contrapilhamento na PDE servindo para basculamento de material na condição em que os tratores de esteiras se encontram indisponíveis ou ocupados.

Para trabalhos futuros sugere-se que se façam estudos, simulando cenários de movimentação de massas em que, por exemplo, aumenta-se o número de caminhões, introduz-se novos pontos de descargas condicionais para deposição de estéril, tal como mencionado nos cenários 3 e 4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de “**Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões, 4 Ed.**”, Rio de Janeiro: LTC, 2009. 202p. https://pt.wikipedia.org/wiki/Categoria:Pesquisa_operacional. Acessado aos 16/03/2016, 02:47 PM, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de “**Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisão**”, 1998, reimpressão da 2ª edição 2000, p-11.

BANKS, J. Handbook of Simulation: **Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. Edited by J. Banks. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, John Wiley & Sons, Inc. New York. Chochester. Weinheim. Brisbane. Singapore. Toronto. Copyright © 1998

CARVALHO, Duílio Donizete Teixeira de. **Metodologia de Análise do Desempenho da Usina de Concentração da Samarco Mineração S.A. Baseada em Simulação das Operações**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG. 2003

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

CHUNG, Christopher A. **Simulation Modeling Handbook. A practical Approach**. CRC Press Boca Raton London New York Washington, DC. 2004

ÇETIN, Necmettin. “**Open-Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation**” *A Thesis submitted to the graduate school of Natural and applied sciences of middle east technical university*. 2004.

COELHO, Guilherme Freitas. Oliveira, Bárbara Regina Pinto e. Pinto, Luiz Ricardo. Martins, Aldrin Gustavo. **Análise do congestionamento do sistema produtivo de uma mina a céu aberto: comparativo entre soluções propostas por modelos de otimização e simulação.** Simpósio brasileiro de pesquisa operacional. Salvador/BA. Setembro, 2014

GUIMARÃES, Irce Fernandes F. Souza, Marcone Jamilson Freitas e Pantuza Júnior, Guido. **Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto.** XIV Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Novembro, 2007

HILLIER, Frederick S. & Lieberman, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional.** 8ª Edição, ISBN 85-86804-68-1, tradução Ariovaldo Griesi. Editora Ada Santos Seles, 2006.

HODKIEWICZ, Melinda. Richardson, Steven and Durham, Richard. ***Challenges and Opportunities for Simulation Modelling Integrating Mine Haulage and Truck Shop Operations.*** *Australian Mining Technology Conference. September.2010.*

KELTON, W. David. Sadowski Randall P., Sadowsk Deborah A. ***Simultion with Arena, Second edition,*** Editor McGraw Hill. Boston Burr, IL Dubuque, IA Madison, WI New York, San Francisco St. Louis....2004

MARIN, Tatiane. **Impacto da Variabilidade Operacional na Execução do Plano de Lavra.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009

MARTINS, Aldrin Gustavo. **Simulação de operações de lavra da mina de Brucutu utilizando um modelo de programação linear para alocar os equipamentos de carga.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. MG. 2013

OLALEYE, B. M and Adagbonyin, P. E. ***Simulation of Loading and Haulage of Fragmented Rock in a Typical Granite Quarry in Ondo State, Nigeria.*** Journal of Emerging

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

PINTO, Luiz Ricardo. **Metodologia de Análise do Planejamento de Lavra de Minas a Céu Aberto Baseada em Simulação das Operações de Lavra**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. 1999

PINTO, Luiz Ricardo. **Curso de Pesquisa Operacional Aplicada à Mineração (Programação matemática, teoria das filas e simulação)**. Apostila PO. DEMIN / EM/ UFOP 2002

PRADO, Darci Santos do. **Usando Arena em Simulação. Série Pesquisa Operacional**. Volume 3. Editora DG-Desenvolvimento Gerencial. Belo Horizonte-Minas Gerais. Brasil. 1999

RAMOS Neto, A. N. e Pinto, Luiz Ricardo. Revista Escola de Minas. **Template do Programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto**. Ouro Preto; v.57-n.1-p.1-72-jan.mar.2004

PEREIRA, Juliana, John Meech. **Simulation of an Open Pit Mine to Study Autonomous Haulage Trucks**. Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T2Z4. 2012

RODRIGUES, Lásara Fabrícia. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte_MG.2006

SANTOS, Ricardo. **Pesquisa Operacional, Introdução, Histórico e Conceitos Básicos**. www.facom.ufms.br/~ricardo/Courses/OP-2008/Lectures/Lec01.pdf

SILVA, Valdir C., **Carregamento e Transporte de Rochas**. Apostila. DEMIN/UFOP. Março, 2011

SOUZA, Tiago Francioli. **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.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG. 2009

TAN, Yifei. Chinbat, Undram.Miwa, Kanna e Takakuwa, Soemon. *Operations Modeling and Analysis of Open Pit Copper Mining Using GPS Tracking Data. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. C.Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher, eds.2012*

WAINER Gabriel A. **Discret Event Modeling and Simulation. A Practitioner's Approach.** Series editor. Pieter Mosterman, The Mathworks, Natick, Conneticut. 2009

ANEXO II

CAPTURA DA TELA DE ANIMAÇÃO DO MODELO

