

**Aline Lorraine Silva Lacerda**

**SIMULAÇÃO APLICADA A SISTEMA DE DESPACHO COMO FORMA DE  
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO E INTEGRIDADE DE  
DADOS NA MINA DO SOSSEGO**

**Carajás, PA**

**2019**

Aline Lorraine Silva Lacerda

**SIMULAÇÃO APLICADA A SISTEMA DE DESPACHO COMO FORMA DE  
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO E INTEGRIDADE DE  
DADOS NA MINA DO SOSSEGO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Instituto Tecnológico Vale,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de especialista *lato sensu* em Lavra  
de Minas a Céu Aberto.

Orientadora: Taís Renata Câmara

Carajás, PA  
2019

Título: SIMULAÇÃO APLICADA A SISTEMA DE DESPACHO COMO FORMA DE AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO E INTEGRIDADE DE DADOS NA MINA DO SOSSEGO

Classificação: ( ) Confidencial ( ) Restrita ( ) Uso Interno ( X ) Pública

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L131s

Lacerda, Aline Lorraine Silva

Simulação aplicada a sistema de despacho como forma de avaliação da influência da otimização e integridade de dados na Mina do Sossego/Aline Lorraine Silva Lacerda - Ouro Preto, 2019.  
75 f.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2019.  
Orientador (a): Taís Renata Câmara

1. Planejamento de Mina - Otimização. 2. Simulação. 3. Sistema de despacho 4. Integridade de dados I. Título

CDD. 23. ed. 622

Especialização em Lavra de Minas a Céu Aberto

SIMULAÇÃO APLICADA A SISTEMA DE DESPACHO COMO FORMA DE  
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO E INTEGRIDADE DE DADOS  
NA MINA DO SOSSEGO

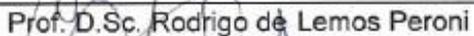
Autora: Aline Lorraine Silva Lacerda

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 02 de maio de 2019  
pela banca examinadora constituída pelos professores:



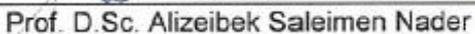
---

Prof.<sup>a</sup> MSc. Taís Renata Câmara  
Orientadora – Vale



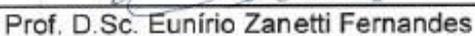
---

Prof. D.Sc. Rodrigo de Lemos Peroni  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)



---

Prof. D.Sc. Alizeibek Saleimen Nader  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



---

Prof. D.Sc. Eunírio Zanetti Fernandes  
Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dedico esse trabalho à minha mãe: mulher guerreira, de fibra,  
que tornou real meu sonho de “engenheira” e possibilitou que eu fosse muito além.

E ao meu pai, que em meio à toda sua simplicidade,  
soube apoiar as minhas decisões e contribuir à sua maneira para fazê-las acontecer.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por direcionar meus passos pelos caminhos do conhecimento. À minha mãe por não medir esforços para que eu pudesse atingir meus objetivos e ao meu pai por sempre se orgulhar das minhas conquistas. Ao Dan pela compreensão durante as várias noites e fins de semana de dedicação aos estudos e pela generosidade de preparar nossas refeições nos momentos mais críticos (e nos não-críticos também). À equipe de despacho da mina do Sossego pelos ensinamentos, parceria e por todo conhecimento compartilhado. Vocês foram muito mais que colegas de trabalho, foram responsáveis pela minha motivação de tentar fazer sempre o melhor pelo nosso time. À Lúcia Oliveira, minha chefinha, por ser uma gestora incentivadora dos estudos entre os membros da nossa equipe e reconhecer a importância da busca incessante por conhecimento. À Carla Campelo, amiga, colega de trabalho e praticamente coorientadora, que me introduziu ao mundo do despacho e constantemente colabora com os meus trabalhos. À equipe da Modular Brasil, em especial Alan, Aluísio e Antônio, pela participação neste trabalho e parceria ao longo dos anos que me dediquei ao despacho. À Taís Câmara por realmente fazer acontecer na figura de orientador, tão essencial para um trabalho de qualidade. O meu mais sincero obrigada a todos que de alguma forma contribuíram e contribuem para cada degrau que eu subo, sou muito grata por Deus presentear a minha vida com pessoas como vocês!

*“The only real way to find areas to improve is to look at what you’re already doing”*  
Larry Widdifield (Caterpillar, 2010).

## RESUMO

O sistema de despacho é uma ferramenta de gerenciamento de equipamentos de mina que permite maximizar a produção e eficiência e minimizar os custos operacionais a partir da tomada de decisões utilizando dados em tempo real. Para que o sistema alcance a solução ótima e reflita a realidade operacional da mina, é necessário garantir a confiabilidade dos dados gerados e minimizar a interferência manual nas decisões calculadas pelo algoritmo. Além disso, os dados coletados pelo banco de dados do sistema de despacho são essenciais para a geração de relatórios operacionais da unidade que demandam confiabilidade nas informações, uma vez que são peça chave para garantir o sucesso no gerenciamento do empreendimento. Por meio de frequente acompanhamento do ciclo de produção realizado na Mina do Sossego, gerenciamento dos equipamentos feito pela equipe de controle operacional e avaliação de relatórios do sistema de despacho, foi possível a identificação de uma oportunidade de melhoria operacional na unidade, uma vez que várias inconsistências foram encontradas nos dados do ciclo de produção. O objetivo deste trabalho é estimar o potencial de ganhos de produtividade e eficiência dos equipamentos através de modelos de simulação computacional utilizando o sistema de gerenciamento de equipamentos móveis Dispatch para os cenários de otimização (sem interferências manuais) e o software Arena Simulation para os cenários de integridade de dados (com dados considerados confiáveis). Os resultados para as simulações dos cenários apresentaram incremento de produção evidenciando ganhos substanciais através da garantia de integridade dos dados, operação otimizada do despacho e configurações corretas das variáveis de entrada no sistema.

**Palavras-chave:** Sistema de despacho, otimização, integridade de dados, simulação.

## **ABSTRACT**

The dispatch system is a mine fleet management system that allows to maximize production and efficiency and to minimize operational costs by optimizing haul truck assignments through real time web reports. In order to allow the system to achieve the optimal solution and to reflect real operational mine conditions it's necessary to ensure reliability of all data generated from dispatch and also minimize manual interference on solutions calculated by dispatch algorithm. Besides, the data collected from dispatch database are essential to generate reports by the mine operation and therefore demand information reliability once they are the key to achieve success at the business management. Frequent production cycle monitoring, fleet management by the operational control team and evaluation of reports generated from dispatch data at Sossego mine leaded to recognizing an improvement opportunity, once several inconsistencies were identified in the production cycle data collected from dispatch database. This study aims to estimate the potential equipment productivity and efficiency gains through computer simulation models using the simulation utility Dispatch for optimization scenarios (no manual interference) and the software Arena Simulation for data integrity scenarios (with data considered reliable). The results for the scenarios simulated presented production increment evidencing substantial gains over data integrity guarantee, optimized dispatch operation and correct set of data input in the system.

**Keywords:** Dispatch system, optimization, data integrity, simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alocação estática de caminhões. ....	24
Figura 2 - Alocação dinâmica de caminhões.....	25
Figura 3 - Interação MR, PL e PD.....	29
Figura 4 - Opções de circuitos antes da PL. ....	29
Figura 5 - Opções de circuitos selecionados pela PL. ....	30
Figura 6 - Circuito otimizado hipotético. ....	31
Figura 7 - Ciclo operacional simplificado das operações unitárias de mina à céu aberto. .....	33
Figura 8 - Ciclo de carregamento e transporte. ....	34
Figura 9 - Tela de exceções disponível no controle operacional do sistema de despacho. .....	36
Figura 10 - Fluxograma simplificado da base de dados do sistema de despacho. ....	37
Figura 11 - Vista geral de rede de telecomunicação via wireless na mina.....	38
Figura 12 - Rádio antena instalada na lateral dos equipamentos.....	39
Figura 13 - Modelo de antena repetidora móvel de campo MasterLink. ....	39
Figura 14 - Computador de bordo do sistema Dispatch. ....	40
Figura 15 - Tela de interação entre operador e sistema de despacho. ....	40
Figura 16 - Início do ciclo e solicitação de destino pelo operador.....	41
Figura 17 - Chegada no destino de carregamento. ....	41
Figura 18 - Início de carregamento.....	42
Figura 19 - Término de carregamento. ....	42
Figura 20- Localização da Mina do Sossego na Província Mineral de Carajás. ....	47
Figura 21- Limite dos corpos de minério no depósito de Sossego.....	48
Figura 22- Imagem de satélite da Mina do Sossego.....	49
Figura 23- Esquema de movimentação da Mina do Sossego .....	50
Figura 24 - Sumário de estado dos equipamentos para turno real.....	52
Figura 25 - Sumário de estado dos equipamentos para turno replicado.....	52
Figura 26 - Distribuição de equipamentos para o cenário fixo.....	53
Figura 27 - Distribuição de equipamentos para o cenário otimizado.....	53
Figura 28 - Parâmetros da PL para cenário fixo.....	54
Figura 29 - Parâmetros da PL para cenário otimizado. ....	54
Figura 30 - Lógica do modelo de simulação no software Arena.....	55

Figura 31 – Histograma dos tempos de transporte para cenário não-íntegro. ....	57
Figura 32- Histograma dos dados de tempo de ciclo para cenário não-íntegro. ....	57
Figura 33 - Boxplot dos tempos de transporte para cenário não-íntegro.....	58
Figura 34 - Boxplot dos tempos de ciclo para cenário não-íntegro.....	59
Figura 35 - Histograma dos tempos de transporte para cenário íntegro.....	60
Figura 36 - Histograma dos dados de tempo de ciclo para cenário íntegro.....	61
Figura 37 - Boxplot dos tempos de transporte para cenário íntegro.....	62
Figura 38 - Boxplot dos tempos de ciclo para cenário íntegro.....	62
Figura 39 - Resultados simulação para cenário não-íntegro.....	64
Figura 40 - Resultados simulação para cenário íntegro.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se estéril igual a minério. .....	32
Tabela 2 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se minério acima de estéril. .....	32
Tabela 3 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se estéril acima de minério. .....	32
Tabela 4 - Sumário de frotas da Mina do Sossego. ....	51
Tabela 5 - Resumo de tempos de ciclo por local de carregamento. ....	56
Tabela 6 - Resumo de tempos de ciclo por local de basculamento. ....	56
Tabela 7 - Resumo de tempos de ciclo por local de carregamento para banco de dados atualizado.....	59
Tabela 8 - Resumo de tempos de ciclo por local de basculamento para banco de dados atualizado.....	60
Tabela 9 - Comparação entre resultado da simulação para o cenário replicado e turno real. .....	63
Tabela 10 - Comparação entre os resultados da simulação para cenário fixo e otimizado. .....	63
Tabela 11 - Comparação entre resultados da simulação para o cenário não-íntegro e o turno real.....	65
Tabela 12 – Comparação entre os resultados para os cenários de integridade de dados.	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PO – Pesquisa Operacional

PL – Programação linear

PD – Programação Dinâmica

BP – *Best Path*

MR – Melhor Rota

GPS – *Global Positioning System*

SGBD – Sistema Gerenciador de Base de Dados

SQL – *Structured Query Language*

MTTR – *Mean Time To Repair*

MTBF – *Mean Time Between Failure*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	16
2	OBJETIVO.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	PESQUISA OPERACIONAL .....	19
3.1.1	PROGRAMAÇÃO LINEAR .....	19
3.1.2	PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	21
3.2	PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À MINERAÇÃO .....	22
3.2.1	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE FROTA .....	23
3.2.2	SIMULAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA MINERAL .....	26
3.3	SISTEMA DE DESPACHO .....	27
3.3.1	ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DISPATCH .....	28
3.3.2	CICLO DE PRODUÇÃO .....	33
3.3.3	EXCEÇÕES GERADAS PELO DESPACHO .....	35
3.3.4	BANCO DE DADOS .....	36
3.3.5	COMUNICAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES .....	37
3.3.6	INTEGRIDADE DE DADOS .....	42
4	METODOLOGIA .....	44
4.1	ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	44
4.1.1	CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO.....	44
4.1.2	CENÁRIOS DE INTEGRIDADE DE DADOS.....	45
4.2	ESTUDO DE CASO: MINA DO SOSSEGO .....	46
4.2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OPERAÇÃO .....	48
4.2.2	SIMULAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO.....	51
4.2.3	SIMULAÇÃO DE INTEGRIDADE DE DADOS .....	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
6	CONCLUSÕES.....	67
7	RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES .....	68
	REFERÊNCIAS .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Sachs e Nader (2005), a mineração é parte da chamada indústria de processo, sendo tipicamente um empreendimento de grande porte, com alocação de alto volume de investimentos, equipamentos pesados e grandes plantas industriais. A grande concorrência existente no mercado mundial exige cuidadoso e eficiente gerenciamento das operações para alcançar sucesso e lucratividade no empreendimento.

A indústria de mineração, assim como outras indústrias, está frequentemente em busca de melhorias em seus processos de forma a garantir uma operação sustentável com ganhos de produtividade, considerando flutuações nos custos e preços das *commodities* no mercado. A demanda por confiabilidade nas informações e embasamento científico para a tomada de decisões críticas inerentes ao setor mineral requer investimentos significativos em aplicações inteligentes e melhorias contínuas nos processos produtivos.

Nesse contexto, a pesquisa operacional (PO) começou a ser utilizada como importante ferramenta no auxílio de soluções para problemas cada vez mais complexos e como forma eficiente de controle e planejamento estratégico da produção. De acordo com Tubino (1997), o planejamento da produção consiste em gerar condições para que as empresas possam decidir rapidamente perante oportunidades e ameaças, otimizando suas vantagens competitivas em relação ao ambiente concorrencial no qual atuam, garantindo sua perpetuação no tempo.

Segundo Arenales *et al.* (2015), a PO é uma abordagem científica aplicada para a solução de problemas reais envolvendo tomada de decisão e gerenciamento de sistemas complexos. Normalmente, quando estamos diante de algum problema de tomada de decisão, trata-se de um problema específico de PO. O seu objetivo principal é encontrar a melhor utilização de recursos limitados, procurando determinar o uso otimizado de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistêmica problemas que envolvam a utilização de recursos escassos (ARAÚJO, 2008).

Para Amaral e Pinto (2010), o ciclo de carregamento e transporte em minas a céu aberto é um estágio crítico no processo de produção podendo representar entre 30%- 40% dos custos totais da mina e uma alocação ótima bem estruturada pode resultar em significativa economia para a organização. Gerenciamento de frota é uma técnica de otimização de transporte usada no planejamento operacional que permite ganhos de

produtividade através da maximização da utilização dos equipamentos e reduz, portanto, custos de operação (CORONADO, 2014).

O sistema de gerenciamento de frota pode ser feito através de alocação estática ou dinâmica, sendo o termo despacho comumente aplicado para sistemas de alocação dinâmica. O planejamento operacional também implica no gerenciamento dos equipamentos de carga, isto é, na escolha da frente de lavra que um determinado equipamento de carga será alocado. Este gerenciamento de equipamentos deve respeitar as restrições operacionais da mina e as metas de qualidade e de produção (PANTUZA JR., 2011).

As rotineiras atividades da operação, comumente não permitem que se despenda tempo para verificação da qualidade e precisão dos dados armazenados e coletados pelo sistema de despacho, e muitas vezes aspectos elementares como a integridade dos dados, passam despercebidos. O despacho utiliza critérios preestabelecidos para sua operação, bem como dados em tempo real e históricos para antecipar e sugerir ações para otimizar a produtividade do processo, portanto uma base de dados não confiável conduz o sistema a atingir soluções ótimas para cenários que não representam a realidade das operações na mina.

Kolonja et al. (1993) afirma que a simulação é o método mais aplicável e efetivo para avaliar e comparar problemas de despacho. Neste trabalho serão simulados cenários de uma mina real através de dois softwares de simulação, com o objetivo de avaliar o comportamento das operações de lavra variando-se a otimização e integridade de dados de entrada, considerando sistemas de alocação estática e dinâmica de caminhões.

## **1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

O sistema de despacho busca maximizar a produção através de dados em tempo real (tempos de ciclo, barramentos, frentes fixas, etc.) seguindo um plano mestre previamente definido pelo algoritmo de programação do sistema. Quando operado de maneira otimizada - sem interferências manuais na tomada de decisão do algoritmo e utilizando dados de entrada confiáveis - o sistema pode gerar ganhos reais de produtividade e redução de custos nas operações.

Para que o sistema alcance a solução ótima e reflita a realidade operacional da mina, é necessário garantir a confiabilidade dos dados gerados e minimizar a interferência manual nas decisões calculadas pelo algoritmo. Além disso, os dados coletados no banco

de dados do sistema de despacho são essenciais para a geração de relatórios operacionais da unidade que demandam confiabilidade nas informações, uma vez que são peça chave para o sucesso no gerenciamento do empreendimento.

Resultados de um estudo apresentado por uma empresa prestadora de serviços apontaram que os dados do ciclo operacional gerados pelo sistema de despacho da Mina do Sossego apresentam baixa integridade e que ainda ocorrem frequentes interferências manuais na tomada de decisão calculada pelo algoritmo do sistema. Tais informações apresentaram uma oportunidade de melhoria operacional do processo, através de análises robustas do problema, que permitam soluções e resultados satisfatórios para a organização.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é estimar o potencial de ganhos de produção e eficiência através da garantia de integridade dos dados, operação otimizada do despacho e configurações corretas das variáveis de entrada no sistema, para a operação de despacho da Mina do Sossego.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para atingir o objetivo geral do trabalho, as seguintes etapas individuais serão realizadas:

- Revisar o histórico de informações operacionais que podem interferir na otimização e integridade dos dados do sistema, como por exemplo, barramentos, frente-fixa e dados de ciclo de transporte e carregamento;
- Identificar as variáveis de entrada e dados utilizados para as configurações dos simuladores Dispatch e Arena;
- Definir o período para o qual as operações da mina serão replicadas nos simuladores;
- Coletar as informações sobre o período escolhido e tratar os dados através de software de análise estatística para utilização como dado de entrada em cada cenário utilizado;
- Realizar simulações do sistema de despacho com cenários de alocação estática e dinâmica (Dispatch), dados íntegros e não-íntegros (Arena), visando avaliar a influência da otimização do sistema e integridade de dados na operação;
- Comparar e avaliar os resultados obtidos.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica dos principais conceitos e técnicas citadas ao longo deste trabalho. Sendo assim, serão abordados conceitos referentes à PO e suas aplicações na indústria mineral, sistemas de gerenciamento de frota, otimização e integridade de dados de sistema de despacho.

#### **3.1 PESQUISA OPERACIONAL**

Segundo Hillier e Lieberman (2010), a origem da atividade conhecida como Pesquisa Operacional deu-se no início da Segunda Guerra Mundial a partir da necessidade de alocar recursos escassos de forma eficiente entre as diversas operações militares. Na prática, foi solicitado a cientistas que realizassem pesquisas sobre as operações (militares) de forma a solucionar problemas táticos e estratégicos, daí o termo Pesquisa Operacional.

Desde então, a PO foi disseminada e tem sido aplicada às mais diversas áreas de produção e logística. Um fator que acelerou substancialmente a generalização das técnicas de PO foi a revolução computacional que tornou possível o processamento de grande volume de cálculos para o tratamento eficiente de problemas complexos. Uma outra ferramenta que auxiliou na difusão da aplicação de PO foi a criação de computadores pessoais, que permitem que milhares de pessoas tenham acesso diariamente à softwares de PO.

A PO é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, através de modelos matemáticos habitualmente processados computacionalmente. Algumas técnicas de PO utilizadas para auxílio à tomada das decisões são: programação linear, programação inteira mista, programação dinâmica, teoria das filas, simulação, análise de risco, teoria de jogos, etc.

##### **3.1.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR**

A programação linear visa fundamentalmente encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões. O objetivo da programação linear consiste em maximizar ou minimizar uma função linear, dita função objetivo e a solução ótima dentre as soluções viáveis. As soluções devem respeitar um sistema linear de restrições do modelo que representam as limitações de recursos ou exigências e condições expressas por meio de equações e inequações.

Dois passos são necessários para a resolução de um problema de programação linear: a modelagem do problema e o método de solução do modelo. Para Bregalda *et al.* (1988) não existem técnicas precisas, capazes de permitir o estabelecimento do modelo de um problema, sendo de fundamental importância a experiência e capacidade de análise e síntese.

O desenvolvimento de um método que determine a solução ótima para um problema de programação linear torna necessário a redução do problema a uma forma que permita a aplicação direta deste algoritmo. No caso de programação linear, Wagner (1986) afirma que existem diferentes métodos, mas o algoritmo Simplex é o mais difundido. Para que o Simplex seja aplicado, é fundamental reduzir o problema de programação linear à forma-padrão. As equações 1 a 3 mostram um problema de programação linear na forma-padrão.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_j \text{ onde } b_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n p_j x_j = Q(x) \rightarrow \text{MÁX!} \quad (3)$$

Onde:

$i$  = atividade a ser realizada;

$p_j$  = produção da atividade  $i$ ;

$j$  = restrição;

$b_j$  = quantidade disponível do recurso  $j$ ;

$a_{ij}$  = quantidade do recurso  $j$  na atividade  $i$ ;

$x_i$  = nível de operação da atividade  $i$  (variável de decisão);

$n$  = número de atividades;

$m$  = número de recursos.

Os dois primeiros conjuntos de equações (equação 1) normalmente são denominados restrições do problema de programação linear, o segundo denomina-se condição de não negatividade (equação 2), enquanto a equação 3 representa a função objetivo.

O método Simplex, fundamentado na álgebra linear, baseia-se na propriedade de que a solução ótima, caso exista, está localizada em um vértice (solução básica viável) do polítopo formado pelo conjunto das soluções viáveis do problema (RODRIGUES, 2006). Assim, o método sistematicamente busca soluções nos limites da região viável, aprimorando os valores da função objetivo a cada iteração até que o ótimo seja alcançado (CHVÁTAL, 1983; COHEN, 1985; HILLIER e LIEBERMAN, 2001; KARLOFF, 1991; VANDERBEI, 1997; WAGNER, 1969).

### 3.1.2 PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Programação dinâmica é uma técnica eficiente para desenvolver uma sequência de decisões inter-relacionadas e fornece um processo sistemático para determinação da combinação ótima de decisões. É um poderoso método desenvolvido para otimização de um sistema que possa ser separado entre estágios e o conceito principal dessa técnica é baseado no princípio de otimalidade de Bellman (1959), que diz:

*“Uma política ótima tem a propriedade de que, qualquer que seja o estado e decisão inicial, as decisões restantes devem necessariamente constituir uma política ótima em relação ao estado resultante da primeira decisão. ”*

Mutmansky (1979) afirma que quando um problema de tomada de decisão pode ser formulado com uma série de decisões individuais que são inter-relacionadas, então o problema pode ser resolvido por programação dinâmica.

Em contraste aos problemas de programação linear, não existe uma forma padrão para a formulação de um problema de programação dinâmica, no entanto Luus (2000) define que desde que um problema de controle ótimo, envolvendo otimização de uma trajetória, possa ser dividido em uma sequência de estágios de tempo, a programação dinâmica seria idealmente aplicada. Além disso, é normalmente aplicada em problemas de menor escala (WAGNER, 1986).

### 3.2 PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À MINERAÇÃO

A aplicação de técnicas de PO em minas a céu aberto tem atraído o interesse de pesquisadores desde 1965, quando foi publicado o algoritmo de programação dinâmica de Lerchs-Grossmann para obtenção da cava final ótima (HUSTRULID e KUCHTA, 1995). A partir desta data, foram desenvolvidos muitos outros modelos e algoritmos para esse e outros problemas.

Devido à importância e à complexidade do planejamento de lavra, segundo Crawford e Hustrulid (1979), o desafio de otimização deste processo tornou-se um dos grandes problemas enfrentados pelas empresas do setor mineral. A PO tem sido utilizada ultimamente de modo eficaz na resolução de problemas de planejamento de lavra a céu aberto utilizando-se técnicas de otimização, dentre elas a programação linear e simulação.

O trabalho proposto por White *et al.* (1982) apresenta um modelo de programação linear para minimizar o número de caminhões necessários através de restrições relacionadas à continuidade do fluxo de material pelos pontos de carga e descarga e às respectivas capacidades produtivas. Pinto (2007) descreveu um modelo de programação linear para otimização de sequenciamento de operações em minas. Segundo ele, a programação linear tem sido aplicada a uma grande variedade de problemas em mineração. Embora a maioria das aplicações bem-sucedidas na indústria da mineração possa ser observada em problemas de blendagem de minério para alimentação, há um grande potencial para aplicações na programação da produção e no sequenciamento.

Maran e Topuz (1988) afirmam que a simulação computacional pode ser usada como uma forma de experimentação e avaliação de problemas de despacho, especialmente quando métodos analíticos não são satisfatórios. A simulação computacional é provavelmente o único método prático para prever a performance de um sistema de transporte de caminhões sob controle de despacho computadorizado (TU e HUCKA, 1985).

Mutmansky (1979), apud Costa (2005), relatou que dentre as técnicas de PO mais utilizadas na mineração pode-se destacar a programação linear como a mais aplicada aos problemas de planejamento de produção em mineração, sendo adotada principalmente pelas minerações a céu aberto devido à complexidade de gerenciamento dos equipamentos.

### 3.2.1 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE FROTA

Na mineração, as etapas básicas necessárias para a extração mineral do depósito, de maneira a aproveitá-lo economicamente são classificadas, de acordo com Hartman e Mutmansky (2002), pelas seguintes tarefas, que formam as operações unitárias básicas para um ciclo de produção em mina.

Ciclo de Produção = Perfuração + Detonação + Carregamento + Transporte.

Montoya et al. (2015) dizem que a etapa de transporte dentro de uma cadeia de fornecimento corresponde a conseguir movimentar determinado material entre dois pontos geográficos, e que tal processo logístico pode envolver 30 a 70% dos custos de um produto. Segundo Srajer et al. (1989), a operação eficiente de caminhões e equipamentos de carga em minas depende da alocação adequada de caminhões e equipamentos de carga a pontos de descarga. A falta de sincronização entre as etapas de carga e descarga de material pode ocasionar filas, conseqüentemente, esperas e ociosidade de equipamentos e empregados, caracterizado por Fitzsimons e Fitzsimons (2014) como sendo a demanda excedente à capacidade do servidor, requerendo gerenciamento especial para solução de tais situações.

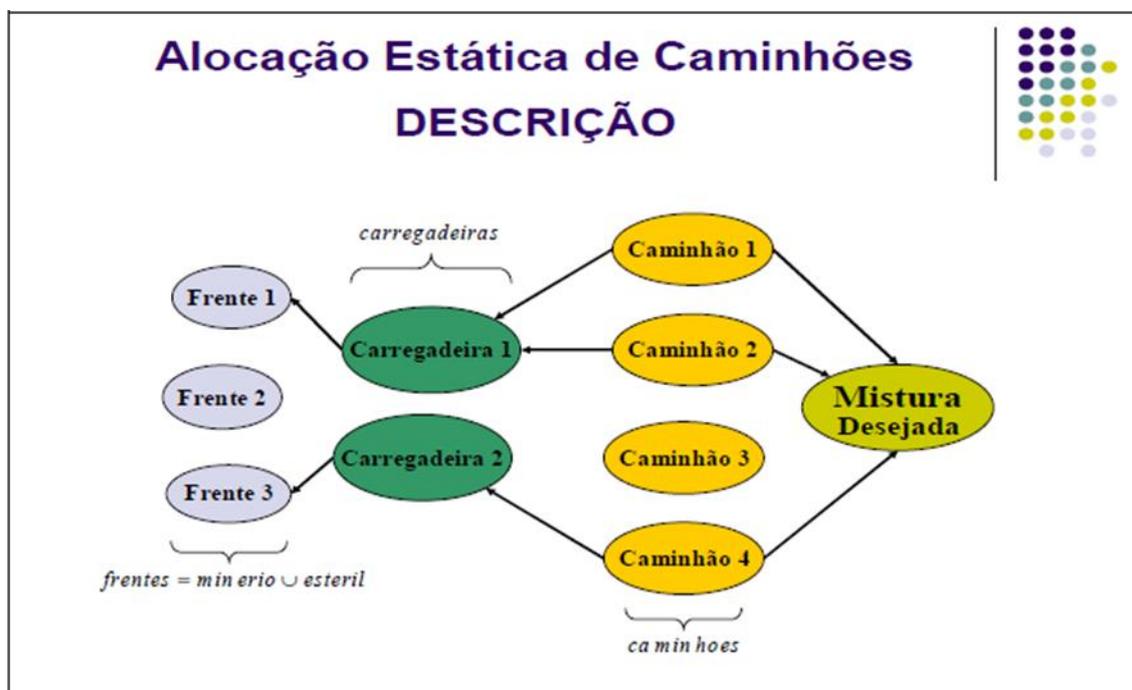
Segundo Munirathinam e Yingling (1994), sistemas de gerenciamento de frotas de transporte e carregamento estão sendo cada vez mais aplicados para melhorar a utilização de equipamentos e a produtividade em minas a céu aberto e para ajudar a assegurar que as operações de extração nessas minas estejam dentro das premissas de desempenho estabelecidas. Em consequência de quebra de equipamentos, variações nas condições de escavação, capacidade de caminhões, características de *blend*, frequentemente, a alocação de caminhões é requerida para manter a operação eficiente.

Em minas a céu aberto, são utilizados dois critérios para a alocação de caminhões: alocação estática e alocação dinâmica. Historicamente, as minas a céu aberto sempre operaram utilizando a alocação estática devido à falta de ferramentas e modelos consistentes, mas com o advento da possibilidade de monitoramento e controle por computador, a alocação dinâmica ganhou espaço entre as indústrias, despachando os caminhões para a lavra com maior possibilidade de contribuição para o atendimento dos objetivos de produção a curto prazo (KOLONJA et al.,1993).

A alocação estática ainda é um método utilizado em minas de pequeno e médio porte, isto por não apresentar a obrigatoriedade de utilização de um sistema automático de alocação normalmente associado a softwares e com maiores custos associados. Porém esse método proporciona menor produtividade devido às filas de caminhões e à ociosidade dos equipamentos de carga (COSTA, 2011). Além disso, esse método tende a provocar uma maior variabilidade dos teores do ROM ao longo do tempo, devido ao fato de não haver um controle efetivo e sistemático das descargas dos caminhões.

Nesse sistema, cada caminhão é alocado a uma única rota, ou seja, permanece se deslocando entre dois pontos fixos, um de carga e outro de descarga, conforme ilustrado na Figura 1. De acordo com Costa et al. (2004), para viabilizar a lavra em diferentes frentes, os equipamentos devem ser alocados de acordo com suas disponibilidades de operação e produtividades. Tais equipamentos de carga devem ser alocados de modo que seja considerada a compatibilidade com os equipamentos de transporte e a utilização máxima de sua capacidade de produção. Esta compatibilidade está relacionada, principalmente, com o número de passes necessários para encher a caçamba do caminhão.

Figura 1 - Alocação estática de caminhões.

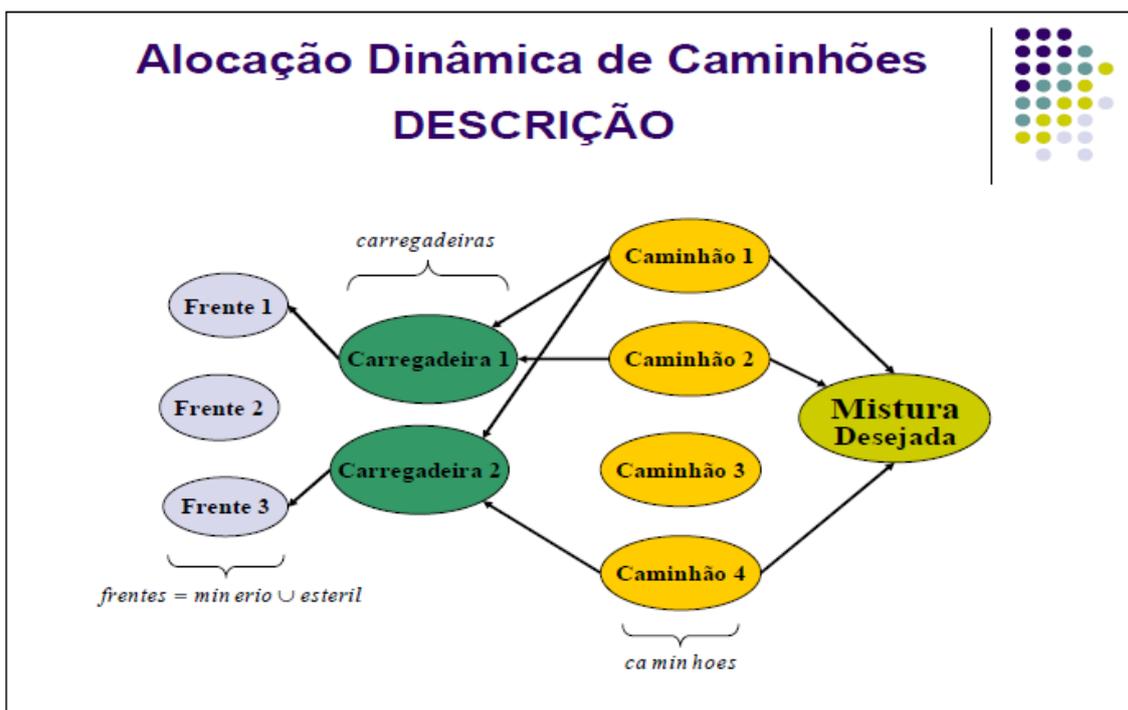


Fonte: ARAÚJO, 2008.

Na alocação dinâmica, um caminhão pode ser alocado a novos pontos de carga e basculamento de forma a prevenir a formação de filas e aumentar a produtividade da frota. Este aumento de produtividade da frota pode refletir um aumento na capacidade de

produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter o mesmo nível de produção. Para isso, é importante que o despacho de caminhões seja eficiente (COSTA, 2005). Segundo Knights e Bonates (1999), pode se dizer que os termos “alocação dinâmica” e “despacho” são equivalentes. A Figura 2 exemplifica o sistema de alocação dinâmica de caminhões.

Figura 2 - Alocação dinâmica de caminhões.



Fonte: ARAÚJO, 2008.

Merschann e Pinto (2001) sugeriram dois modelos diferentes para a alocação dos equipamentos, ambos buscando maximizar o ritmo de lavra. Um destes considera a alocação estática de caminhões e o outro adota um modelo de alocação dinâmica. O modelo de alocação dinâmica contempla o problema da mistura e a alocação de equipamentos de carga, o atendimento da relação estéril/minério mínima e considera a alocação dinâmica dos caminhões.

Ezawa e Silva (1995) desenvolveram um sistema de alocação dinâmica de caminhões visando a redução da variabilidade dos teores dos minérios produzidos e a geração de ganhos de produtividade no sistema de transporte na Mina do Pico, em Itabirito. Segundo os autores, a preocupação se faz necessária devido à complexidade geológica da reserva da mina. Este sistema pode ser considerado um exemplo de tentativa

de utilização dos dois critérios de despacho (qualidade e produtividade), mas não considera as políticas simultaneamente.

### 3.2.2 SIMULAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA MINERAL

A simulação tem sido largamente utilizada em: manufatura, manuseio de materiais, sistemas militares, tráfego, treinamento de pilotos, sistemas de planejamento e projeto de minas e vários sistemas com forte estrutura de filas (RODRIGUES, 2006). Segundo Ramos Neto (2002), a mineração pode ser incluída como sendo um desses sistemas passíveis de serem simulados, por possuir operações complexas, variáveis aleatórias e por ser necessária a avaliação de estratégias para estas operações.

As primeiras aplicações de simulação em minas ocorreram nos Estados Unidos e na Europa. Paganiotou (1999) cita que os primeiros estudos de simulação em mineração na Europa foram no transporte em minas subterrâneas para determinação do número ótimo de trens.

Para Knights e Bonates (1999), a simulação pode ser utilizada para prever o impacto de novas ideias, procedimentos e mudança de normas nas operações da mina. Através disso, alternativas podem ser comparadas e mudanças podem ser testadas sem aplicá-las ao sistema real.

Maran e Topuz (1988) afirmam que a simulação computacional pode ser usada como uma forma de experimentação e avaliação de problemas de despacho, especialmente quando métodos analíticos não são satisfatórios. A simulação computacional é provavelmente o único método prático para prever a performance de um sistema de transporte de caminhões sob controle de despacho computadorizado (TU e HUCKA, 1985).

Pantuza Júnior (2011) propôs um modelo de programação linear por metas, um algoritmo genético multi-objetivo híbrido, assim como um modelo de simulação computacional para avaliar os modelos exato e heurístico para solucionar um problema de planejamento operacional de lavra de mina a céu aberto, considerando alocação dinâmica de caminhões.

Merschmann (2002) desenvolveu um sistema computacional de otimização e simulação para o problema de planejamento operacional de lavra chamado OTISIMIN.

O sistema de simulação utiliza o resultado do modelo de otimização. O modelo de programação linear utilizado na otimização não considera as metas qualidade, bem como a minimização do número de caminhões utilizados.

### **3.3 SISTEMA DE DESPACHO**

O sistema de despacho é uma ferramenta de gerenciamento de equipamentos de mina que permite maximizar a produtividade e minimizar os custos operacionais a partir de tomada de decisões utilizando dados em tempo real e outras variáveis definidas manualmente, de acordo com a necessidade individual de cada mina (COSTA, 2011). É um software de gerenciamento que combina tecnologia de computadores, comunicação de rádios e GPS (Modular Mining Systems Inc, 2005). A primeira instalação de um sistema computadorizado de despacho registrado ocorreu em 1979, na mina de cobre chamada Tyrone, estado do Novo México, Estados Unidos.

Segundo Alarie e Gamache (2002), problemas de despacho de caminhões não ocorrem apenas na indústria mineral, mas estão presentes em qualquer indústria que gerencia uma frota de veículos ou um grupo de pessoas, tal como indústrias de transporte, táxi e entrega de pacotes. Entretanto, aplicado às minerações apresenta simplificações em relação ao encontrado em outras indústrias. Dentre essas simplificações, esses mesmos autores, citam que minas são sistemas fechados, os pontos de carga e descarga permanecem à mesma distância por um longo período de tempo, as distâncias são pequenas comparadas com a duração do turno e a frequência da demanda de cada ponto é alta.

Um sistema de despacho reúne um algoritmo de sequenciamento de viagens, um sistema de comunicação entre os equipamentos de carga, caminhões e central de comandos. O algoritmo utilizado permite tomar a melhor decisão no gerenciamento de equipamentos considerando o cenário atual da mina - dados coletados em tempo real e dados de entrada como topografia e configurações previamente definidas pela equipe técnica da mina. O sistema é multidirecional, recebe dados em tempo real e o monitoramento das operações é altamente efetivo.

Segundo Munirathinam e Yingling (1994), White et al. (1982), Alvarenga (1997) e Alarie e Gamache (2002), com sistemas de despacho, espera-se aumento da produtividade com a utilização dos recursos existentes (caminhões e equipamentos de

carga) ou a produção desejada com redução da necessidade de equipamento. Para Qinghua *et al.* (2008) a aplicação prática indica que o sistema aumenta consideravelmente a produtividade e eficiência de produção em minas e poupa investimentos e custos de transporte. Essas metas são alcançadas por considerações cuidadosas de alternativas de alocação de caminhão/equipamento de carga em tempo real e determinação de decisões de alocação que aumentem a utilização de recursos e diminuam o tempo de espera em todos os caminhos.

### 3.3.1 ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO DISPATCH

De acordo com Çetin (2004), o Dispatch®, sistema de despacho desenvolvido pela Modular Mining System ® é um dos mais poderosos sistemas e é utilizado em muitas minas a céu aberto pelo mundo, inclusive na Mina do Sossego. A estratégia de otimização do Dispatch envolve a alocação ótima de recursos de transporte (caminhões) entre escavadeiras com o objetivo de maximizar a produtividade global dos caminhões. Essa alocação de tonelagem é limitada por restrições operacionais - capacidade do britador, qualidade de material, capacidades de escavação, etc., e prioridades definidas (Modular Mining Systems Inc, 2005).

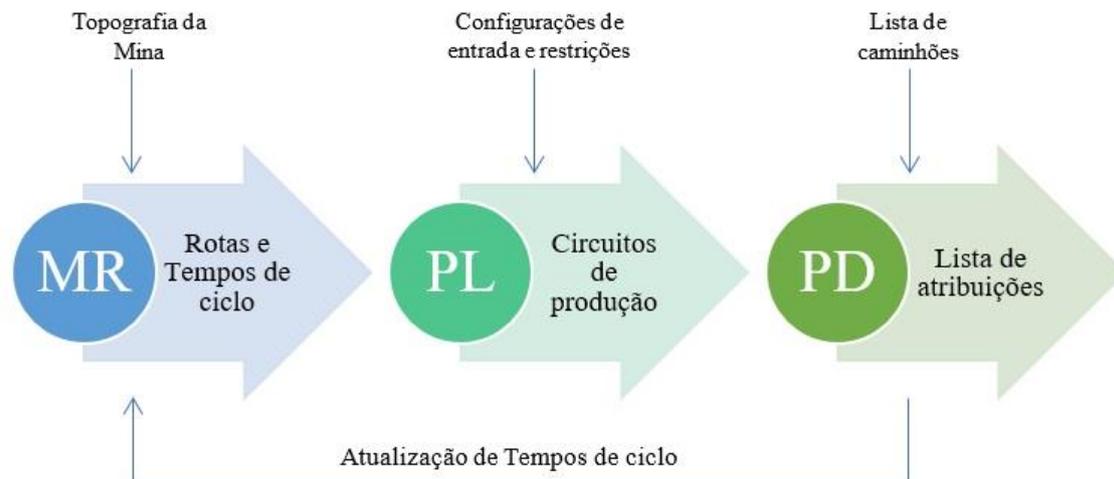
O algoritmo do sistema utiliza dados da rede de estradas, topografia, menor rota entre pontos e outras configurações definidas e a partir dessas informações cria um “plano mestre” com o objetivo de maximizar a produtividade dos caminhões.

A estratégia é composta de duas fases:

- 1) MR + PL (melhor rota e programação linear)
- 2) PD (programação dinâmica)

A fase da estratégia envolve o cálculo da menor rota entre dois pontos A e B pela MR, que alimenta a PL com informações de rede de estradas e topografia da mina antes de tentar qualquer otimização. A MR é recalculada toda vez que ocorre uma mudança nas rotas e topografia. Através das informações coletadas, a PL cria um plano mestre considerando os recursos disponíveis, as prioridades e as restrições, com o objetivo de maximizar a produtividade dos caminhões. A Figura 3 ilustra como a MR, PL e PD interagem para maximizar a produtividade dos caminhões.

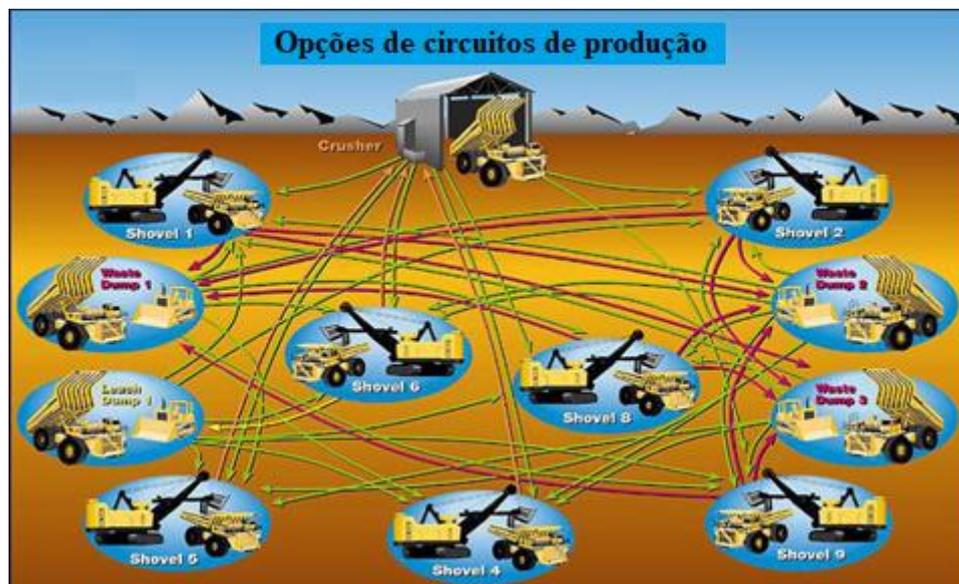
Figura 3 - Interação MR, PL e PD.



Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

Esse plano (solução do problema de programação linear) contém circuitos otimizados de produção que indicam quais os pontos de basculamento devem fornecer recursos (caminhões vazios) para quais escavadeiras, considerando o tipo de caminhão ótimo, produtividade das escavadeiras e localização do recurso de carregamento. A figura 4 apresenta as opções de circuito para o despacho antes do cálculo da PL.

Figura 4 - Opções de circuitos antes da PL.



Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

A PL então define um peso (produtividade dos caminhões) para cada circuito possível considerando restrições como barramento, rotas fechadas, etc., que podem tornar

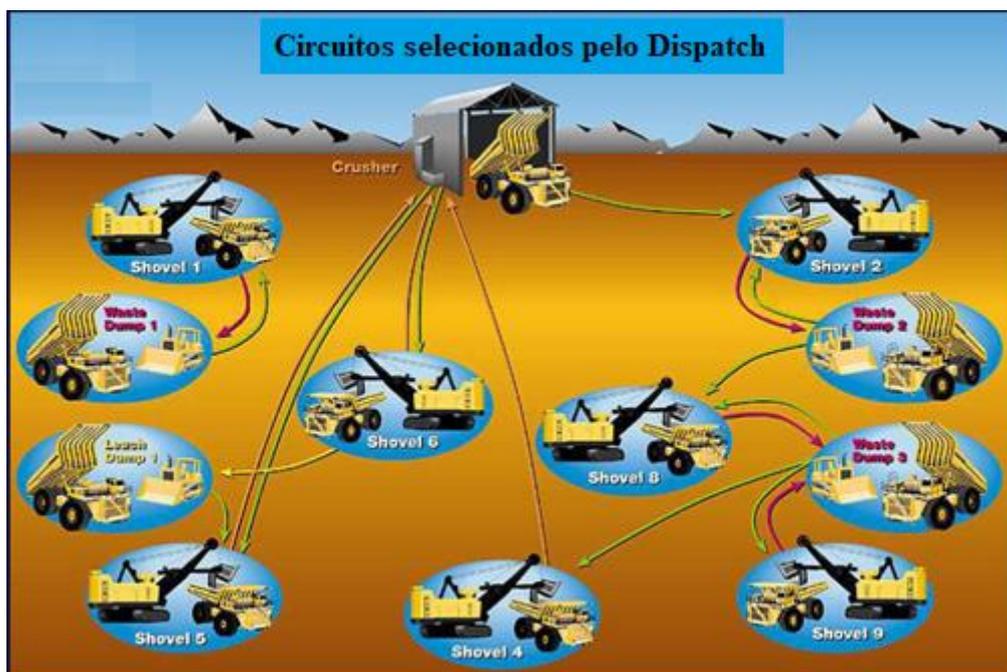
alguns circuitos impossíveis. As equações 4 e 5 mostram o cálculo utilizado pela PL para definir a produtividade dos caminhões para os circuitos cheio e vazio.

$$\text{Produtividade circuito cheio} = \frac{\text{Tamanho do caminhão}}{\text{Tempo de viagem} + \text{Tempo de descarga}} \quad (4)$$

$$\text{Produtividade circuito vazio} = \frac{\text{Tamanho do caminhão}}{\text{Tempo (viagem} + \text{manobra} + \text{carregamento)}} \quad (5)$$

Após ranquear os circuitos possíveis, o algoritmo de programação linear seleciona os circuitos mais produtivos, ou seja, aqueles com menor tempo de viagem e maior taxa de carregamento e aloca para cada um a maior taxa de alimentação possível, considerando as restrições (taxa de escavação, percentual de utilização, taxa de alimentação da britagem, parâmetros de qualidade, etc.) e recursos de transporte disponíveis. Na Figura 5 podem ser vistos os circuitos mais produtivos selecionados pela PL após os cálculos.

Figura 5 - Opções de circuitos selecionados pela PL.



Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

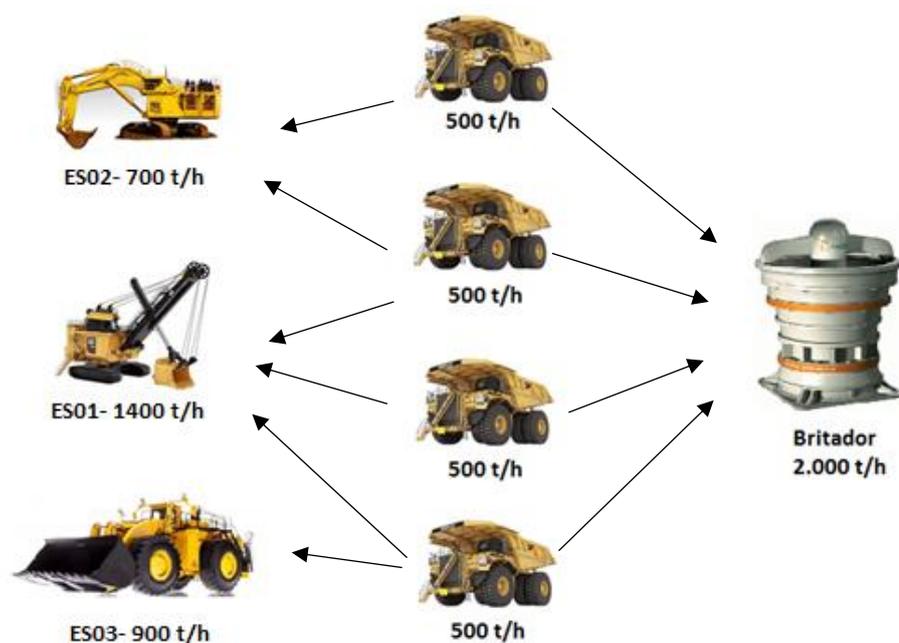
Após isso, o algoritmo calcula o número de caminhões necessários para atingir as taxas de alimentação calculadas para cada circuito (equação 6). O tamanho do caminhão ótimo é definido através de dados históricos e pela relação do tamanho da caçamba *versus*

o tamanho do caminhão, que determina o número de passes necessários para encher o caminhão e, portanto, o tempo de carregamento do circuito.

$$N^{\circ} \text{ de caminhões} = \frac{\text{Taxa de alimentação do circuito} \times \text{Tempo de viagem}}{\text{Tamanho do caminhão ótimo}} \quad (6)$$

Na segunda fase da estratégia de otimização, a programação dinâmica (PD) tenta atingir, em tempo real, as taxas de alimentação dos circuitos de produção calculados pela PL, designando caminhões ótimos (quando possível) para os circuitos. É nessa etapa que são consideradas restrições como barramentos, frente fixa, fechamento de rotas, etc. Na Figura 6 é apresentado um circuito hipotético simplificado com os recursos necessários para atingir as taxas de alimentação calculadas pela PL.

Figura 6 - Circuito otimizado hipotético.



Fonte: Adaptado de COSTA, 2011.

Prioridades influenciam a programação linear em casos onde a mina está sub capacitada de caminhões (operando com menos caminhões do que o número necessário calculado pela programação linear). Nos casos de haver um número igual ou maior de caminhões (sobre capacidade), prioridades não afetam a programação linear, pois existem recursos necessários para programação linear atender a necessidade de todas as

escavadeiras. As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam um ranking fictício de escavadeiras de acordo com as prioridades definidas.

Tabela 1 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se estéril igual a minério.

Estéril igual a Minério		
Material Escavado	Prioridade	Ranking
Minério ou estéril	Alta	1
Minério ou estéril	Normal	2
Minério ou estéril	Baixa	3

Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

Tabela 2 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se minério acima de estéril.

Minério acima de Estéril		
Material Escavado	Prioridade	Ranking
Minério	Alta	1
Minério	Normal	2
Minério	Baixa	3
Estéril	Alta	5
Estéril	Normal	6
Estéril	Baixa	7

Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

Tabela 3 - Ranking das escavadeiras por prioridade utilizada se estéril acima de minério.

Estéril acima de Minério		
Material Escavado	Prioridade	Ranking
Estéril	Alta	1
Estéril	Normal	2
Estéril	Baixa	3
Minério	Alta	5
Minério	Normal	6
Minério	Baixa	7

Fonte: Adaptado de Modular Mining Systems, 2005.

No caso de sub capacitação, algumas escavadeiras podem ficar ociosas ou totalmente inutilizadas pela programação linear. Contudo, o operador do sistema de

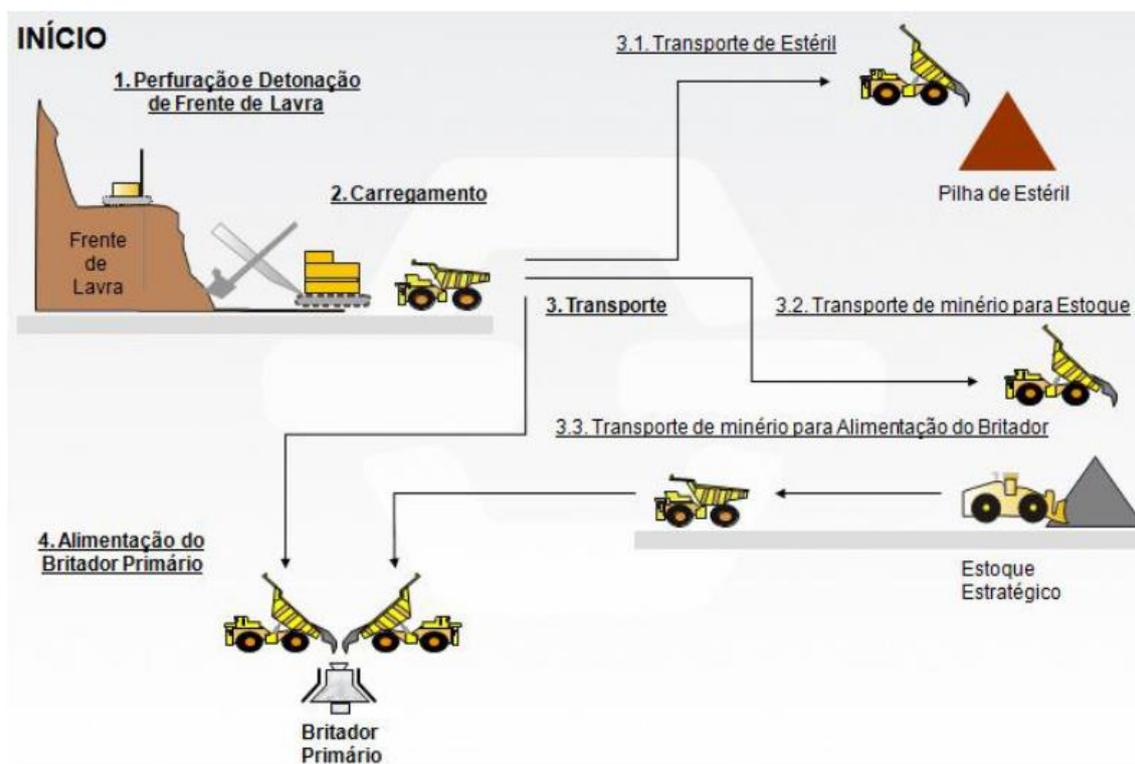
despacho pode alterar quais escavadeiras serão menos utilizadas, geralmente essa “alteração” só é feita para atingir metas de produção e qualidade estabelecendo prioridades.

### 3.3.2 CICLO DE PRODUÇÃO

Segundo Hartman (2002), as atividades de mineração são realizadas de maneira cíclica, usando uma série de etapas fundamentais para transportar o material que está sendo extraído. Essas etapas são chamadas de operações unitárias de mineração, no qual se tem a perfuração, o desmonte, o carregamento e o transporte.

Em minas a céu aberto, as atividades se iniciam com a preparação da área a ser lavrada para que ela possa ser perfurada e detonada. Após a detonação, o equipamento de carga é deslocado para frente de lavra, no local onde o material foi desmontado, e se inicia o processo de carregamento. Os caminhões carregados transportam o material até determinados pontos de descarga: britadores, estoques de minério e pilhas de estéril (FELSCH JÚNIOR, 2014). Em seguida são alocados para uma frente de lavra disponível, onde o ciclo operacional é reiniciado conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Ciclo operacional simplificado das operações unitárias de mina à céu aberto.



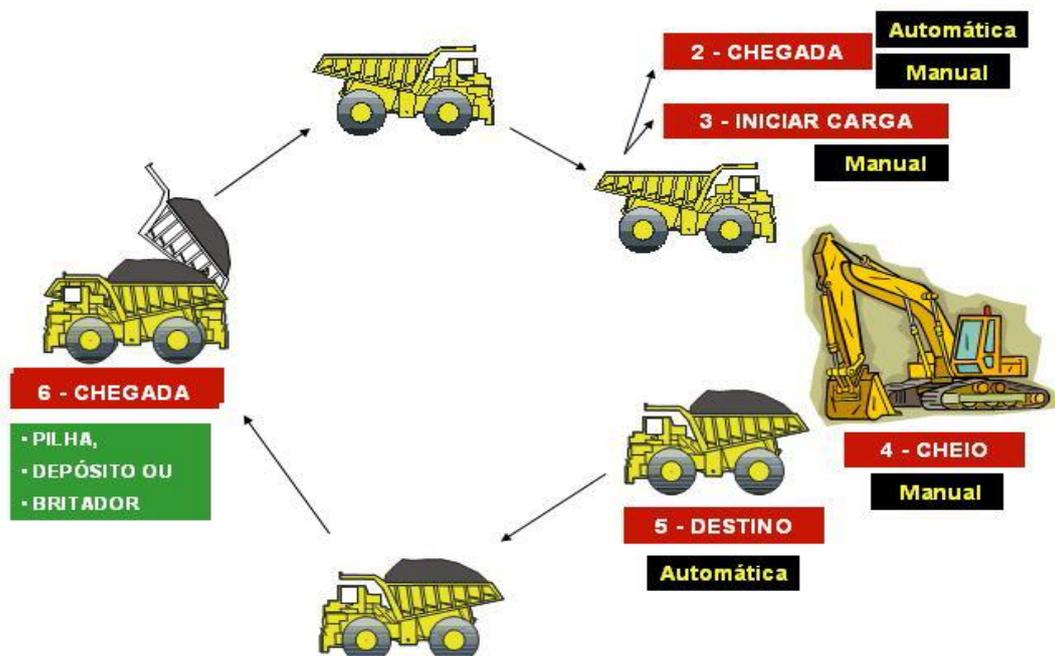
Fonte: FELSCH JUNIOR, 2014.

O processo de transporte por caminhões tem por objetivo deslocar o material desde sua origem na frente de lavra até o seu destino final da mina. O ciclo de produção dos caminhões se inicia na alocação do caminhão para alguma atividade e é realizada pela sala de controle no sistema de despacho. Pode ser realizada uma alocação dinâmica, buscando-se uma otimização de produção através de algoritmos computacionais ou pode ser feita manualmente buscando a fixação da frota em determinada frente de lavra (COUTINHO, 2017).

O sistema de despacho faz todo o monitoramento das atividades dos equipamentos no ciclo de carregamento e transporte ilustrado na Figura 8 e separa estas atividades em tempos. Desta forma é possível atuar nos pontos em que a operação estiver com os tempos acima do estabelecido como meta para determinada atividade. Os tempos do ciclo podem ser divididos em:

- Tempo de manobra;
- Ociosidade das máquinas de carga;
- Tempo de fila dos caminhões;
- Tempo de basculamento;
- Tempos de transporte.

Figura 8 - Ciclo de carregamento e transporte.



Fonte: Modular Mining Systems, 2005.

O tempo de manobra para o caso de não ter nenhum caminhão na escavadeira quando o caminhão chegar é definido como a diferença entre o tempo que o caminhão inicia a carga menos o tempo em que o caminhão chega na escavadeira. Para o caso onde já tenha um caminhão carregando na escavadeira quando o caminhão chega, é definido como a diferença entre o tempo que o caminhão inicia a carga menos o tempo que a escavadeira libera o caminhão cheio que estava sendo previamente carregado.

O tempo de ociosidade das máquinas de carga é definido como a diferença da chegada de um caminhão na máquina e o momento em que ela liberou o caminhão que estava sendo carregado anteriormente. Se os caminhões estão continuamente nas máquinas de carga, então o tempo médio será contado pelo sistema como nulo.

O tempo em fila dos caminhões é definido como a diferença entre o tempo que a escavadeira libera o caminhão previamente carregado menos o tempo em que o caminhão atual chega à escavadeira. Se nenhum caminhão estiver carregando na escavadeira, o tempo médio será contado pelo sistema como nulo.

O cálculo do tempo da manobra do basculamento é uma média da diferença entre o momento da chegada do caminhão no ponto de descarga até o momento em que ele conclui o basculamento, subtraído do tempo de basculamento propriamente dito, (este é definido pelo usuário do sistema), e o pedido de um novo destino para uma máquina de carga.

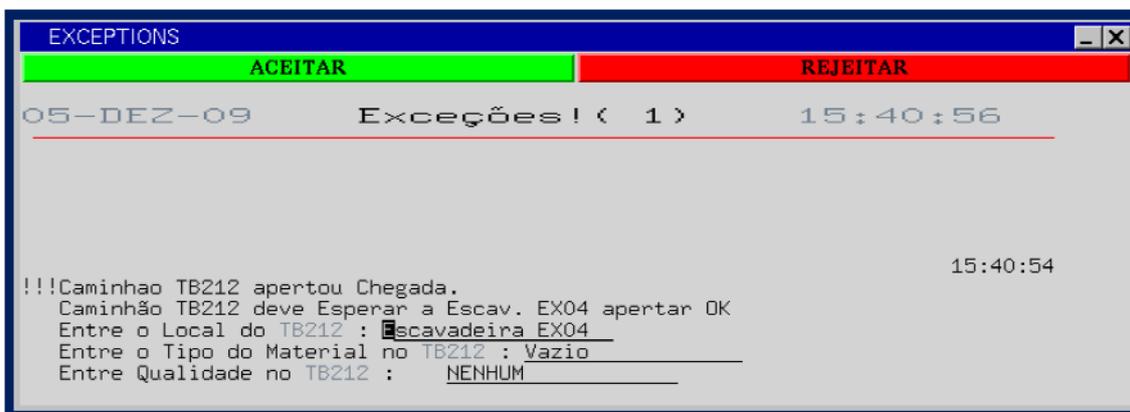
### 3.3.3 EXCEÇÕES GERADAS PELO DESPACHO

Ações realizadas fora da ordem do ciclo de carga e transporte geram exceções no sistema Dispatch que indicam alguma anomalia vinda do campo e alertam o controle operacional para a necessidade do tratamento desta ação. É possível aceitar, rejeitar ou modificar a ação gerada, para que o sistema faça a realocação do equipamento na ação correta do ciclo de carga e transporte.

A tela de exceções (Figura 9) é umas das ferramentas que mais requer a interação do operador de despacho, que é responsável pelo controle operacional do sistema de despacho, pois através dela é possível realizar o tratamento das exceções, receber mensagens do campo e mudanças de estado do equipamento. As exceções aparecem na

tela na ordem cronológica, conforme ocorrerem em campo e é necessário ler e tratar cada uma para que a seguinte apareça na tela.

Figura 9 - Tela de exceções disponível no controle operacional do sistema de despacho.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

As exceções são divididas em cinco categorias: exceções de chegada, exceções de designação, exceções de carga/cheio, exceções de estado, exceções gerais e informativas (não precisam de tratativa). Enquanto o operador do equipamento aguarda a resposta da sua exceção gerada, a mensagem “despachante precisa verificar” aparecerá no computador de bordo do equipamento e é necessário que aguardar a tratativa da ação pelo controle operacional.

Apenas uma exceção é exibida por vez na tela de exceções, as demais são armazenadas em ordem cronológica e um contador registra o número de exceções pendentes em tela. Toda a tratativa (aceite, rejeição ou modificação) dada pelo controle operacional às exceções geradas em campo é armazenada no banco de dados do despacho.

### 3.3.4 BANCO DE DADOS

Segundo Takai et. al (2005), um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD) é uma coleção de programas que permitem aos usuários criarem e manipularem uma base de dados. Um SGBD é, assim, um sistema de software de propósito geral que facilita o processo de definir, construir e manipular bases de dados de diversas aplicações.

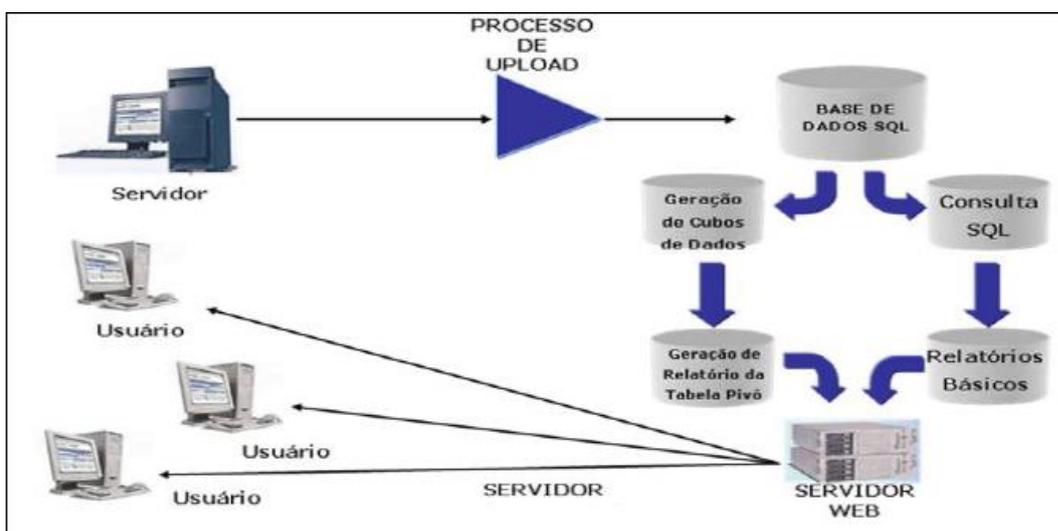
Definir uma base de dados envolve a especificação de tipos de dados a serem armazenados na base de dados. Construir uma base de dados é o processo de armazenar os dados em algum meio que seja controlado pelo SGBD. Manipular uma base de dados indica a utilização de funções como a de consulta, para recuperar dados específicos,

modificação da base de dados para refletir mudanças no mini-mundo (inserções, atualizações e remoções) e geração de relatórios.

- Dados: valor de um campo armazenado, matéria-prima para obtenção de informação;
- Informação: dados compilados e processados de acordo com solicitação de consultas e análises.

Os dados enviados pelos equipamentos que possuem o sistema de despacho são armazenados em um servidor exclusivo, sendo possível realizar consultas frequentes. O banco de dados do sistema de despacho possui vários registros de operação e através de consultas pré-determinadas, desenvolvidas em linguagem SQL, são gerados relatórios sobre os dados coletados para inúmeros propósitos, como controle de custos, consumo de combustíveis, controle de estado dos equipamentos, etc. A Figura 10 demonstra o processo de *upload* do banco de dados.

Figura 10 - Fluxograma simplificado da base de dados do sistema de despacho.



Fonte:

FELSCH JÚNIOR, 2014.

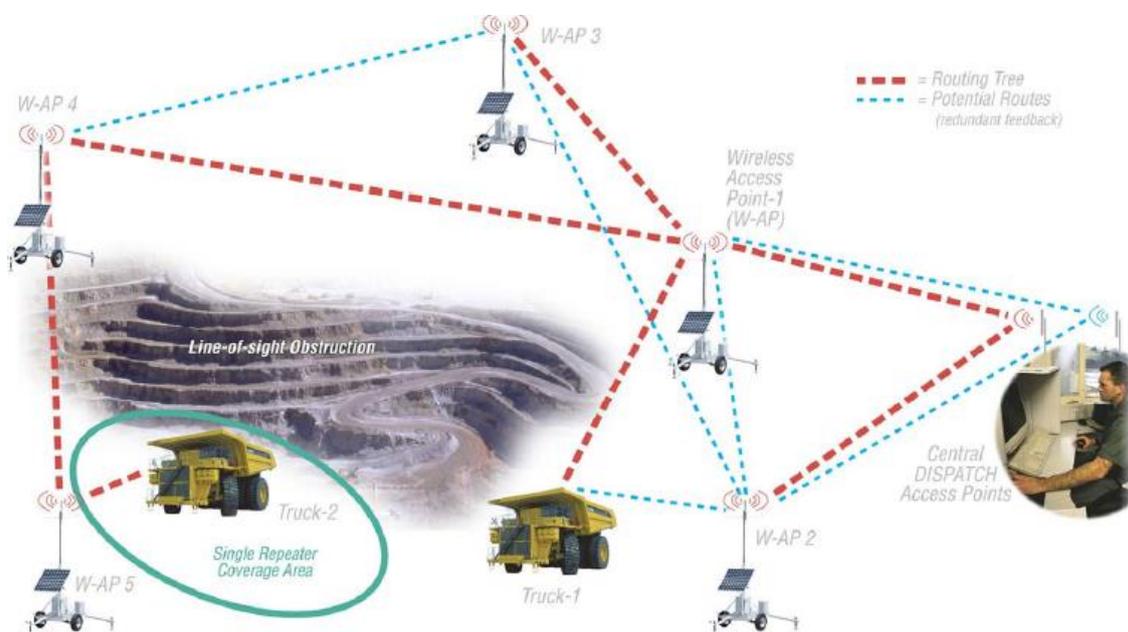
### 3.3.5 COMUNICAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES

O sistema Dispatch consta de um conjunto central de computadores responsável pelos cálculos de otimização da movimentação, uma rede de telecomunicação via wireless com taxas de dados de alta velocidade, *hardwares* produzidos especialmente

para o ambiente de mineração e consoles gráficos de bordo instalados nos equipamentos de mina.

A rede é composta por *hardwares* de processamento e conversão de dados (antenas repetidoras móveis, *access points*, *links* secundários) que são responsáveis pela distribuição do sinal de rádio na mina. Pela Figura 11 é possível ter uma visão geral da rede de comunicação da mina e interação entre equipamentos e *hardwares*. A atualização da posição de cada equipamento de mina é realizada através de receptores GPS (*Global Positioning System*) instalados em pontos estratégicos dos equipamentos e a informação é transmitida ao computador central na sala de controle por meio de sinal de rádio.

Figura 11 - Vista geral de rede de telecomunicação via wireless na mina.



Fonte: Modular Mining Systems, 2004.

Para distribuição do sinal em toda a mina são utilizadas antenas repetidoras fixas e móveis que permitem a distribuição rápida e maior mobilidade de cobertura na mina. Também são instaladas antenas de rádio (Figura 12) nas laterais do equipamento para receber o sinal distribuído.

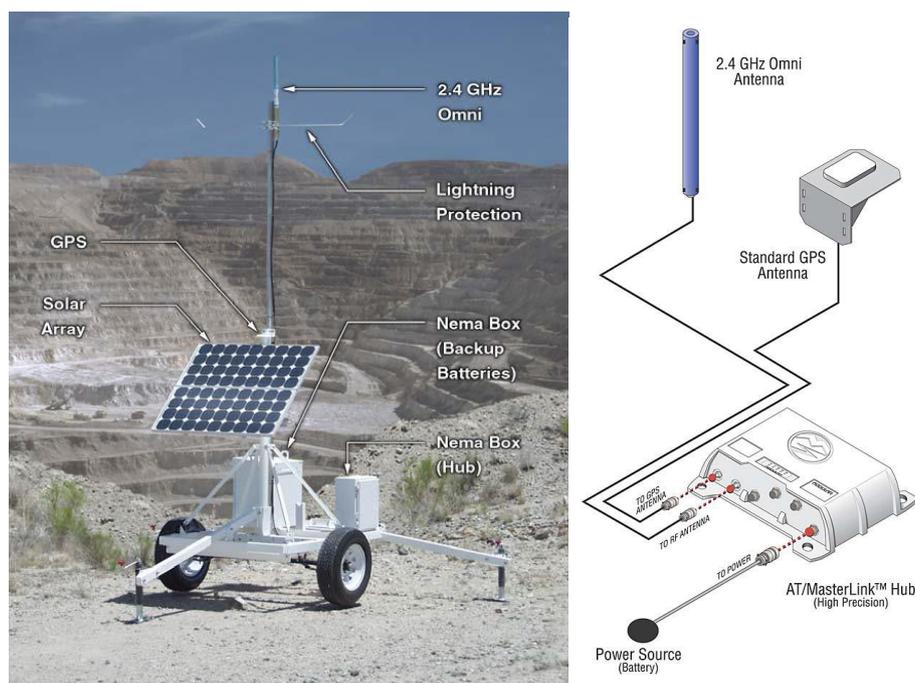
Figura 12 - Rádio antena instalada na lateral dos equipamentos.



Fonte Modular Mining Systems, 2004.

Para garantir uma cobertura total em todas as regiões da mina, existem repetidoras posicionadas em locais estratégicos. No entanto, como os equipamentos se deslocam livremente pelas diversas regiões da mina, o canal de comunicação destes com a central devem ser sempre ajustados de acordo com a região onde se encontra. Este constante monitoramento de canais dos equipamentos é feito automaticamente pelo sistema, onde comandos da central são enviados aos equipamentos quando estes são detectados nos pontos de transição entre as regiões da mina.

Figura 13 - Modelo de antena repetidora móvel de campo MasterLink.



Fonte: Modular Mining Systems, 2004.

A interação entre o sistema e operador se dá por um terminal local instalado dentro da cabine do equipamento, que é um display gráfico colorido com tela *touchscreen* (Figura 14) e possibilita ao operador receber instruções do sistema, assim como também retornar informações.

Figura 14 - Computador de bordo do sistema Dispatch.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

Para interagir com o sistema de despacho, o operador possui acesso a várias funcionalidades disponíveis no computador de bordo, conforme Figura 15.

Figura 15 - Tela de interação entre operador e sistema de despacho.

Ações	Estados	Opções	Ações	Estados	Opções
				Olá A DISPATCH Pré-Início Completo – Obrigado	
Please Log On	Welcome to Intellimine		Próx.: Chegada	NORTE2-245	
		Hora:	ScrnCntr	Descargas: 0	Hora:

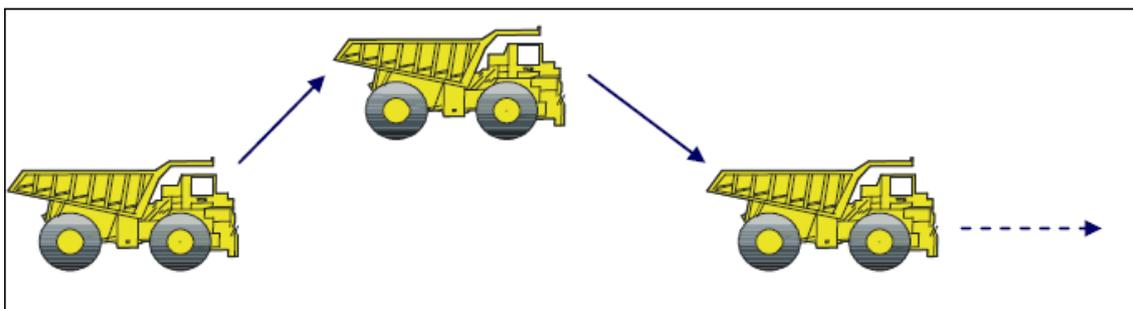
Fonte: Autor, 2019.

As funcionalidades do menu “Ações” são referentes a identificação do operador, inspeção do equipamento e funções de continuidade do ciclo. De especial importância para este trabalho são as funções de continuidade do ciclo descritas a seguir, pois a partir

das apropriações de tempo feitas pelo operador são definidos e calculados os tempos do ciclo de carregamento e transporte, previamente detalhados no item 3.3.2 deste trabalho.

- Destino: ação em que o operador do caminhão é capaz de solicitar um destino, uma designação para um local de carregamento (Figura 16);

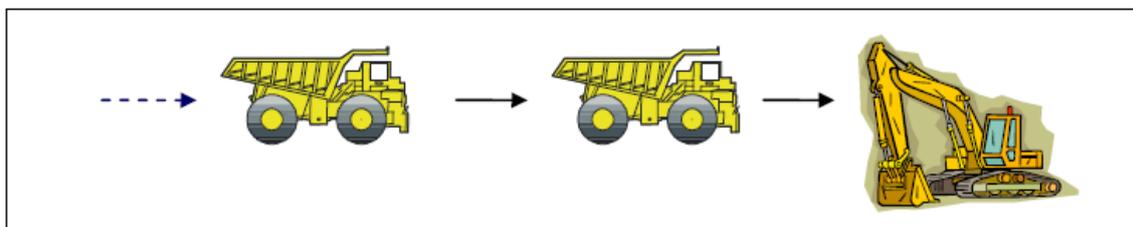
Figura 16 - Início do ciclo e solicitação de destino pelo operador.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

- Chegada: o operador do caminhão é capaz de informar ao sistema a chegada no local onde foi destinado (Figura 17);

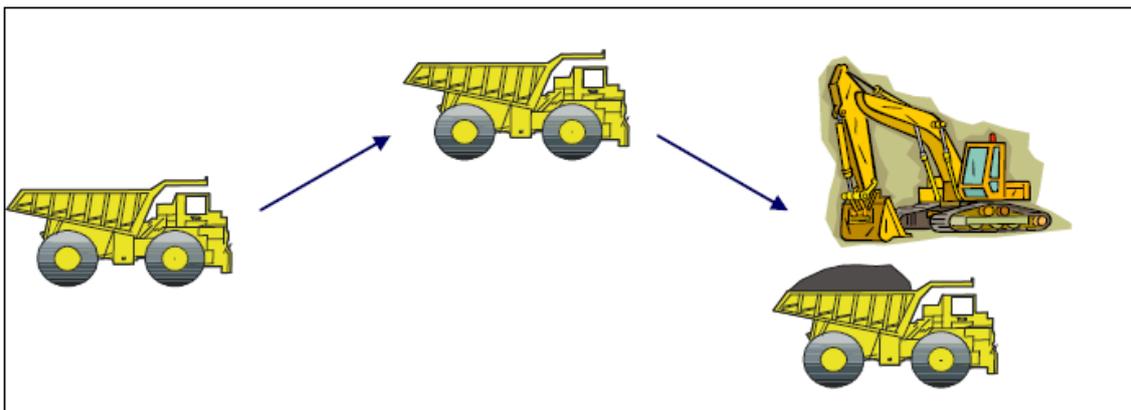
Figura 17 - Chegada no destino de carregamento.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

- Carregamento: o operador do caminhão informa ao sistema a “primeira caçambada”, o início do carregamento na escavadeira ou pá mecânica (Figura 18). O início de carregamento no caminhão pode ser detectado automaticamente através da interface de carga com a balança do caminhão.

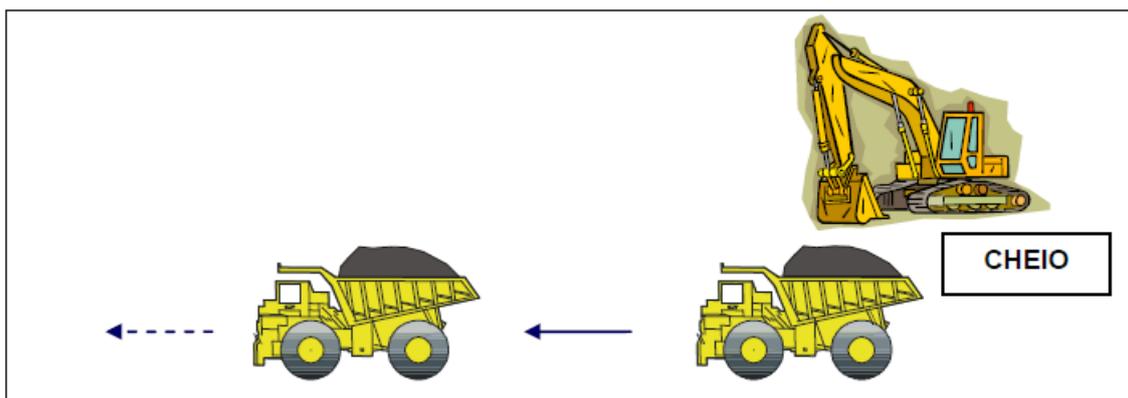
Figura 18 - Início de carregamento.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

- Cheio: ação usada pelo operador o equipamento de carga para finalizar o carregamento do caminhão e liberá-lo para um local de basculamento (Figura 19).

Figura 19 - Término de carregamento.



Fonte: Modular Mining Systems, 2010.

### 3.3.6 INTEGRIDADE DE DADOS

Para atingir o sucesso em qualquer negócio, a tomada de decisões deve ser baseada no desempenho do negócio e onde são necessárias melhorias no processo. Com os últimos desenvolvimentos em tecnologia, é possível monitorar continuamente as várias atividades dos equipamentos, gravando e armazenando seus indicadores de desempenho em bancos de dados, visando a centralização de dados e integração para uma análise mais elaborada (CORONADO e TENORIO, 2015).

Werkema (2014) define que os dados representam a base para a tomada de decisões confiáveis durante a análise de qualquer problema. Grandes operações mineiras

utilizam informações extraídas do banco de dados do sistema de despacho para a elaboração de relatórios de produção e indicadores de mina como, por exemplo, custos, consumo de insumos, produtividade, utilização e disponibilidade física de equipamentos, entre outros.

Segundo White e Olson (1986), para que o sistema de despacho seja completo é importante que o sistema de monitoramento dos equipamentos seja preciso e confiável, de modo que as operações da mina possam ser otimizadas em tempo real. No que se refere à coleta de dados, o sistema recebe continuamente, consulta e armazena dados para atualizar registros, tomar decisões e gerar relatórios.

Segundo Costa e Ganga (2010) o software Dispatch fornece dados históricos com alto nível de confiabilidade e o banco de dados disponibilizado pelo sistema possibilita um melhor gerenciamento da mina. Entretanto, este trabalho analisa a confiabilidade dos dados coletados em tempo real pelo sistema e aplicado para inúmeros fins, bem como avalia possíveis distúrbios operacionais que possam comprometer a confiabilidade desses dados.

Neste trabalho, a integridade de dados é definida como a confiabilidade das informações geradas durante o ciclo operacional da mina e que servem como dados de entrada para a tomada de decisões do algoritmo de otimização do sistema de despacho e geração de inúmeros relatórios de indicadores operacionais.

## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre a metodologia aplicada para execução das simulações propostas para este trabalho e esclarecimento quanto às premissas e simplificações realizadas para os cenários avaliados.

### **4.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS**

As simulações desenvolvidas neste trabalho serão realizadas através de dois simuladores distintos, os quais foram definidos através da aplicabilidade oferecida por cada software. O sistema de despacho da mina do Sossego possui uma utilidade própria de simulação desenvolvida com os mesmos algoritmos de otimização do sistema de despacho que, por esse motivo, foi utilizado para avaliar o potencial de ganhos através de uma operação otimizada do sistema.

Já para a avaliação da integridade de dados, o simulador Dispatch não é aplicável uma vez que não permite a manipulação dos tempos de ciclo, que devem ser variados nos cenários simulados para a avaliação da interferência da integridade destes na performance de produção da mina. Dessa forma o Arena Simulation foi o software escolhido para representar os cenários de integridade de dados, por apresentar interface amigável e por permitir a entrada dos dados avaliados.

Foram feitas simplificações gerais para ambos os softwares de modo a minimizar a quantidade de dados de entrada, uma vez que se trata de uma operação complexa com muitas variáveis executadas e armazenadas pelo sistema de despacho. O período escolhido para as simulações foi replicado nos simuladores com dados de entrada e configurações mais próximas do real executado na mina e servirá como cenário base de comparação para os outros cenários simulados.

#### **4.1.1 CENÁRIOS DE OTIMIZAÇÃO**

Para avaliar o potencial de ganhos através da operação otimizada do sistema de despacho, serão realizadas simulações para um cenário fixo e um cenário otimizado utilizando o simulador do próprio sistema Dispatch. Para esse software é possível coletar todos os dados de um turno já ocorrido na mina e replicar para o simulador, alterando apenas as variáveis que se deseja avaliar.

Apenas as informações armazenadas para um turno foram coletadas devido ao volume de dados e variáveis a serem replicados para os cenários simulados. Para esse trabalho, algumas simplificações foram feitas nas configurações do turno para facilitar a replicação para os cenários simulados:

- Serão consideradas apenas as frotas de grande porte CAT 793C/D e CAT 785C que são responsáveis pelo maior volume de produção na mina atualmente;
- Todos os caminhões utilizados na simulação serão 100% abastecidos, não havendo paradas para abastecimento durante a simulação;
- A função de auto aceitação de exceções será habilitada, assim o próprio simulador aceita as exceções automaticamente.

Apesar dessas simplificações, a simulação é considerada muito detalhada devido à quantidade de dados do turno disponíveis no sistema de despacho e que são replicados na simulação. Para a simulação de otimização, as variáveis manipuladas são as frentes-fixas, barramentos e configurações da PL, que é o algoritmo que calcula a solução ótima de otimização.

Para o cenário fixo, os equipamentos de transporte serão distribuídos em frente-fixa de carregamento e basculamento, simulando a ausência de um sistema de alocação dinâmica. Já para o cenário otimizado, os equipamentos de transporte serão distribuídos entre os equipamentos de carga de acordo com a solução ótima encontrada pelo algoritmo de otimização do Dispatch, não havendo interferências durante a tomada de decisão.

#### 4.1.2 CENÁRIOS DE INTEGRIDADE DE DADOS

Para a simulação da integridade dos dados, dois cenários serão simulados: um com dados de tempo de ciclo íntegros e outro com dados não-íntegros. Assim como nas simulações de otimização, os dados de entrada foram coletados de um período realizado escolhido e replicados para ambos os cenários simulados, buscando se aproximar ao máximo da realidade operacional da mina. Nessa simulação, os equipamentos de grande e pequeno porte foram incluídos, uma vez que as frotas de pequeno porte têm grande participação na definição da integridade de dados do sistema.

Para o cenário considerado não-íntegro, os dados de entrada para os tempos de ciclo serão definidos através da média executada para cada tempo durante o período

escolhido. Já para o cenário considerado íntegro, os tempos do ciclo serão definidos após análise e tratamento dos dados.

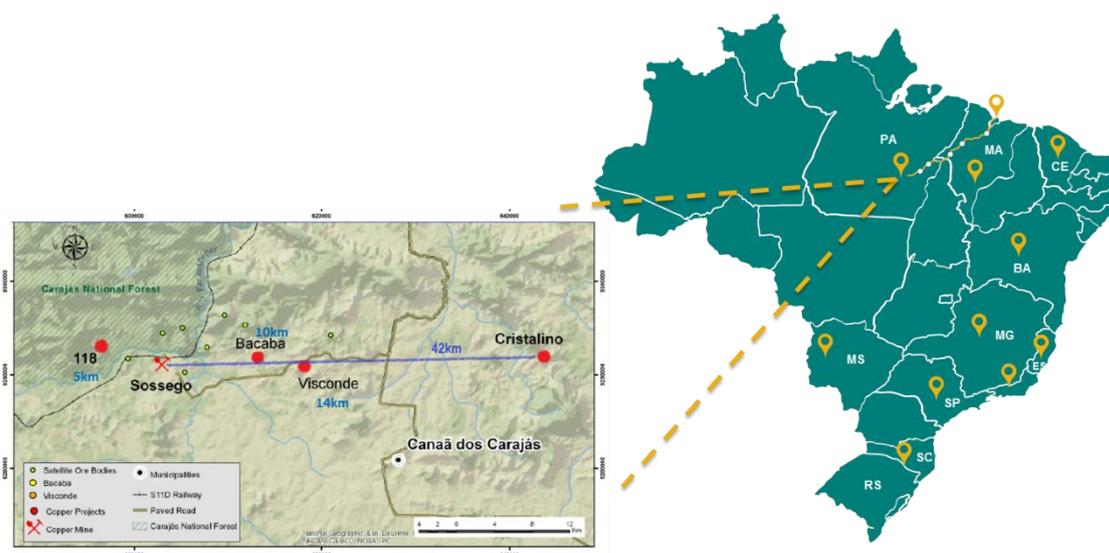
Assim como nas simulações de otimização, também foi necessário realizar algumas simplificações para os cenários de integridade devido à complexidade da operação e volume de variáveis. Para os cenários de integridade de dados, as seguintes premissas foram definidas:

- Apenas as rotas mais produtivas da mina foram replicadas para a simulação devido à quantidade de rotas atualmente disponíveis na operação, mas que não são frequentemente utilizadas;
- Eventos de parada no turno (abastecimento, revezamento para refeição, paradas operacionais, etc.) foram definidos através das informações coletadas no despacho e replicados como taxa de saída de caminhões na mina;
- Movimentações de remanejamento foram desconsideradas devido à baixa contribuição para a produção da mina e diversidade de locais de carregamento e basculamento na mina.

## **4.2 ESTUDO DE CASO: MINA DO SOSSEGO**

A Mina do Sossego foi a primeira mina de cobre operada pela Vale e sua lavra teve início em 2004. Está localizada no sudeste do estado do Pará, a 20 km da sede do município de Canaã dos Carajás (Figura 20) e encontra-se inserida no contexto da Província Mineral de Carajás, uma das maiores províncias minerais do mundo, que apresenta jazidas de ferro, manganês, níquel, cobre, ouro, estanho, bauxita e caulim.

Figura 20- Localização da Mina do Sossego na Província Mineral de Carajás.



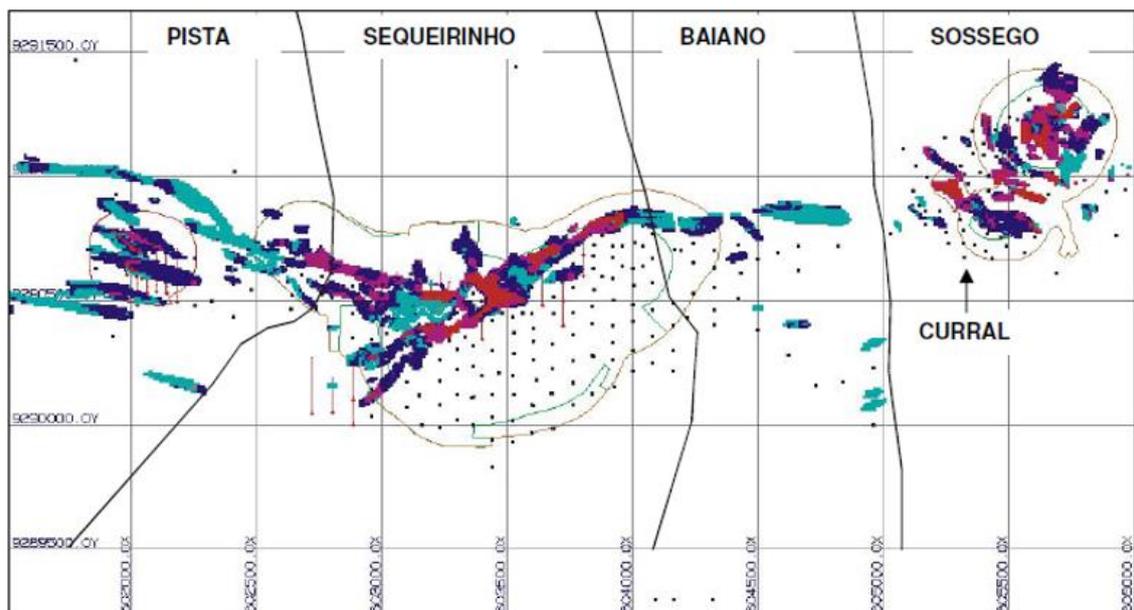
Fonte: Autor, 2019.

Segundo Carvalho (2009), o depósito de Sossego insere-se em um cinturão de mineralizações de Cu-Au com cerca de 60 km de extensão, ao longo das Serras Sul e do Rabo da Província Mineral de Carajás do qual fazem parte os depósitos Cristalino e alvo 118, além de outros alvos menores como Bacaba, Jatobá, Visconde, Bacuri, Castanha e Ipê.

Estes alvos estão em diversos níveis de pesquisa e desenvolvimento e, se viáveis, irão compartilhar a unidade de concentração existente nesta mina, aumentando a vida útil do projeto. Por se tratar de uma unidade com potencial extensão da vida útil, é relevante estudar e propor melhorias operacionais que possam ser aplicadas nos projetos futuros, garantindo eficiência e performance produtiva do ciclo operacional.

Na mina do Sossego, a mineralização está disposta em um conjunto de cinco corpos de minério: Pista, Sequeirinho, Baiano, Sossego e Curral (Figura 21), porém apenas os corpos Sequeirinho, Sossego e Pista estão sendo lavrados atualmente.

Figura 21- Limite dos corpos de minério no depósito de Sossego.



Fonte: Carvalho, 2009.

Segundo relatório divulgado pela Vale no New York Stock Exchange em abril de 2017, as reservas provadas do complexo Sossego são 101,5 Mt @ 0,64% Cu e 0,2g/t Au. Nesse mesmo ano a unidade lavrou 12,5 Mt de minério bruto (ROM) e a produção da planta de beneficiamento foi de 376 mil toneladas de concentrado de cobre com teor médio de 30% de cobre.

#### 4.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OPERAÇÃO

A mina do Sossego possui três depósitos principais, Sossego, Sequeirinho e Pista, em lavra atualmente, cuja geometria atual das cavas é apresentada na Figura 22. O minério de cobre é explorado pelo método de cava a céu aberto e o ROM, majoritariamente proveniente das cavas Pista e Sequeirinho, é processado por meio de britagem primária, moagem SAG seguida por moagem de bolas e flotação direta. O concentrado final é transportado por caminhões rodoviários até o terminal de armazenamento em Parauapebas e, posteriormente segue pela Estrada de Ferro Carajás até o terminal marítimo Ponta da Madeira (MA), de onde é exportado.

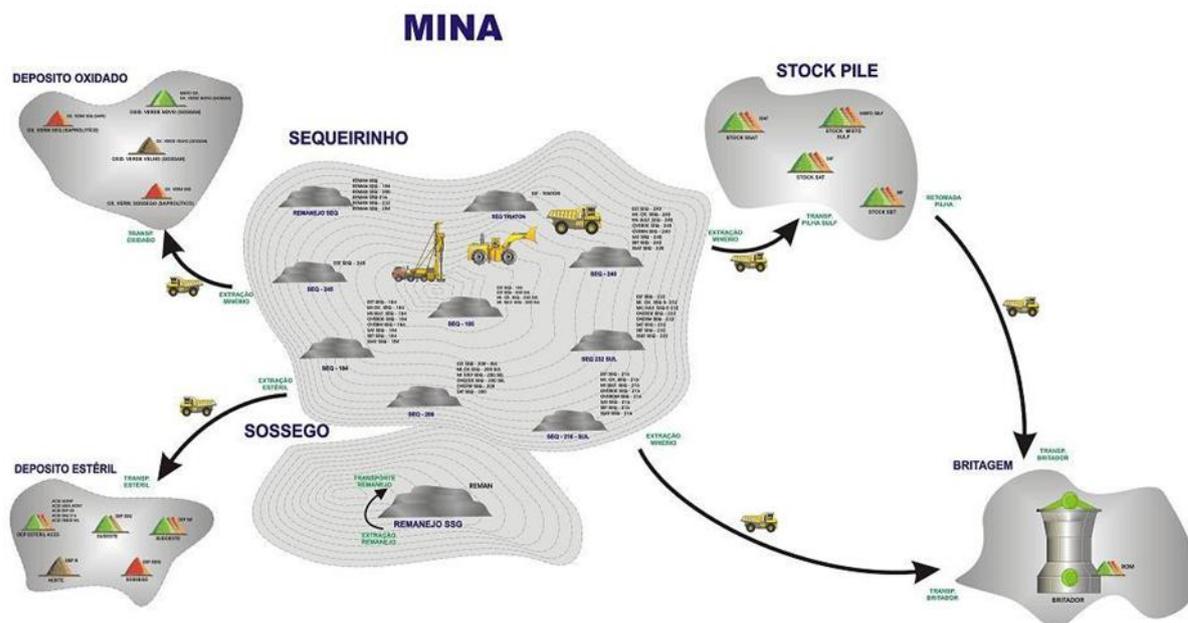
Figura 22- Imagem de satélite da Mina do Sossego.



Fonte: Google Earth, 2017.

A lavra na mina do Sossego é feita através das operações unitárias básicas em minas a céu aberto que são: perfuração e desmonte, carregamento e transporte. As operações de lavra são controladas pelo sistema Dispatch que faz a alocação dinâmica dos equipamentos de transporte e controla configurações de entrada como o *match* escavadeira-caminhão, que tem influência direta na produtividade do circuito de produção. A Figura 23 ilustra o fluxo de movimentação da mina, destacando o envio de minério ao britador primário, pilhas de estoque de minérios e depósitos de estéril, oriundos das cavas em operação.

Figura 23- Esquema de movimentação da Mina do Sossego



Fonte: Arquivo técnico da Mina do Sossego, 2018.

A perfuração conta com uma frota mista de perfuratrizes de 12 ¼” de diâmetro para produção, sendo que em desmonte controlado de delineação de talude final, são usados diâmetros de 10 5/8” e 6 ½”. Para carregamento e escavação, a mina adotou a conveniência de uso de escavadeira hidráulica nos materiais saprolíticos, combinando escavadeiras a cabo e pás carregadeiras na lavra de materiais mais competentes e ainda escavadeiras de pequeno porte para carregamento dos caminhões de pequeno porte.

O transporte é feito através de caminhões fora de estrada de 150 e 240 toneladas e ainda caminhões rodoviários e articulados de pequeno porte, adquiridos nos últimos anos devido à necessidade de lavra em cotas profundas com praças de lavra estreitas. Equipamentos auxiliares dão suporte às operações realizando manutenção das frentes de lavra, acessos e depósitos de estéril e de estocagem de minério. A frota de infraestrutura é composta principalmente por tratores de esteira e de pneus, motoniveladoras, retroescavadeiras, pás mecânicas e caminhões pipa. A Tabela 4 apresenta um resumo das principais frotas de produção disponíveis na mina do Sossego.

Tabela 4 - Sumário de frotas da Mina do Sossego.

<b>Equipamento</b>	<b>Tipo</b>	<b>Frota</b>	<b>Unidades</b>
<b>Transporte</b>	Caminhões Fora de Estrada	CAT 793C/D	28
		CAT 785C	12
	Caminhões Articulados	CAT 740A	8
	Caminhões Rodoviários	Mercedes 4844K	13
<b>Escavação</b>	Escavadeiras Elétricas	PH-4100 XPB	1
		Buc 495-HR	2
		PH-2300 XPA	1
	Escavadeiras Hidráulicas	PC5500	1
		PC2000	1
<b>Carregamento</b>	Carregadeiras	WA1200	2
<b>Perfuração</b>	Perfuratrizes Pré-Corte	Cubex DR560	3
		T4	1
	Perfuratrizes Produção	Pit Viper	4
		Buc 49HR	3

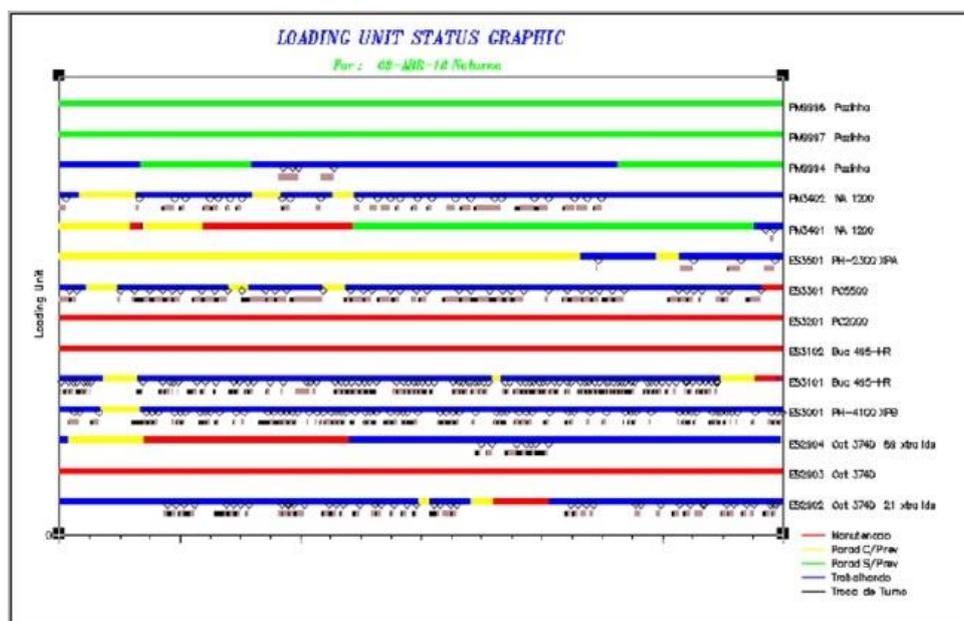
Fonte: Autor, 2019.

O projeto opera em dois regimes de trabalho, administrativo e turno, que operam em horários distintos. O horário administrativo é de 08h às 17h e o regime de turno, no qual trabalham os operadores dos equipamentos de mina e operadores de despacho, é dividido em 3 períodos: noturno de 00h às 06h, diurno de 06h às 15h e tarde de 15h às 00h.

#### 4.2.2 SIMULAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO

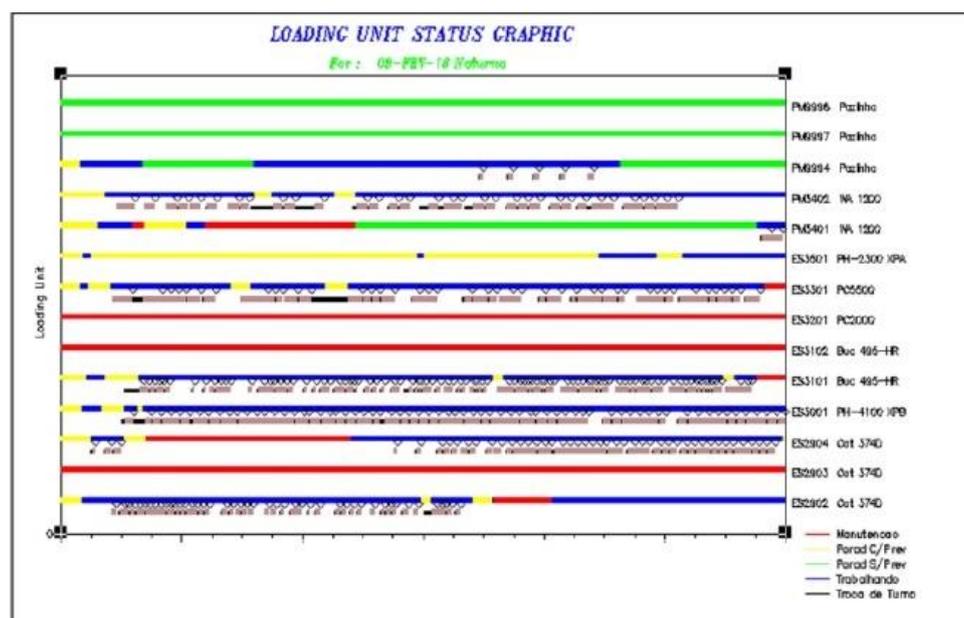
Para as simulações utilizando o software Dispatch, o período escolhido foi o turno noturno do dia 09 de abril de 2018. Eventos de paradas para todos os equipamentos de carregamento e transporte e ações como incapacitação de máquinas, mudanças de locais, mudanças de material, variação da utilização das máquinas e barramentos foram replicados para a simulação. Isso significa que os equipamentos estão aptos/parados/manutenção nos cenários de simulação, exatamente no mesmo período que o turno real, como é possível verificar nas Figura 24 (turno real) e Figura 25 (turno replicado).

Figura 24 - Sumário de estado dos equipamentos para turno real.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 25 - Sumário de estado dos equipamentos para turno replicado.



Fonte: Autor, 2019.

Os equipamentos de transporte foram distribuídos de acordo com cada cenário da simulação previsto, conforme Figura 26 e Figura 27. Na Figura 26 verifica-se a alocação estática dos caminhões para o cenário fixo, sendo a coluna “dump lock” os locais fixos de basculamento e a coluna “trucks locked to shovel”, os caminhões fixos por equipamento de carga.

Figura 26 - Distribuição de equipamentos para o cenário fixo.

DISPATCH LOCK Utility

Unlock all Trucks from Shovels? NÃO      Unbar All Trucks? NÃO  
 Unlock all Trucks from Dumps? NÃO      Lock Summary Report? NÃO  
 Lock all Trucks to Shovels? NÃO      Grade Bar Utility? NO

Shovel	Dump Lock	Trucks Locked To Shovel									
ES3001	Pilha de Estoque SUL	CM4009	CM4011	CM4012	CM4014	CM4018					
ES3101	Deposito NCE 260	CM4024	CM4027	CM4028	CM4033	CM4034	CM4035	CM4036	CM4037	CM4038	
ES3102	Deposito NCE_260										
ES3201	Deposito NCE_260										
ES3301	Britador BRITADOR	CM4039	CM4040	CM4041	CM4042						
ES3501	Britador BRITADOR	CM4112	CM4114								

Truck Bar Form

Truck	Dump Lock	Barred Shovels	Barred Materials
CM4009	NENHUM		
CM4011	NENHUM		
CM4012	NENHUM		
CM4014	NENHUM		
CM4016	NENHUM		
CM4018	NENHUM		

Press ! to get to TOP WINDOW, @ to get to LOWER WINDOW, or PF4 to EXIT

Fonte: Autor, 2019.

Já para o cenário otimizado onde se deseja avaliar a performance do sistema utilizando os recursos de otimização disponíveis e sem interferências na tomada de decisão, não há alocação fixa por local ou equipamentos de carga. A decisão de alocação dos recursos de transporte é feita pelo algoritmo do sistema e, por esse motivo, a coluna “trucks locked to shovel” na Figura 27 não foi preenchida.

Figura 27 - Distribuição de equipamentos para o cenário otimizado.

DISPATCH LOCK Utility

Unlock all Trucks from Shovels? NÃO      Unbar All Trucks? NÃO  
 Unlock all Trucks from Dumps? NÃO      Lock Summary Report? NÃO  
 Lock all Trucks to Shovels? NÃO      Grade Bar Utility? NO

Shovel	Dump Lock	Trucks Locked To Shovel									
ES2902	Remanejamento Interno REM										
ES2903	Deposito N_240_SAP										
ES2904	Deposito MIRANTE_260										
ES3001	Pilha de Estoque SUL										
ES3101	Deposito NCE_260										
ES3102	Deposito NCE_260										

Truck Bar Form

Truck	Dump Lock	Barred Shovels	Barred Materials
CM4009	NENHUM		
CM4011	NENHUM		
CM4012	NENHUM		
CM4014	NENHUM		
CM4016	NENHUM		
CM4018	NENHUM		

Press ! to get to TOP WINDOW, @ to get to LOWER WINDOW, or PF4 to EXIT

Fonte: Autor, 2019.

Os parâmetros da PL foram desabilitados para o cenário fixo (Figura 28) pois os recursos de otimização do sistema não serão utilizados. No entanto, os parâmetros permanecem habilitados no cenário otimizado, pois procura-se avaliar os resultados obtidos através da utilização dos recursos de otimização disponíveis no sistema de despacho da Mina do Sossego (Figura 29).

Figura 28 - Parâmetros da PL para cenário fixo.

Allow UNUSED Shovels in Undertrucked Situations (LPMATCHTRUCKS):	NO
Use Global Truck Productivity Objective:	NO
Proportionally Share Materials Dumping Capacities among Shovels:	NO
Allow Truck Flows Between Ore and Waste Circuits:	NO
Treat Shovel-to-Dump Locks as Two-Way Locks:	NO
Equally Divide a Shovel's Production Rate (Dig) among its Splits:	NO
Use Global Material Priority:	Minério Igual a Esteril

Fonte: Autor, 2019.

Figura 29 - Parâmetros da PL para cenário otimizado.

Allow UNUSED Shovels in Undertrucked Situations (LPMATCHTRUCKS):	YES
Use Global Truck Productivity Objective:	YES
Proportionally Share Materials Dumping Capacities among Shovels:	NO
Allow Truck Flows Between Ore and Waste Circuits:	YES
Treat Shovel-to-Dump Locks as Two-Way Locks:	NO
Equally Divide a Shovel's Production Rate (Dig) among its Splits:	NO
Use Global Material Priority:	Minério Acima de Esteril

Fonte: Autor, 2019.

#### 4.2.3 SIMULAÇÃO DE INTEGRIDADE DE DADOS

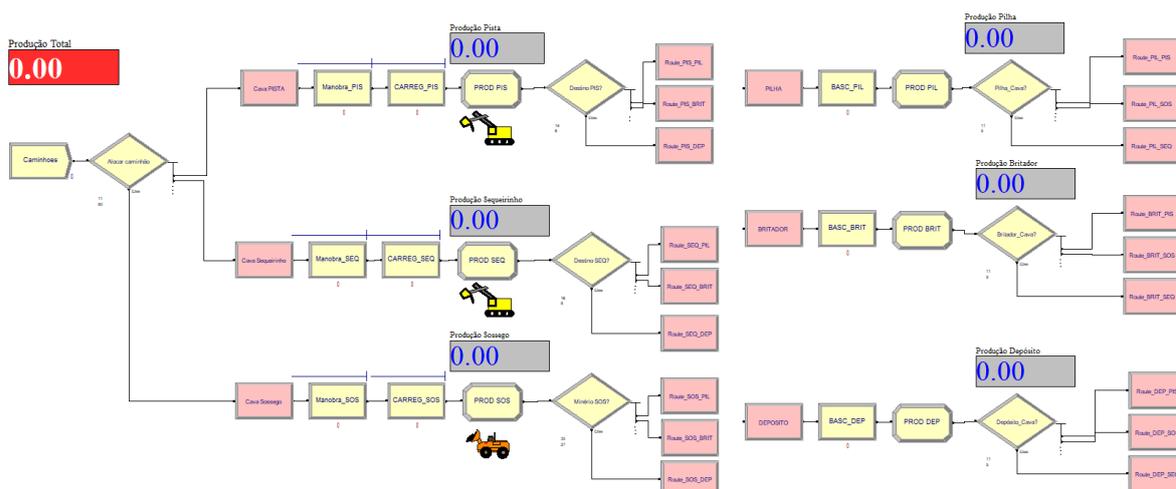
O período escolhido para replicação nos cenários de simulação para avaliação da integridade de dados foi o mês de abril de 2018, conforme previamente utilizado para a simulação de otimização. Para estes cenários será utilizado o software Arena Simulation versão 15.1 com as seguintes premissas:

- Os locais de basculamento de pilha e depósito foram agregados em uma pilha e um depósito de forma a simplificar a realização da simulação;
- A carga média utilizada foi a média dos dados de carga registrados pelo despacho para caminhões com balança em bom funcionamento;
- Foi adotada a distribuição normal para os tempos de ciclo avaliados;

- A probabilidade de alocação do destino dos caminhões foi definida conforme os dados realizados no referido período.

A Figura 30 apresenta a lógica do modelo construído para a simulação no software Arena, replicando as cavas e locais de basculamento de referência para o período.

Figura 30 - Lógica do modelo de simulação no software Arena.



Fonte: Autor, 2019.

Para a realização da simulação para os cenários de integridade de dados, foi feita a coleta dos tempos de ciclo realizados no banco de dados da mina. Esses dados foram então distribuídos numa curva normal com auxílio do software de análise estatística Minitab 18.1 para definição dos dados de entrada para cada cenário simulado.

#### 4.2.3.1 CENÁRIO NÃO-ÍNTEGRO

Para a simulação do cenário considerado não-íntegro, os dados coletados no banco de dados do sistema foram distribuídos em curva normal e o resumo dos tempos de ciclo utilizado para simulação do cenário não-íntegro é apresentado na Tabela 5 e Tabela 6, por local de carregamento e basculamento, respectivamente.

Tabela 5 - Resumo de tempos de ciclo por local de carregamento.

Dados de tempos de ciclo	Cava Sequeirinho		Cava Sossego		Cava Pista	
	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Tempo de Carregamento (min)	2.17	1.70	2.90	2.00	1.83	1.62
Tempo de Manobra (min)	1.19	1.05	1.24	1.24	1.15	1.07
Rota carregado para Pilha (min)	16.18	4.93	19.58	5.20	15.39	4.78
Rota carregado para Depósito (min)	12.44	4.63	12.50	4.33	11.35	4.15
Rota carregado para Britador (min)	5.89	5.96	9.99	8.05	9.00	7.20

Fonte: Autor, 2019.

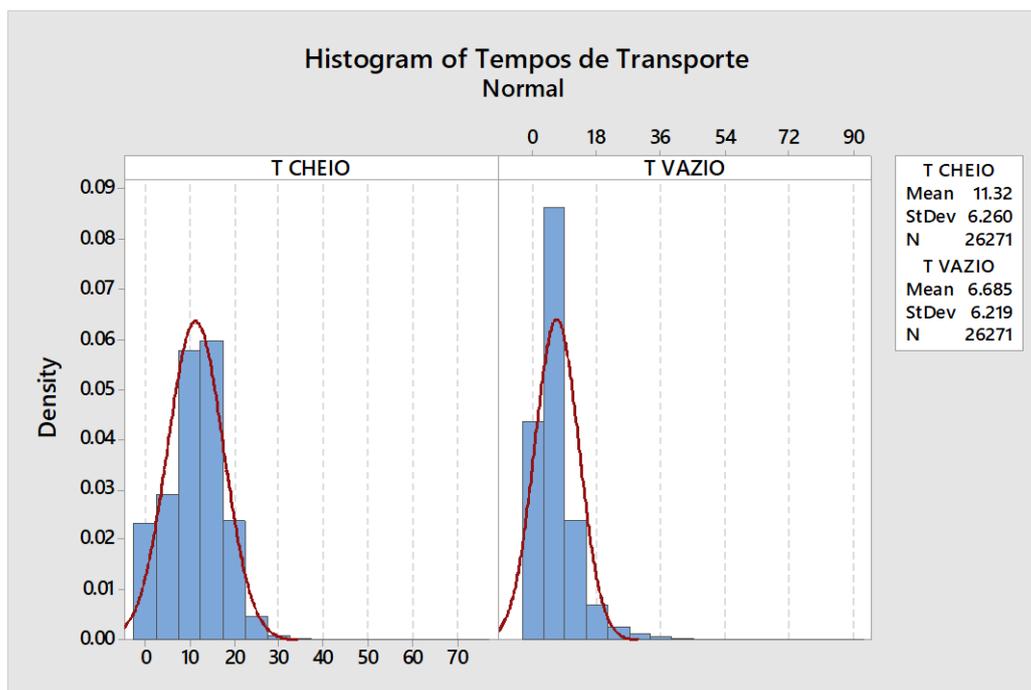
Tabela 6 - Resumo de tempos de ciclo por local de basculamento.

Dados de tempos de ciclo	Pilha		Depósito		Britador	
	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Tempo de Basculamento (min)	0.84	1.11	0.81	0.91	3.93	4.54
Rota vazio para Cava Sequeirinho (min)	8.97	7.52	6.71	5.42	4.75	5.96
Rota vazio para Cava Sossego (min)	11.01	8.41	7.67	5.23	7.41	8.17
Rota vazio para Cava Pista (min)	9.31	7.75	6.53	5.06	6.77	7.08

Fonte: Autor, 2019.

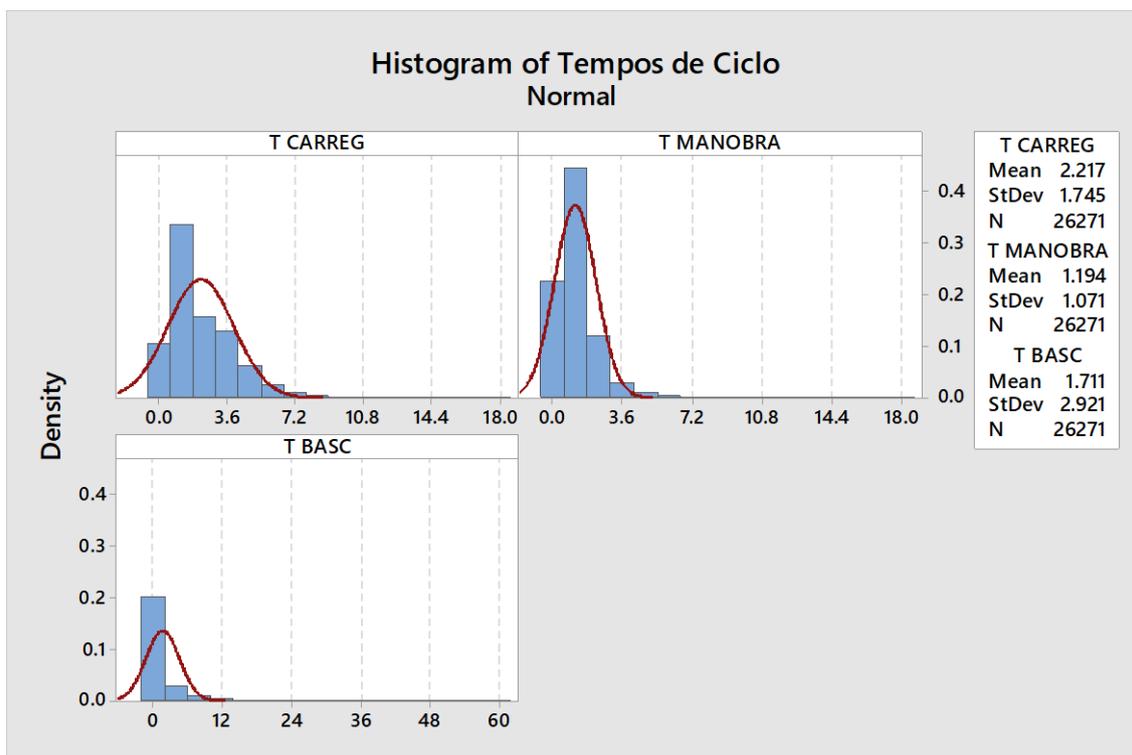
Como para o cenário não-íntegro os dados foram apresentados da forma como são gerados em campo, ou seja, sem nenhuma tratativa, é possível verificar que existem inúmeros tempos de ciclo inconsistentes. As Figura 31 e Figura 32 apresentam a distribuição dos tempos de ciclo gerados para esse cenário.

Figura 31 – Histograma dos tempos de transporte para cenário não-íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 32- Histograma dos dados de tempo de ciclo para cenário não-íntegro.



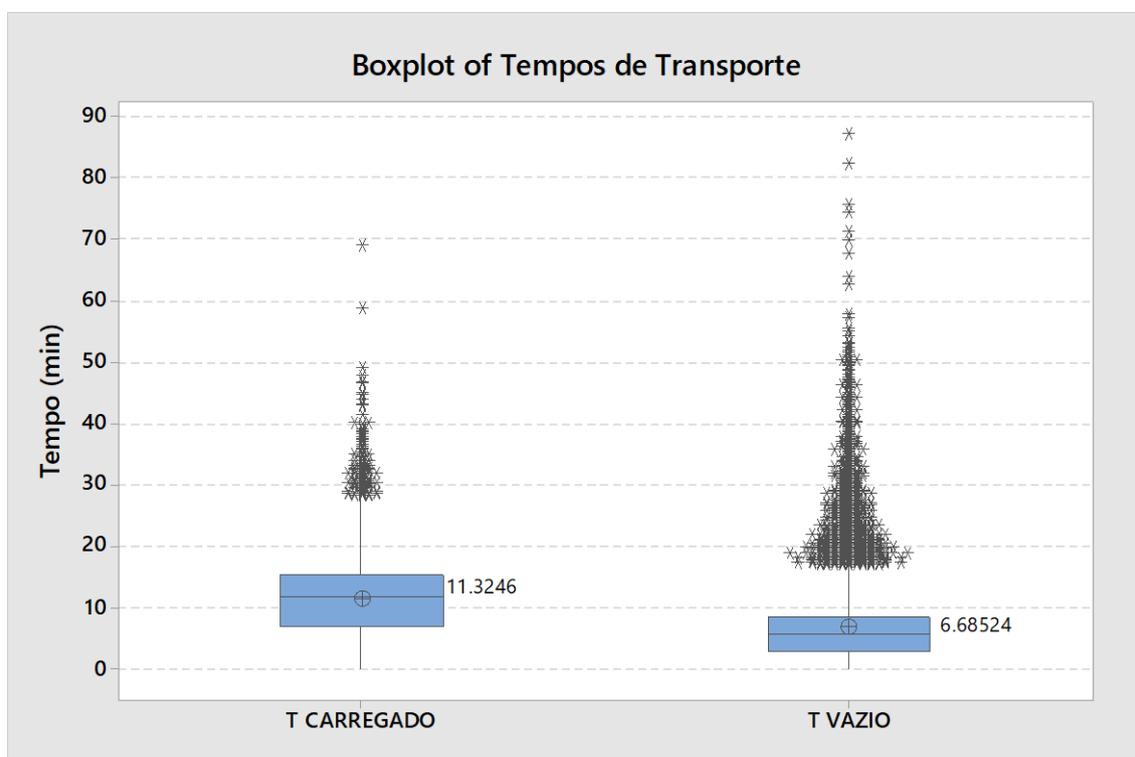
Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que os dois conjuntos de histogramas apresentaram significativa quantidade de valores iguais ou próximos de zero para os tempos de ciclo, os quais são

impossíveis de ocorrer em campo e representam um forte indicador da baixa integridade dos dados reais da mina.

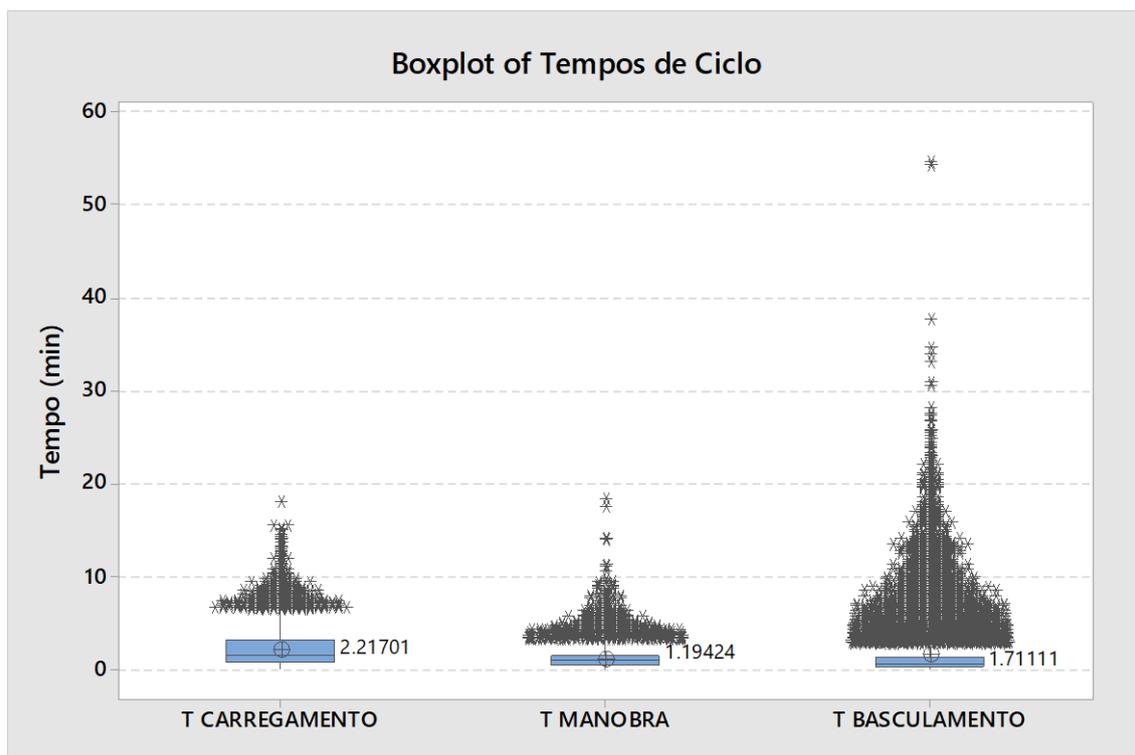
Além disso, através dos gráficos boxplot das Figura 33 e Figura 34 é possível observar a ocorrência de inúmeros *outliers* para os tempos de ciclo, que são valores de dados que estão distantes dos outros valores de dados e podem afetar fortemente os resultados. A expressiva massa de *outliers* gerados evidencia ainda mais a baixa integridade dos tempos de ciclo gerados na mina e transmitidos ao banco de dados do sistema de despacho da mina.

Figura 33 - Boxplot dos tempos de transporte para cenário não-íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 34 - Boxplot dos tempos de ciclo para cenário não-íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

#### 4.2.3.2 CENÁRIO ÍNTEGRO

Para a simulação do cenário com dados considerados íntegros, foi feito o tratamento dos dados coletados no banco de dados do sistema e os valores anômalos foram desconsiderados. Após isso, o novo banco de dados gerado foi também distribuído em curva normal e o resumo dos tempos de ciclo utilizados na simulação para o cenário íntegro é apresentado nas Tabela 7 e Tabela 8, por local de carregamento e basculamento, respectivamente.

Tabela 7 - Resumo de tempos de ciclo por local de carregamento para banco de dados atualizado.

Dados de tempos de ciclo	Cava Sequeirinho		Cava Sossego		Cava Pista	
	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Tempo de Carregamento (min)	1.73	0.93	2.64	1.12	1.32	0.72
Tempo de Manobra (min)	1.23	0.53	1.33	0.59	1.27	0.45
Rota carregado para Pilha (min)	14.20	4.52	18.13	4.92	13.00	3.69
Rota carregado para Depósito (min)	11.14	3.63	11.27	3.36	9.96	2.75
Rota carregado para Britador (min)	4.07	2.47	8.85	5.78	7.33	4.45

Fonte: Autor, 2019.

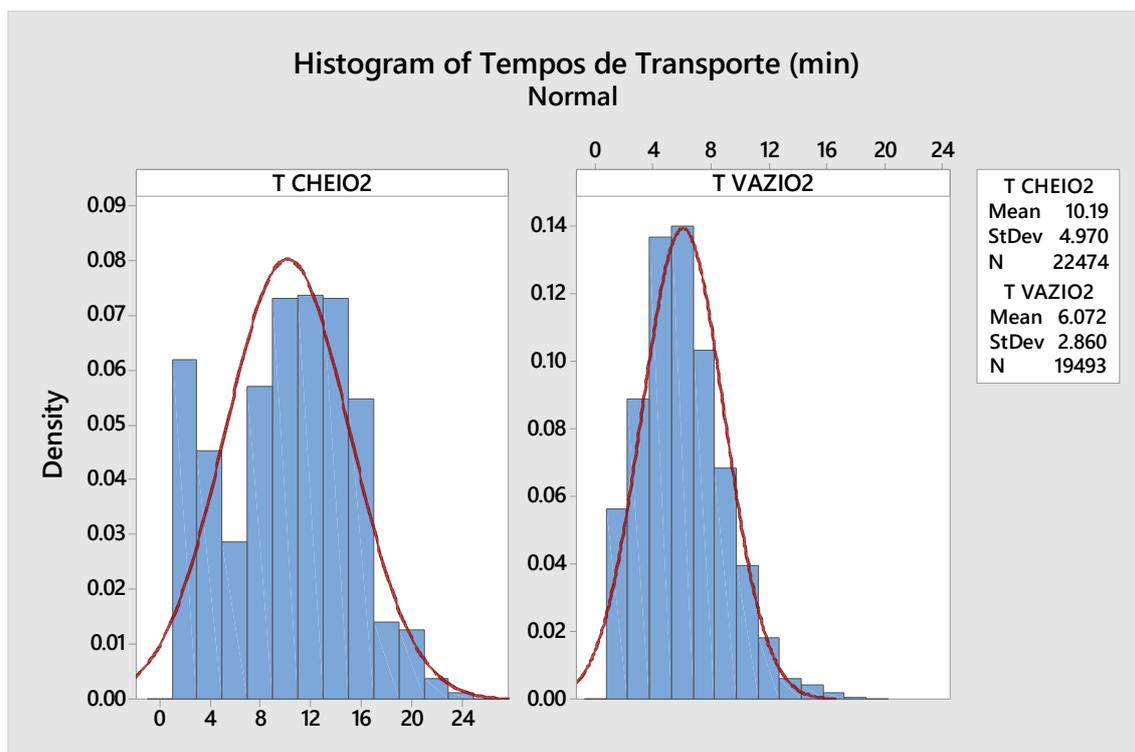
Tabela 8 - Resumo de tempos de ciclo por local de basculamento para banco de dados atualizado.

Dados de tempos de ciclo	Pilha		Depósito		Britador	
	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Tempo de Basculamento (min)	0.84	1.11	0.81	0.91	3.93	4.54
Rota vazio para Cava Sequeirinho (min)	7.84	3.02	6.22	2.23	3.95	2.48
Rota vazio para Cava Sossego (min)	10.26	3.65	6.52	2.38	6.74	3.96
Rota vazio para Cava Pista (min)	8.18	2.99	6.05	2.06	6.11	3.32

Fonte: Autor, 2019.

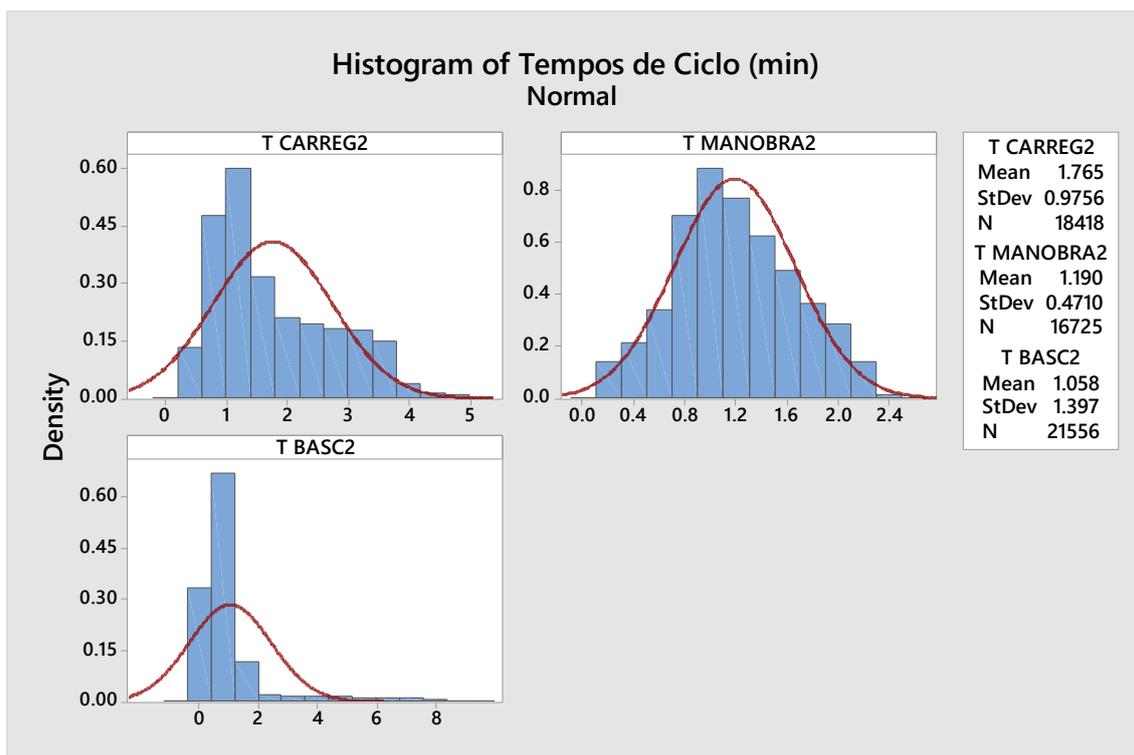
Para simulação do cenário íntegro, os dados foram tratados através de análise estatística com o auxílio da ferramenta Minitab 18.1 e as Figura 35 e Figura 36 apresentam os histogramas de distribuição dos tempos de ciclo gerados para esse cenário.

Figura 35 - Histograma dos tempos de transporte para cenário íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

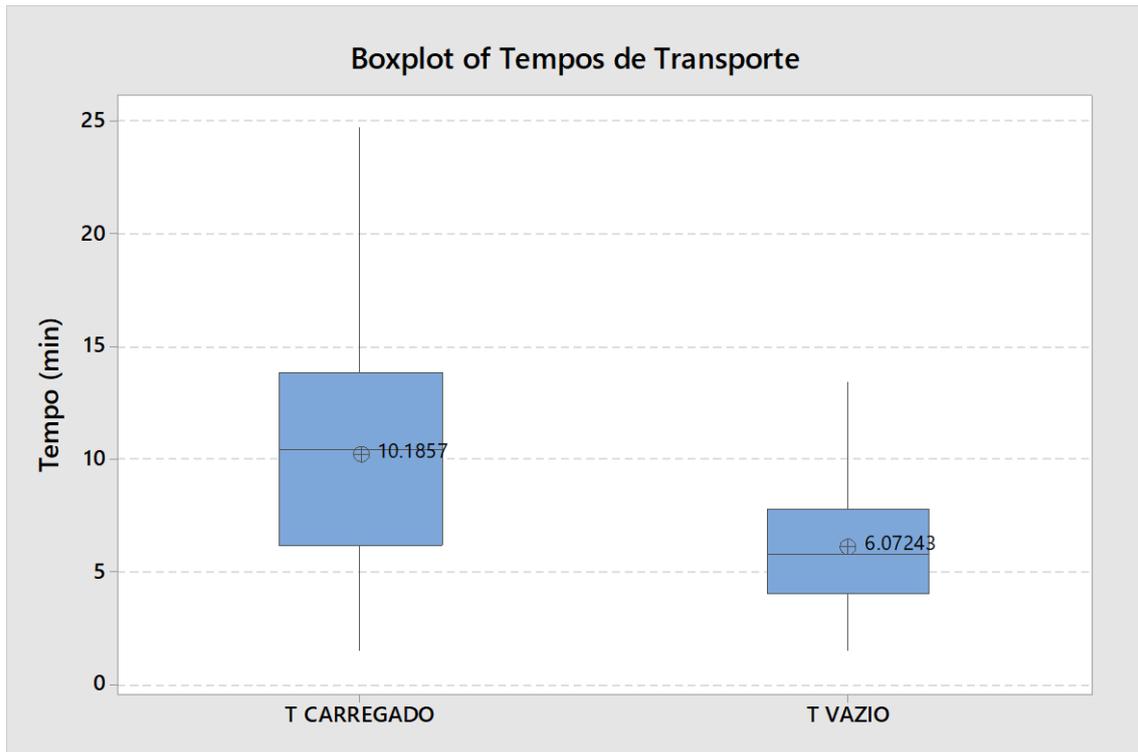
Figura 36 - Histograma dos dados de tempo de ciclo para cenário íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

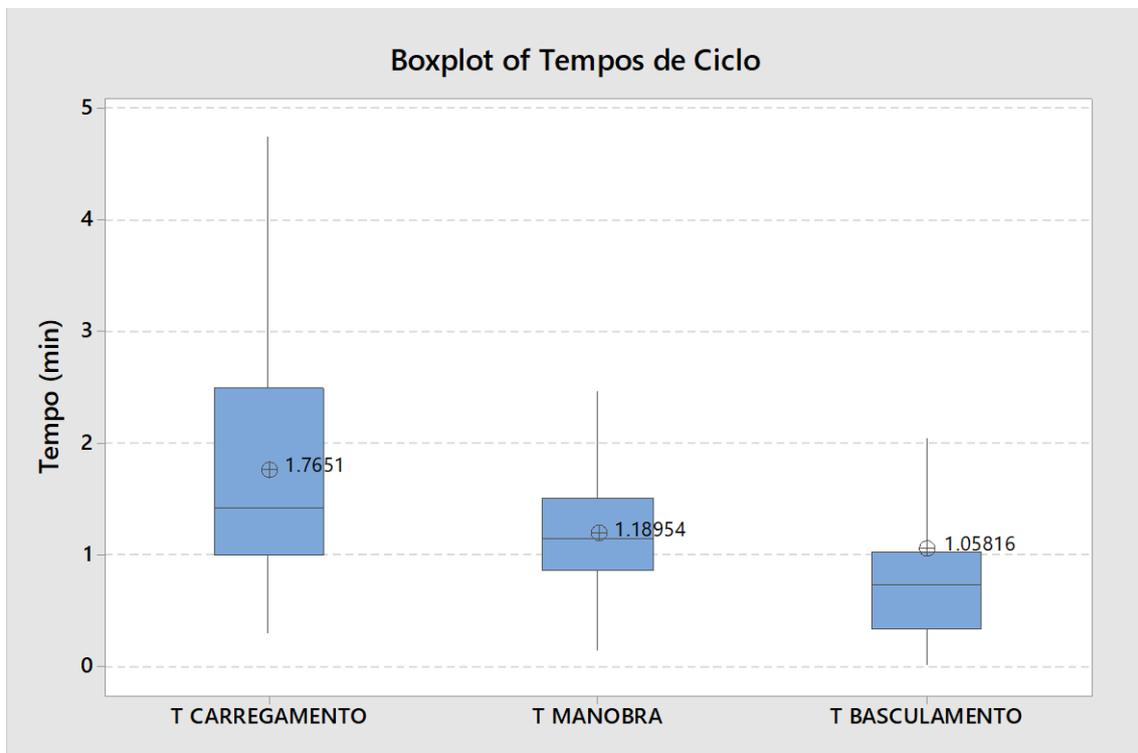
É possível verificar que a distribuição de dados está mais uniforme e consistente com valores praticados na operação. Além disso, os gráficos boxplot das Figura 37 e Figura 38 mostram a redução expressiva da ocorrência de *outliers* para os tempos de ciclo, além de uma melhor simetria para a maioria dos tempos e considerável redução na dispersão dos dados após a tratativa feita.

Figura 37 - Boxplot dos tempos de transporte para cenário íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 38 - Boxplot dos tempos de ciclo para cenário íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme previamente mencionado no capítulo 4.1.2 deste trabalho, foi necessário colocar tanto as simulações com a utilidade de simulação do Dispatch como as com o software Arena na mesma base, de forma a tornar comparável os resultados obtidos entre os cenários. Essa padronização dos cenários foi realizada replicando-se as informações do turno real (tempo de carregamento, manobra, distâncias, etc.) para os cenários simulados buscando atingir a maior realidade operacional possível. Na Tabela 9 são apresentados os resultados da simulação feita para o cenário replicado em comparação ao período real da mina para as simulações realizadas com a utilidade do Dispatch.

Tabela 9 - Comparação entre resultado da simulação para o cenário replicado e turno real.

	<b>CARGAS MINÉRIO</b>	<b>CARGAS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL CARGAS</b>	<b>TONS MINÉRIO</b>	<b>TONS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL TONS</b>
<b>REAL</b>	144	93	237	25.673,81	17.774,02	43.447,83
<b>REPLICADO</b>	145	91	236	25.112,71	17.911,18	43.023,89
$\Delta$	-0,69%	2,20%	<b>0,42%</b>	2,23%	-0,77%	<b>0,99%</b>

Fonte: Autor, 2019.

É possível perceber uma diferença menor que 1% entre o turno real e o turno replicado para padronização, tanto para o número total de cargas como para o volume total de produção do turno. Essa comparação demonstra que a replicação do turno está bem similar ao real executado na mina, visto que os resultados dos indicadores foram bem próximos e, portanto, a calibração para o período foi considerada adequada.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre os resultados das simulações para os cenários otimizado e fixo realizados na utilidade de simulação Dispatch. O cenário otimizado foi realizado utilizando os recursos de otimização do sistema de despacho, e para o cenário fixo todos os caminhões foram alocados em frentes fixas de basculamento e equipamentos de carga, portanto não houve utilização dos recursos de otimização do sistema.

Tabela 10 - Comparação entre os resultados da simulação para cenário fixo e otimizado.

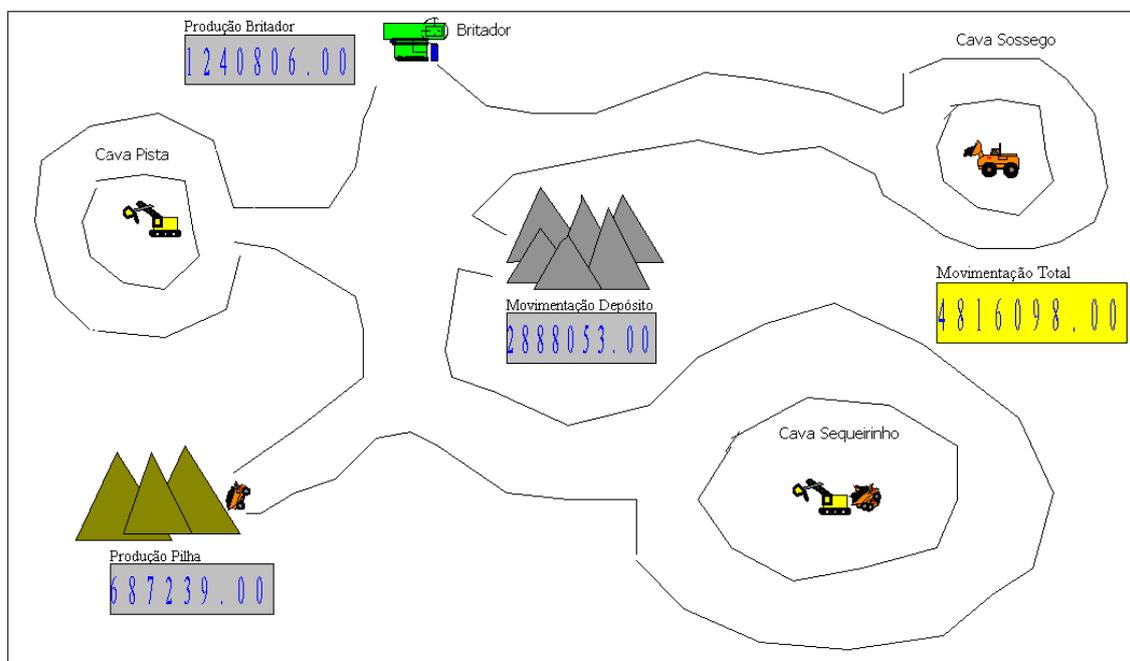
	<b>CARGAS MINÉRIO</b>	<b>CARGAS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL CARGAS</b>	<b>TONS MINÉRIO</b>	<b>TONS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL TONS</b>
<b>OTIMIZADO</b>	145	91	236	25.112,71	17.911,18	43.023,89
<b>FIXO</b>	143	75	218	24.812,62	15.314,34	40.126,96
$\Delta$	1,40%	21,33%	<b>8,26%</b>	1,21%	16,96%	<b>7,22%</b>

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que os resultados apresentaram uma diferença de 8,26% para o total de cargas entre os cenários simulados e de 7,22% para o volume total de produção. Essa diferença expressiva demonstra claramente os ganhos de produção possíveis através de uma operação correta do sistema de despacho, na qual os recursos de otimização disponíveis são efetivamente utilizados pela equipe operacional da mina sem interferências manuais na tomada de decisão do algoritmo.

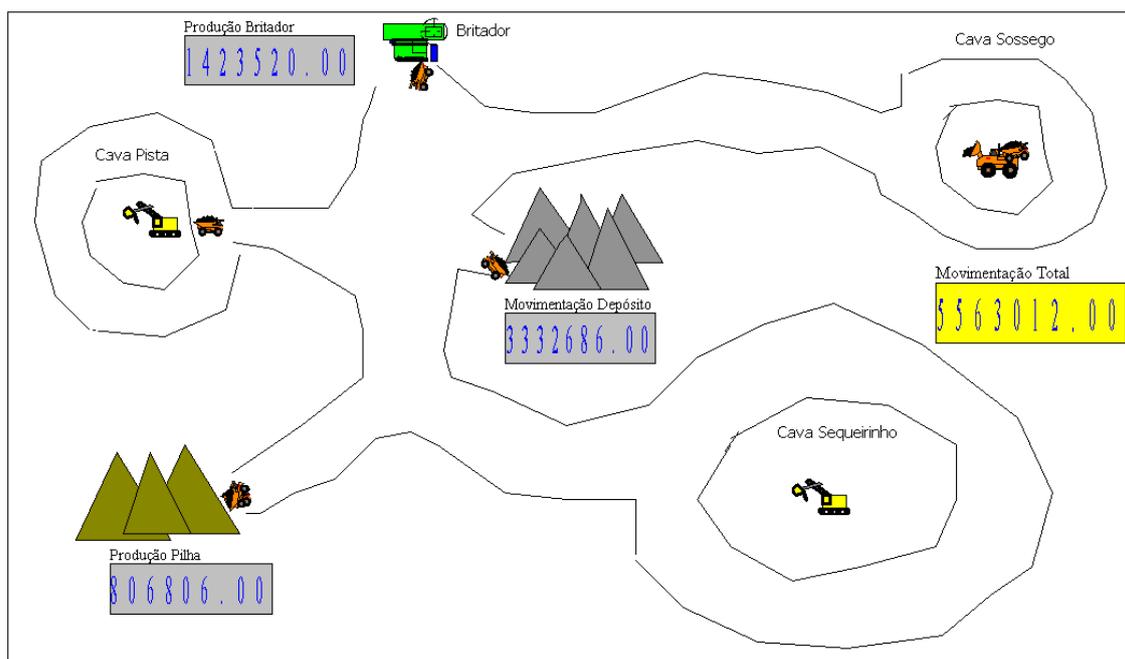
Para realização da simulação dos cenários de integridade de dados, foi criado um modelo teórico conforme mencionado no capítulo 4.2.3 deste trabalho, e a Figura 39 e Figura 40 apresentam uma simplificação da animação criada para os modelos utilizando o software Arena Simulation.

Figura 39 - Resultados simulação para cenário não-íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 40 - Resultados simulação para cenário íntegro.



Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 11 apresenta a comparação entre os resultados reais de produção executados no período, cenário chamado de real e os resultados atingidos através da simulação executada no Arena para o cenário replicado.

Tabela 11 - Comparação entre resultados da simulação para o cenário não-íntegro e o turno real.

	CARGAS MINÉRIO	CARGAS ESTÉRIL	TOTAL CARGAS	TONS MINÉRIO	TONS ESTÉRIL	TOTAL TONS
<b>REAL</b>	11,520	15,295	26,815	1,918,256	2,923,011	4,841,267
<b>REPLICADO</b>	11,586	15,112	26,698	1,928,045	2,888,053	4,816,098
Δ	0.57%	-1.21%	<b>-0.44%</b>	0.51%	-1.21%	<b>-0.52%</b>

Fonte: Autor, 2019.

É possível perceber uma diferença menor que 1% entre o turno real e o turno replicado para padronização, tanto para o número total de cargas como para o volume total de produção do turno. Essa comparação evidencia que a replicação do turno está bem similar ao real executado na mina, visto que os resultados apresentados foram bem próximos e, portanto, a calibração para o período foi considerada adequada.

Já na Tabela 12 temos uma comparação entre os resultados para o cenário replicado, então chamado de não-íntegro - realizado com os dados de entrada exibidos nas Tabela 5 e Tabela 6 conforme gerados em campo e sem tratativa, e cenário

considerado íntegro - realizado com os dados de entrada consolidados nas Tabela 7 e Tabela 8, após análise estatística e tratamento dos dados.

Tabela 12 – Comparação entre os resultados para os cenários de integridade de dados.

	<b>CARGAS MINÉRIO</b>	<b>CARGAS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL CARGAS</b>	<b>TONS MINÉRIO</b>	<b>TONS ESTÉRIL</b>	<b>TOTAL TONS</b>
<b>NÃO-ÍNTEGRO</b>	11,586	15,112	26,698	1,928,045	2,888,053	4,816,098
<b>ÍNTEGRO</b>	13,392	17,439	30,830	2,230,326	3,332,686	5,563,012
$\Delta$	13.48%	13.34%	<b>13.40%</b>	13.55%	13.34%	<b>13.43%</b>

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que os resultados apresentaram uma diferença de 13,4% para o total de cargas entre os cenários simulados e de 13,43% para o volume total de produção. Essa diferença significativa demonstra claramente os ganhos de produção atingíveis através da operação do sistema de despacho utilizando dados em tempo real considerados confiáveis.

## 6 CONCLUSÕES

A simulação mostrou-se uma ferramenta adequada às análises de sistemas produtivos complexos, tais como os de mineração. A utilidade de simulação Dispatch seria o simulador ideal indicado para este trabalho, uma vez que é o sistema utilizado na mina do Sossego e, portanto, seria possível realizar simulações extremamente próximos aos realizados na operação. No entanto, a utilidade mostrou-se inadequada para os cenários de integridade de dados devido a limitações de entrada de dados de ciclo de transporte, e dessa forma optou-se pelo software Arena Simulation como substituto.

O Arena mostrou-se adequado para os cenários de integridade de dados uma vez que flexibiliza a entrada dos dados do ciclo completo de carregamento e transporte e permite ainda a criação de eventos de parada e manutenção pelo usuário. É, no entanto, considerado inadequado para análises de cenários de otimização, uma vez que não possui os mesmos recursos operacionais da utilidade Dispatch.

Os resultados para as simulações dos cenários de otimização e integridade de dados apresentaram 7,22% e 13,43% de incremento na produção em relação ao cenário real, respectivamente. Tais resultados evidenciam a importância da garantia de integridade dos dados gerados em tempo real pelo sistema de despacho, operação otimizada do sistema sem interferências manuais e configurações corretas das variáveis de entrada no sistema.

Notou-se que há uma grande deficiência de conhecimento nas empresas quanto aos potenciais impactos no ciclo de produção da mina devido à baixa integridade dos dados do sistema de despacho e baixa otimização da operação do sistema, o que muitas vezes faz com que perdas relevantes sejam negligenciadas no processo.

A mina do Sossego apresentou significativa carência nos indicadores abordados, principalmente em relação à integridade dos dados gerados pelo sistema, o que a necessidade de dedicação do corpo técnico da unidade para análise e solução dos problemas a fim de evitar potenciais perdas de produção.

## **7 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES**

Tomando em consideração os dados analisados para otimização e integridade de dados da Mina do Sossego, seguem recomendações e sugestões para a unidade:

- Avaliar as condições que possam interferir na qualidade da otimização da operação do sistema de despacho, como tratativa de exceções, treinamento dos operadores de despacho, etc.;
- Avaliar as condições que possam interferir na integridade de dados da mina, como qualidade da cobertura de rede, capacitação dos operadores em campo, etc.;
- Analisar e caracterizar a qualidade da otimização da operação do sistema de despacho da mina;
- Analisar e caracterizar a qualidade e a integridade dos dados coletados em tempo real pelo sistema de despacho e que alimentam o algoritmo de otimização e tomada de decisão no gerenciamento de equipamentos na mina;
- Criar um grupo de trabalho de melhoria contínua para propor soluções para os problemas de otimização e integridade de dados identificados na unidade.

## REFERÊNCIAS

ALARIE, S. e GAMACHE, M. Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 16, 2002.

ALVARENGA, G. B. Despacho ótimo de caminhões numa mineração de ferro utilizando algoritmo genético com processamento paralelo. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica).

AMARAL, M. e PINTO, L. R. XLII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e transporte. Bento Gonçalves: 2010. p.1177-1188.

ARAUJO, F. C. R. Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões: abordagens exata e heurística. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R. e YANASSE, H. Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia. São Paulo: Elsevier, 2015.

BREGALDA, P. F., OLIVEIRA, A. A. F. e BORNSTEIN, C.T. Introdução à Programação Linear. 3ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

CARVALHO, E. R. Caracterização geológica e gênese das mineralizações de óxido de Fe-Cu-Au e metais associados na Província Mineral de Carajás: estudo de caso do Depósito de Sossego. Campinas: Universidade de Campinas, 2009. 11p. (Tese de Doutorado).

CARVALHO, M. M. et al. Gestão da Qualidade: teorias e casos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

ÇETIN, N. Open pit truck/shovel haulage system simulation. Ankara: Middle East Technical University, 2004. (Tese de doutorado).

CHVÁTAL, V. Linear Programming. New York: W. H. Freeman, 1983.

COHEN, S. S. Operational Research. London: Edward Arnold, 1985.

CORONADO, P. P. V. Optimization of the haulage cycle model for open pit mining using a discrete-event simulator and a context-based alert system. Arizona: University of Arizona, 2014. (Master degree thesis, Department of Mining, Geological and Geophysical Engineering.).

CORONADO, P. P. V., TENORIO, V. O. Optimization of open pit haulage cycle using a KPI controlling alert system and a discrete-event operations simulator. Arizona: University of Arizona, 2015.

COSTA, B. e GANGA, G. M. D. Benefícios da implantação de um sistema de despacho: estudo de caso em uma empresa de mineração. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos: 2010.

COSTA, R. H. P. Análise da aplicação de um software Dispatch no sistema de transporte de uma mineradora. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. (Dissertação do curso de especialização em logística estratégica de sistemas de transporte).

COSTA, F. P., SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 58(1): p.77-81, jan-mar. 2005.

COSTA, F. P. Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavras em mina a céu aberto. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2005, 141p. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

COSTA, F. P., SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. Um modelo de alocação dinâmica de caminhões. *Brasil Mineral* 231, p.26-31, 2004.

COUTINHO, H. L. Melhoria continua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

CRAWFORD, J. T. e HUSTRULID, W. A. *Open pit mine planning and design*. New York: UMI Books on Demand, 1979.

EZAWA, L. e SILVA, K. S. Alocação dinâmica de caminhões visando qualidade. Salvador: VI Congresso Brasileiro de Mineração, 1995, p. 15–19.

FELSCH JÚNIOR, W. S. Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2014. (Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

FITZSIMMONS, J. A. e FITZSIMMONS, M. J. *Estratégia em serviços. Administração de serviços*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

HARTMAN, H. L. e MUTMANSKY, J. M., *Introductory mining engineering*. 2<sup>a</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2002.

HENDERSON, M. H.; EVANS, J. R. Successful implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company. *Benchmarking an International Journal*, v.7, n.4 p.260-281, 2000.

HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. *Introduction to operations research*. 7<sup>a</sup> ed. Nova York: Mc Graw Hill, 2001.

HUSTRULID, W. KUCHTA, M. Open pit mine planning & design: Fundamentals. 3<sup>a</sup> ed. New York: CRC Press, vol.1, 1995.

JESUS, A. R. Seis Sigma em grandes indústrias no Brasil: problemas de implementação e fatores críticos de sucesso. Salvador: Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2015. (Tese de doutorado).

KARLOFF, H. Linear Programming. Boston: Birkhäuser, 1991.

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

KOLONJA, B., KALASKY, D. R. e MUTMANSKY, J. M Optimization of dispatching criteria for open pit truck haulage system design using multiple comparisons with the best and common random numbers. Los Angeles: Winter Simulation Conference, p.393-401, 1993.

LUUS, R. Iterative dynamic programming. Florida: Chapman & Hall/CRC, 2000.

MARAN, J. e TOPUZ, E. Simulation of truck haulage systems in surface mines. International Journal of Surface Mining, vol.2, p.43-49, 1988.

MERSCHMANN, L. H. C. e PINTO, L. R. Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, v.4, n.3, p-2011-2014, 2001.

MERSCHMANN, L. H. C. Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. (Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia de Produção/COPPE).

MODULAR MINING SYSTEMS INC. MasterLink 11 radio system: user's guide. Belo Horizonte: 2004.

MODULAR MINING SYSTEMS INC. Introdução ao Dispatch: manual de treinamento do usuário. Belo Horizonte: 2005.

MODULAR MINING SYSTEMS INC. Manual de treinamento Dispatch: operação do sistema para despachantes. Belo Horizonte: 2010.

MONTOYA, R.A.G., ESPINAL, A.A.C. e VAHOS, J.D.H. Transporte verde: eficiência y reducción de CO<sub>2</sub> integrando gestión, tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y um metaheurístico. Revista Producción + Limpia, Caldas, vol.10, n.2, p.53-68, 2015.

MUNIRATHINAM, M. e YINGLING, J. C. A review of computer-based truck dispatching strategies of surface mining operations. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 8, p.1-15, 1994.

MUTMANSKY, J.M. Computing and operations research techniques for production scheduling. Computer methods for the 80's in the mineral industry, New York, p.615-625, 1979.

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

PANTUZA JÚNIOR, G. Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

PINTO, E. B. Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais., 2007. (Dissertação de Mestrado).

QING-HUA, G. et al. Monitoring dispatch information system of trucks and shovels in open pit based on GIS/GPS/GPRS. J Chima Univ Mining & Technol, vol.18, p.288-292, 2008.

RAMOS NETO, A. N. Desenvolvimento de um template no Programa Arena para a Simulação das Operações de Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2002. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

REIS, L. A. Melhoria do desempenho de malhas de controle utilizando a metodologia Lean Seis Sigma. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016. (Trabalho de conclusão de graduação).

RODRIGUES, L. F. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. (Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia de produção).

SACHS, P.F.T e NADER, B. Sistemas de Gestão da Produção e a Cadeia de Valor Mineral. Disponível em: [http://www.brasilminingsite.com.br/anexos/artigos/33\\_0.pdf](http://www.brasilminingsite.com.br/anexos/artigos/33_0.pdf). Acesso em 04 de maio de 2018.

SRAJER, V., HICK, L. e WALSHE, M. Selection, development and testing of integrated truck-shovel management system. Trans. Institution of Mining Metallurgy, p.A105-A112, 1989.

TAKAI, O. K., ITALIANO, I. C., FERREIRA, J. E. Introdução a Banco de Dados. p.104 f, 2005.

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

TUBINO, D. F. Manual de planejamento e controle da produção. São Paulo: Atlas, 1997.

VANDERBEI, R. J. Linear Programming: Foundations and Extensions. Boston: Kluwer, 1997.

WAGNER, H. M. Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1986.

WAGNER, H. M. Principles of Operations Research — Applications to Managerial Decisions. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1969.

WERKEMA, C. Ferramentas estatísticas básicas do Lean Seis Sigma Integradas ao PDCA e DMAIC. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

WHITE, J. W. e OLSON, J. P. Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives. Mining Engineering 38:11, p.1045-1054, 1986.

WHITE, J. W., ARNOLD, M.J. e CLEVINGER, J. G. Automated open-pit truck dispatching at Tyrone. Engineering and Mining Journal, v. 183, n.11, p.76-84, 1982.