



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ANDRÉ FELIPE FERREIRA DE OLIVEIRA

ANÁLISE COMPARATIVA PARA TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE
TRANSPORTE CONVENCIONAIS VS AUTÔNOMOS

OURO PRETO - MG

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ANDRÉ FELIPE FERREIRA DE OLIVEIRA

ANÁLISE COMPARATIVA PARA TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE
TRANSPORTE CONVENCIONAIS VS AUTÔNOMOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortíz

OURO PRETO - MG

2018

O482a Oliveira, André Felipe Ferreira de.
Análise comparativa para tomada de decisão entre sistemas de transporte convencionais vs autônomos [manuscrito] / André Felipe Ferreira de Oliveira. - 2018.

53f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração - Transporte. 2. Mina à céu aberto. 3. Métodos de simulação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.68

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 18 dias do mês de dezembro de 2018, às 13h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “ANÁLISE COMPARATIVA PARA TOMADA DE DECISÃO ENTRE SISTEMAS DE TRANSPORTE CONVENCIONAIS VS AUTÔNOMOS”, pelo aluno **André Felipe de Oliveira**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Carlos Henrique Arroyo Ortiz (orientador)**, **Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral** e **M.Sc. Walter Schmidt Felsch Júnior**.

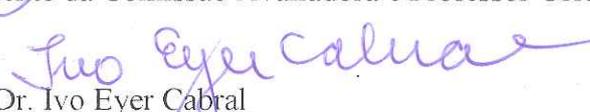
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela Aprovado do candidato, com a nota 9,0 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

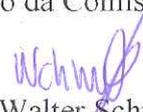
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

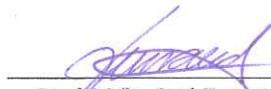
Ouro Preto, 18 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Carlos Henrique Arroyo Ortiz
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral
Membro da Comissão Avaliadora


M. Sc. Walter Schmidt Felsch Júnior
Membro da Comissão Avaliadora


André Felipe Oliveira


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Trabalho de Conclusão de Curso

Agradecimentos

Agradeço à Deus pelas oportunidades e por estar comigo a todo momento.

À minha família, pelo apoio incondicional e por me incentivarem na busca por meus sonhos.

À Yasminn, pelo companheirismo e incentivo.

Aos companheiros de “república”, José, Gustavo, Ricardo, pelas discussões e conselhos ao longo da graduação.

À dona Cleuza e família por serem minha segunda família em Ouro Preto.

Ao meu orientador Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortíz por todo conhecimento compartilhado, confiança e orientação.

Ao engenheiro Walter Schmidt e à CSN pela parceria e por terem tornado esse trabalho possível.

Aos professores Dr. Antônio Luciano Gandini e Dra. Érica Linhares, pelos conhecimentos compartilhados fora da sala de aula.

À Escola de Minas e aos professores do DEMIN, pelo ensino de qualidade e por serem referência no setor mineral.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino de qualidade e gratuito.

Aos técnicos administrativos e servidores, e um agradecimento especial ao Élcio (*in memoriam*).

À Minera Jr. e à LAGEM, por terem contribuído para eu me tornar uma pessoa e um profissional mais completo.

À cidade de Ouro Preto por me proporcionar experiências incríveis e conhecer pessoas excepcionais. Em especial, aos amigos Letícia, Rossi, Rodrigo, Jade, Júlia, Bárbara e Pedro Lincoln.

Às empresas, Galvani Fertilizantes e a Alcoa e aos profissionais Miro e José Carlos (Zé), que me ensinaram na prática o que significa mineração.

À todos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional ao longo dessa jornada.

“It is not the strongest of the species that survives, nor, the most intelligent that survives. It is the one that is the most adaptable to change”.

Charles Darwin

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a CSN e tem como objetivo estudar o sistema de transporte da mina de Casa de Pedra pertencente a empresa, situada na cidade de Congonhas/MG. O estudo foi feito por meio de simulações computacionais utilizando o software de simulação de carregamento e transporte DSim com o intuito de analisar os cenários futuros para uma operação de transporte empregando caminhões autônomos. O trabalho foi desenvolvido em 03 grandes etapas, levantamento e tratamento dos dados, construção do modelo computacional e sua validação e por fim, a simulação e análise de cenários futuros. O primeiro cenário simulado representa o sistema convencional, ou seja, a operação atual da frota de caminhões da empresa. Esse cenário serviu como apoio para a validação do modelo computacional, apresentando aderência de 91% e sendo assim validado. Os outros três cenários simulados foram: A (menor velocidade), B (maior velocidade), C (frota menor de veículos e velocidade menor), todos representando uma operação autônoma. A produtividade do sistema autônomo foi em média de 6,4 % a 14,5 % maior e a utilização de 3% a 7% maior, sendo que a variabilidade da produtividade horária do sistema autônomo foi menor. Além disso, foi possível demonstrar que conseguiríamos manter a produção atual do sistema de transporte se trocássemos a frota de caminhões por uma frota autônoma menor. A partir da análise de cenários futuros por meio da simulação foi possível comprovar que a automação do transporte em uma mina a céu aberto pode fornecer resultados positivos. Desta forma, os objetivos do trabalho foram alcançados.

Palavras-chave: Simulação, Transporte, Caminhões autônomos

Abstract

The present work studies was developed in partnership with CSN and studies the haulage system of CSN's Casa de Pedra mine, located in the city of Congonhas/MG. The study was carried out using computer simulation through DSim transport and simulation software to analyze the future scenarios for a transport operation using autonomous trucks. The future scenarios for a transport operation employing autonomous trucks. The work was developed in 03 large steps, data collection and treatment, construction of the computational model and its validation and finally, the simulation and analysis for future scenarios. The first simulated scenario represents the conventional system, which is the current operation of the company's truck fleet. This scenario was used as support for the validation of the computational model, presenting adhesion of 91% and thus, being validated. The other three simulated scenarios were: A(low speed), B (high speed) and C (low fleet and low speed), all representing an autonomous operation. The productivity of the autonomous system was on average from 6.4% to 14.5% higher and the utilization of 3% to 7% higher and the hourly productivity variability of the autonomous system was lower. In addition, the current production of the transport system could be maintained if a smaller, autonomous fleet switched the truck fleet. From the analysis of future scenarios through the simulation it was possible to prove that the transport automation in an open-pit mine can provide positive results. In this way, the objectives of the work were achieved.

Key words: Simulation, Haulage, Autonomous trucks

Lista de Ilustrações

Figura 01 Distribuição de Custos da lavra convencional por caminhões	15
Figura 02 Ciclo básico de carregamento e transporte em minas a céu aberto	16
Figura 03 Sistema de Carregamento composto por <i>Shovel</i> e Caminhão	17
Figura 04 Sensores de detecção de obstáculos	20
Figura 05 Caminhão autônomo na Mina de Brucutu	22
Figura 06 Modelo computacional gerado no DSIM.....	27
Figura 07 Etapas da metodologia	29
Figura 08 Fluxo de criação de um modelo no DSim.....	32
Figura 09 Fluxograma das operações de lavra da CSN	36
Figura 10 Layout da mina em estudo.....	37
Figura 11 Distribuição de probabilidade da capacidade dos caminhões	38
Figura 12 Planilha do DSIM contendo a carga média dos caminhões	39
Figura 13 Histograma de velocidade de caminhão carregado.....	39
Figura 14 Histograma de velocidade de caminhão vazio	40
Figura 15 - Comparação entre o sistema convencional e o cenário C.	43
Figura 16 Comparação da utilização entre os cenários	44
Figura 17 Gráfico da porcentagem da classificação do tempo para o cenário A.....	45
Figura 18 Gráfico da porcentagem da classificação do tempo para o cenário B.....	45
Figura 19 Gráfico de produtividade horária.....	46
Figura 20 Plano simulado	50

Lista de Tabelas

Tabela 1 Dados sobre a frota	37
Tabela 2 Velocidade média dos sistemas autônomos	40
Tabela 3 Dados da movimentação de massa e utilização dos cenários	42
Tabela 4 Custos relacionados a uma frota de 7 caminhões autônomos.....	47

Lista de Abreviações

AHS – *Autonomous haulage system*

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

DSIM – Delphos Open Pit simulator

MTBF – Tempo médio entre falhas

MTTR – Tempo médio de reparo

PO – Pesquisa operacional

ROM – *Run of Mine*

SED – Simulação de eventos discretos

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Ilustrações	vii
Lista de Tabelas	viii
Lista de Abreviações	ix
1 Introdução	12
2 Objetivos	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivo Específico	14
3 Revisão Bibliográfica	15
3.1 Operações Mineiras	15
3.1.1 Carregamento e transporte em minas a céu aberto	15
3.1.2 Automação nas operações mineiras	18
3.1.3 Caminhões Autônomos	19
3.2 Simulação	22
3.2.1 Simulação a eventos discretos	22
3.2.2 Simulação na indústria mineral	24
3.2.3 Simuladores	26
3.2.4 Delphos Open Pit Simulator®	26
3.3 Tratamento estatísticos de dados	28
4 Metodologia	29
4.1 Levantamento e caracterização dos dados	29
4.2 Tratamento dos Dados	31
4.3 Construção do modelo	31
4.4 Validação do modelo	33
4.5 Simulação de cenários	33
4.6 Análise econômica	33
5 Estudo de Caso	35
5.1 Descrição da Mina	35
5.2 Modelagem dos dados de entrada	37
6 Resultados e discussões	42
7 Conclusões	48

Sugestões para trabalhos futuros.....	49
Apêndice	50
Referências bibliográficas	51

1 Introdução

Atualmente, as empresas de mineração estão em busca de novas tecnologias para se sobreporem aos desafios impostos pelo mercado global de commodities. Diante destes desafios criados pela competitividade global, as empresas têm investido na confiabilidade e segurança das operações. Neste cenário, estão surgindo oportunidades de inovar e expandir a automação para operações mais críticas e onerosas dentro dos processos de mineração.

A automação está relacionada a uma ampla variedade de sistemas e processos que apresentam a mínima atividade humana para a realização de uma operação. Na mineração, a automação avança a passos largos impulsionada pela promessa de reduzir custos, aumentar a produtividade e a segurança operacional. Não são poucas as empresas que investem em automação para aumentar a confiabilidade operacional de equipamentos e processos. No Brasil, a Vale se tornou em 2018 a pioneira na automatização de equipamentos para o transporte de minério de ferro das frentes de lavra até a usina em sua mina de Brucutu.

Associada à automação de processos está a simulação. De acordo com Pereira (2016), a simulação dentro do cenário da mineração se tornou uma ferramenta estratégica para realização de estudos de planejamento de produção, mudanças de layout, automação e redução de custos. Através dela podemos obter informações úteis para a tomada de decisão e com a vantagem de se fazer diversas simulações de cenários virtuais e evitar erros irreversíveis e com altos custos em cenários reais.

No futuro, as minas alcançarão um grau avançado de automação e desse modo criarão oportunidades de melhorias que hoje ainda não são perceptíveis. Por exemplo, a integração de dados e processos vai gerar oportunidades para monitorar a operação da mina em tempo real permitindo a tomada de decisões mais assertivas em relação aos processos. A expectativa para o futuro é que a operação mineira se tornar mais segura, produtiva, eficiente e mais susceptível à aplicação de sistemas autônomos (Pereira, 2013).

Portanto, o estudo de sistemas de automação através da simulação de processos é necessário para conhecer as reais oportunidades de aplicação das diferentes tecnologias em mineração.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Comparar a movimentação de massa de uma operação com sistemas que utilizam caminhões convencionais e caminhões autônomos através do uso de simulação computacional.

2.2 Objetivo Específico

- Construir um modelo de simulação;
- Validar o modelo de simulação comparando a simulação com o plano de movimentação realizado;
- Comparar a produção de um sistema convencional de transporte com um sistema autônomo em termos de movimentação diária de massa, variabilidade da produtividade horária e tamanho da frota.

3 Revisão Bibliográfica

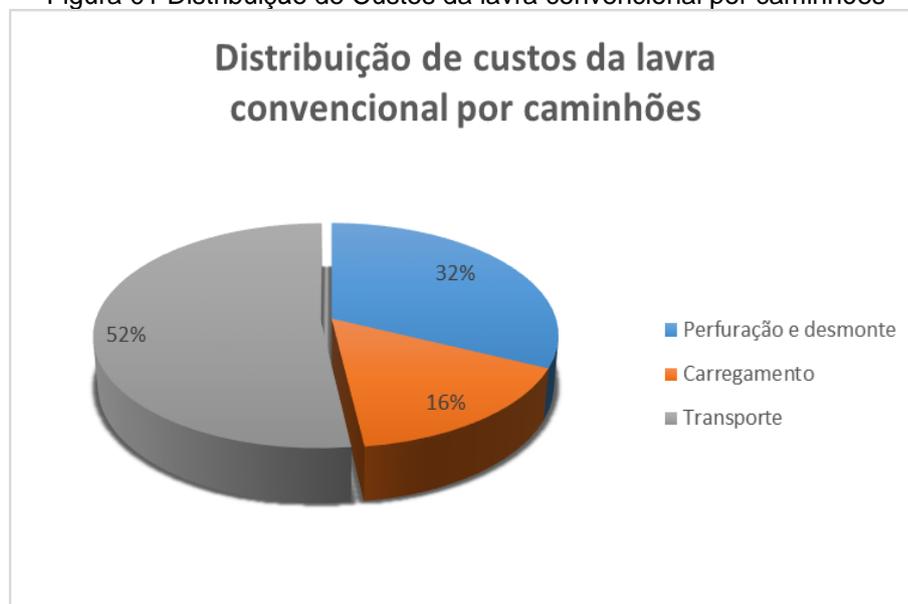
3.1 Operações Mineiras

3.1.1 Carregamento e transporte em minas a céu aberto

O método convencional de lavra por caminhões carregados por carregadeiras ou escavadeiras é o método de lavra predominante nas minas de minério de ferro a céu aberto (LOPES, 2010).

Para Subtil et al. (2010), o carregamento e transporte são as atividades mais críticas dentro dos processos de lavra, pois representam cerca de 50% dos custos operacionais dentre os outros processos do ambiente de mineração. De maneira mais detalhada, Lopes (2010) apud Trueman (2001), pontua que a composição dos custos das operações de lavra se distribuem estatisticamente em: 32% perfuração e desmonte, 16% carregamento e 52% transporte por caminhões, como podemos ver na figura 01.

Figura 01 Distribuição de Custos da lavra convencional por caminhões

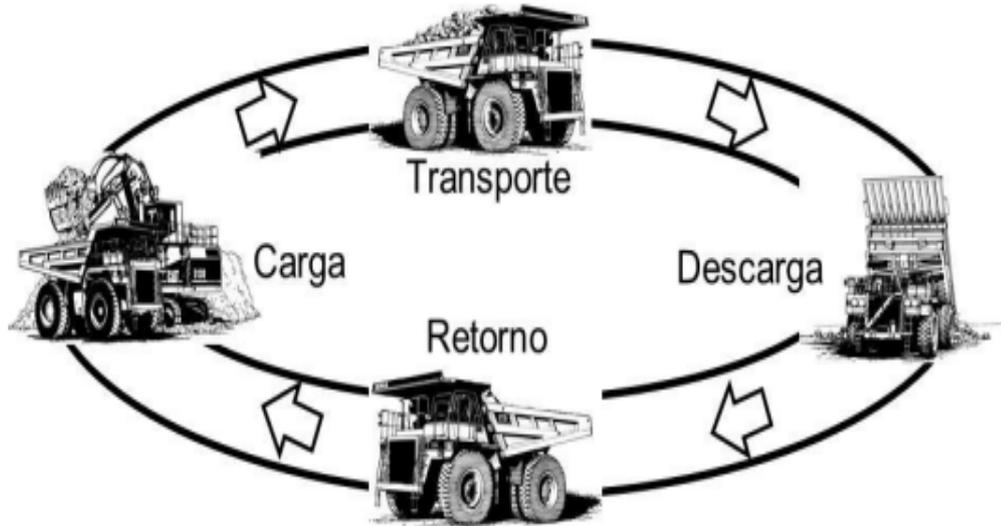


Fonte: Adaptado de Lopes (2010) apud Trueman (2001)

O processo de logística do minério presente no planejamento de lavra é uma tarefa complexa e envolve diversas variáveis. Em grandes minerações, a frota de equipamentos pode apresentar números expressivos. O ROM de múltiplas frentes de lavra pode ir para os britadores, desde que siga rigorosos critérios de qualidade

impostos pela usina de tratamento. Além desse destino, o material explotado pode ser direcionado para as pilhas pulmão, pilhas de homogeneização ou seguir para as pilhas de estéril.

Figura 02 Ciclo básico de carregamento e transporte em minas a céu aberto



Fonte: Souza (2012) adaptado apud Richards e West (2003)

O sistema de carregamento e transporte apresentado na figura 02 representa um dos sistemas mais comuns utilizados em minerações de grande porte de minério de ferro e, é constituído de escavadeira *shovel* e caminhões fora-de-estrada. Segundo Souza (2012) quando há a necessidade de movimentar uma grande quantidade de massa por pequenas distâncias e em um grande período de tempo, o sistema mostrado na figura 03 apresentam viabilidade.

Figura 03 Sistema de Carregamento composto por *Shovel* e Caminhão

Fonte: Sotreq (2015)

Rodovalho (2013) diz que o planejamento de lavra deve definir o ritmo produtivo do empreendimento mineral assim como a escala de produção, considerando a variabilidade dos eventos que influenciam a produtividade como disponibilidade física e utilização dos equipamentos, distância média de transporte e tempos associados ao transporte (manobra, carregamento, basculamento, etc). Além dessas variáveis, temos também as variáveis ligadas à manutenção dos equipamentos: o *Mean Time Between Failure* (MTBF), correspondente ao tempo médio que o equipamento leva para falhar e o *Mean Time to Repair* (MTTR) correspondente ao tempo médio que o equipamento fica em manutenção.

De modo a gerenciar as frotas de equipamentos que realizam as operações de lavra faz-se necessário o uso de um sistema de despacho. O despacho computadorizado é responsável por maximizar a produção da frota de equipamentos, minimizar a fila entre os pontos de carga e descarga e garantir os padrões de qualidade imposto ao ROM pela usina de tratamento (Rodrigues, 2006).

3.1.2 Automação nas operações mineiras

Atualmente, as empresas de mineração estão enfrentando muitos desafios, dentre eles: a alta demanda por minérios de boa qualidade, a competição global e as variações nos preços das *commodities*. Como resultado, as mineradoras estão começando a implementar a automação em processos para aumentar a eficiência da planta e da produção. Através da automação, podemos alcançar o aumento da produtividade e da segurança operacional, redução custos e, aumento da confiabilidade dos sistemas logísticos mineiros. Em mineração, a automação está se tornando uma importante ferramenta perante a exaustão de minérios de alta qualidade e da mão de obra especializada. Reservas que no passado apresentavam dificuldades de exploração e ambientes de alta periculosidade estão se tornando atraentes economicamente e possibilitando a abertura de novas minas. A automação está corroborando e se tornando essencial nesse processo (Pereira, 2013).

A automação é um processo com uma serie de níveis, que podem ir desde um controle completamente manual até o extremo oposto, um controle autônomo sem interação humana. No âmbito da exploração mineral podemos dividir a automação em três níveis (Rivera 2014 apud Horberry et al, 2010):

- **Nível baixo de automação:** inclui sistemas de alerta, tais como sensores de proximidade para evitar colisão de equipamentos e sensores que indicam a manutenção do equipamento. Nesse nível, a tecnologia só proporciona assistências e advertências ao operador que está em interação com o equipamento.
- **Nível médio de automação:** são sistemas que são controlados remotamente ou sistema semiautônomos. Nesse nível, o operador pode ser removido do controle em determinadas etapas do processo, ou ter o controle do equipamento a partir de um local próximo. Além disso, certas funções dos equipamentos são controladas automaticamente pelo sistema e supervisionados pelo operador. Como exemplo, temos os sistemas anticolisão que param automaticamente o equipamento na iminência de uma colisão.
- **Automação completa:** esse nível de automação permite que o operador não fique em contato físico com o equipamento. A operacionalização dos equipamentos ocorre através de computadores, joysticks, controles e displays.

Como exemplos dessa categoria tem-se os caminhões e perfuratrizes autônomas.

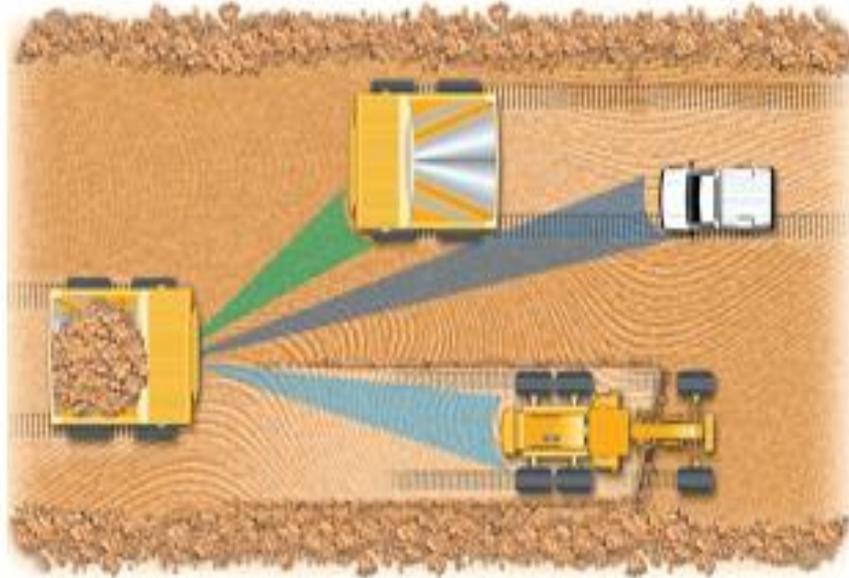
Segundo Rivera (2014) com a adoção de sistemas autônomos podemos esperar a realização de operações de modo mais eficaz, confiável e preciso em relação a um operador humano. Além disso, um aumento da eficiência com a diminuição dos tempos perdidos (troca de turno, refeições e necessidades fisiológicas), aumentando as horas efetivamente trabalhadas, tudo isso com um ganho exponencial na segurança operacional. Além da diminuição efetiva das horas paradas, Parreira (2013) apud Zoschke et al. (2000), pontuam que a operação com caminhões autônomos contribui também para outros elementos associadas como o perfil de operação de cada pessoa e absenteísmo.

No transporte de minério, as expectativas são de que o emprego de caminhões autônomos também reduza os custos operacionais e estendam a vida útil de alguns componentes como o sistema de frenagem e pneus. Espera-se também, o aumento da produtividade e da eficiência com a redução do consumo de diesel e das emissões de gases (Rivera, 2014).

3.1.3 Caminhões Autônomos

Os caminhões autônomos são equipados com tecnologias como um sistema de GPS de alta precisão, desse modo podemos conhecer a sua posição em tempo real e controlá-los pela sala de controle. Eles também são equipados com sistemas wireless de comunicação, que permitem um fluxo contínuo de informações com a sala de controle. Além disso, eles contam com sensores de detecção de obstáculos, permitindo detectar a presença de outros equipamentos e pessoas trabalhando ao seu redor e julgar em qual caso deverá reduzir a velocidade ou parar por completo, como exemplificado na figura 04 (Rivera, 2014).

Figura 04 Sensores de detecção de obstáculos



Fonte: Komatsu (2013)

Dados atuais da Komatsu, uma das grandes fabricantes de caminhões autônomos que compõem o *Autonomous Haulage System (AHS)*, demonstram que atualmente mais de 100 caminhões autônomos estão presentes em minerações na Austrália, América do Norte e América do Sul. Até o fim do ano de 2017, os caminhões autônomos da Komatsu movimentaram uma massa de material acumulada de 1,5 bilhões de toneladas. Estatísticas mostraram também que os custos unitários de carregamento e transporte caíram em 15% e a vida útil dos pneus dos caminhões aumentou em 40% em comparação com o sistema convencional de transporte utilizado em minas a céu aberto (Komatsu, 2018).

No mesmo patamar está a Caterpillar, outra grande fabricante de equipamentos de mineração. Segundo a empresa, caminhões Caterpillar operando com sistemas autônomos atingiram em 2018 a quantidade de 1 bilhão de toneladas em massa movimentada. Em 2013, a companhia lançou seus 6 primeiros caminhões autônomos e atualmente tem uma frota de mais de 150 caminhões empregados em operações de minério de ferro, cobre e areia betuminosa. A frota está crescendo rapidamente visto que as empresas de mineração estão percebendo a maior produtividade, utilização, confiabilidade operacional e redução de custos dos equipamentos autônomos (Caterpillar, 2018).

Parreira (2013) pontua que a frota convencional existente em uma mina pode ser adaptada para um sistema de operação autônomo. Entretanto, para que isso ocorra alguns componentes são necessários, entre eles:

- um sistema de rede de comunicação sem fio (*wireless*);
- sensores para fornecer informações relacionadas à navegação e prevenção de colisão com objetos;
- computador de bordo em cada caminhão para processar informações dos sensores e controlar elementos do equipamento (acelerador, direção e freio);
- dispositivos de controle para regular cada elemento do equipamento;
- um sistema de processamento central para coordenar toda a comunicação entre as diferentes partes dos equipamentos e fornecer a supervisão do equipamento;
- um sistema de GPS com precisão de <10 cm para fornecer localização em tempo real do equipamento em qualquer lugar da mina;
- um sistema de softwares capazes de controlar e supervisionar o equipamento.

No Brasil, a mineradora Vale recentemente se tornou a pioneira na aplicação de caminhões autônomos para o transporte de minério de ferro. Após seis anos de pesquisa e testes, ela passou a utilizar 7 caminhões autônomos (figura 05) em suas operações na mina de Brucutu situada no estado de Minas Gerais. Atualmente, os caminhões autônomos dividem espaço com outros 6 caminhões operados de maneira convencional. A expectativa da companhia é atingir um aumento da velocidade média dos caminhões. Em termos de percentagem, se espera um aumento de 15% na vida útil dos equipamentos com a redução de 10 % nos custos de manutenção e no consumo de combustível (Vale, 2018).

Figura 05 Caminhão autônomo na Mina de Brucutu



Fonte: Vale (2018)

3.2 Simulação

3.2.1 Simulação a eventos discretos

A pesquisa operacional (P.O.) teve sua origem durante a Segunda Guerra Mundial sendo utilizada pela Inglaterra para alocar, estrategicamente, seus escassos recursos militares. Uma de suas vertentes, a simulação, também se originou durante a guerra como uma extensão do método de Monte Carlo. Ela possibilitou o estudo da difusão de nêutrons e a construção da bomba atômica.

A simulação tem se tornado uma ferramenta útil e versátil para analisar, através de um computador, o comportamento de sistemas complexos que envolvem diversas variáveis. Prado (2014a, p. 11) afirma que “a simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”. Na mesma linha de raciocínio, Cassandras & Lafortune (2010) diz que o termo simulação pode ser entendido como o processo de projetar e criar um modelo computadorizado do sistema real ou proposto, com objetivo de conduzir experimentos numéricos para prover melhor entendimento do comportamento do sistema para um dado conjunto de condições.

O termo sistema pode ser definido como uma agregação de objetos que possuem alguma interação ou interdependência. Tais sistemas têm em comum a maneira pela qual percebem as ocorrências no ambiente a sua volta, o que se dá pela recepção de

estímulos, denominados eventos. Esses eventos são, por sua natureza, instantâneos, o que lhes confere um caráter discreto no tempo (Cassandras & Lafortune, 2010).

Para Sakura & Miyake (2009), a simulação de eventos discretos (SED) abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, em contraste ao que ocorre com modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo.

Para Pinto (2002), podemos subdividir a simulação em 7 fases:

1 - Definição do problema

Etapa inicial da simulação onde deve-se conhecer o sistema a ser simulado e os elementos que o compõe, definindo quais as entidades que realizam ou participam de algum processo dentro desse sistema.

2 - Identificação das variáveis relevantes

Deve-se enumerar os parâmetros que influenciam no desempenho do sistema, pois tais parâmetros vão serão modificados e analisados durante a simulação com o intuito de analisar o seu comportamento.

3 - Coleta de dados

Durante esta etapa é realizado a coleta e refinamento dos dados referentes aos parâmetros citados anteriormente.

4 - Formulação do modelo lógico-matemático

Nesta etapa são construídas as regras matemáticas que permeiam o sistema, bem como as restrições impostas aos elementos que o constituem.

5 - Construção do modelo computacional

Caso não se tenha um software comercial que permita a simulação do processo em estudo, é possível a criação de programas computacionais usando linguagens específicas de simulação que permitam estudar o determinado processo.

6 - Verificação e validação do modelo

Com o programa pronto, deve-se executar testes e simulações com o intuito de verificar a existência de erros, a inconsistência de parâmetros e a sensibilidade do modelo gerado em relação a situação real.

7 – Experimentação

Após a validação do modelo e do programa, podemos simular diversos cenários e compará-los para observar o comportamento de suas variáveis.

3.2.2 Simulação na indústria mineral

A integração entre otimização de processos e o corte de custos estão tornando a aplicação de pesquisa operacional uma ferramenta muito útil nas operações mineiras. O cenário atual onde as mineradoras estão buscando aumentar a competitividade de suas *commodities* e atingir uma operação mais sustentável fazem com que surjam oportunidades de investir em tecnologias que garantam um retorno mais rápido do capital investido. Diante dessa situação, a simulação tem se tornado atraente para a tomada de decisão em projetos que envolvem custos exorbitantes. Além disso, a simulação é um método barato que permite avaliar cenários diferentes com agilidade e segurança, otimizando o tempo de operação e auxiliando na tomada de decisões.

A simulação analisa cenários embasado em dados históricos, variáveis do processo e distribuições de tempos, realizando análises probabilísticas. Uma das grandes vantagens dessa metodologia é a sua capacidade de se sobrepor aos métodos de tentativas e erros utilizados frequentemente no planejamento de lavra.

Pinto (2002) aponta que as aplicações de pesquisa operacional na mineração começaram a surgir no final da década de 50 e início da década de 60. Apesar disso, as aplicações na mineração, são ainda hoje, relativamente tímidas se comparadas a outros tipos de indústria.

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

- Permitir ao engenheiro de minas ou administrador tirar conclusões sobre novos sistemas sem sua experimentação direta ou sem perturbação da produção;
- Melhorar a percepção geral da natureza de um processo, através da animação do sistema no computador;

- Estudar o dimensionamento e seleção de equipamentos utilizados nas operações de mina, como caminhões e equipamentos de carregamento;
- Dimensionar a capacidade de silos, britadores e pilhas de estoque;
- Dimensionar sistemas para escoamento da produção usando trens e navios.

Sturgul (2001) também destacou importantes aplicações da simulação nas operações mineiras para minas a céu aberto:

Movimentação de minério: determinar o tamanho da frota de caminhões para garantir a alimentação da usina seja constante ou próximo a constante. Auxiliar no dimensionamento do estoque de peças, uma vez que a confiabilidade dos equipamentos varia entre 70 a 80%.

Carregamento e transporte: as minerações de grande porte estão adotando sistemas de despacho computadorizados, onde após a descarga do caminhão o mesmo é direcionado para um equipamento de carga de modo a economizar o tempo na operação. A simulação pode ser usada nesse caso para avaliar se a adoção de um sistema de despacho pode aumentar a eficiência da operação.

Na literatura podemos também encontrar vários autores que usaram a simulação para auxiliar na tomada de decisões no planejamento de lavra. Com a ajuda de softwares e/ou softwares de simulação os autores, Pereira e Meech (2012) aplicaram a simulação numa mina a céu aberto com objetivo de comparar alguns indicadores de desempenho entre sistema de caminhões autônomos e caminhões convencionais; Tan et al.(2012), desenvolveram e aplicaram um modelo de otimização-simulação computacional para apoiar na gestão de operações numa mina a céu aberto de cobre; e Guimarães et al. (2007), desenvolveram um modelo de simulação computacional com objetivo de validar resultados obtidos pela aplicação de um modelo de programação matemática para alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto.

Na indústria, podemos perceber a aplicação da simulação como ferramenta de apoio para a concepção de planos de movimentação de massa mais realísticos, dimensionamento de frota de equipamentos e aumento da confiabilidade da operação dos equipamentos.

3.2.3 Simuladores

No mercado é possível encontrar uma grande gama de softwares de simulação, alguns softwares de aplicação específica, outros de caráter mais generalista. Os autores Sakurada e Miyake (2009) ressaltam que a competição entre as empresas fabricantes de softwares de simulação tem impulsionado o lançamento de “pacotes” cada vez mais poderosos que oferecem novas facilidades tais como ferramentas de suporte ao processo de modelagem, recursos de análise estatística e interfaces gráficas intuitivas (*user-friendly*). Além disso, esses simuladores possibilitam a análise visual através de animações facilitando a identificação de erros no modelo.

Do ponto de vista prático, a simulação é a concepção de um modelo computacional desenvolvido através de linguagens de programação de modo que represente a realidade de uma operação. Segundo Rodvalho (2013), com o avanço tecnológico dos simuladores atuais, a etapa de implementação (ou codificação) já não consome tanto tempo quanto no passado (a implementação é responsável pelo consumo de 20% a 30% do tempo total de um estudo típico de simulação). O modelo computacional implementado deve ser comparado frente ao modelo conceitual, com a finalidade de verificar se a sua operação atende ao que foi estabelecido na etapa de concepção. Alguns resultados devem ser gerados para a validação do modelo computacional, observando-se se o modelo é uma representação precisa da realidade (dentro dos objetivos já estipulados).

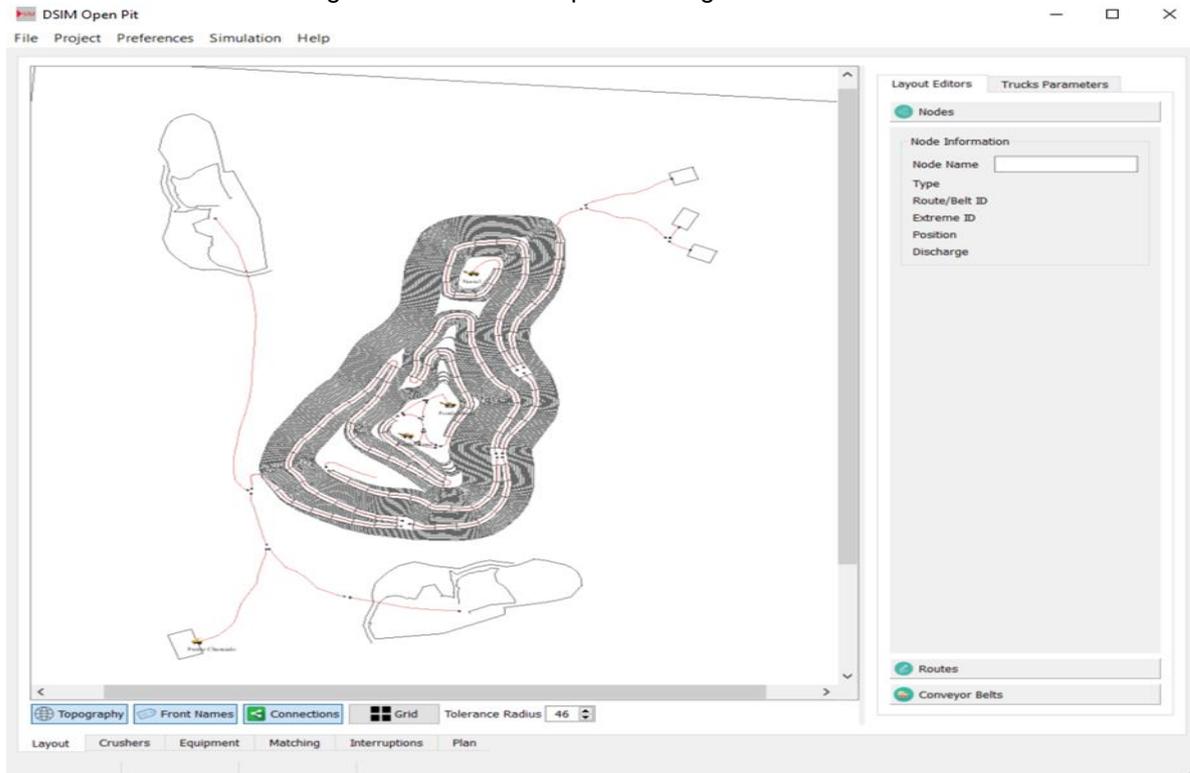
3.2.4 Delphos Open Pit Simulator®

O Delphos *Open Pit Simulador* (DSIM) é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, desenvolvida pelo Laboratório de Planejamento de Mina pertencente a Universidade do Chile. Além disso, ele é também parte do Centro Tecnológico de Mineração Avançada.

O DSIM é um software de simulação aplicado ao planejamento de lavra, permitindo estimar a produção de um plano de mineração a partir dos três seguintes elementos básicos: o *layout* da mina (frentes de operações de carga e descarga e rotas), a frota de equipamentos de carga e transporte e um plano de produção que indica o quanto

o usuário deseja enviar de cada frente para determinados destinos. A partir desses dados o modelo computacional é gerado (figura 06)

Figura 06 Modelo computacional gerado no DSIM



Fonte: Manual DSIM

O software permite a realização da análise de vários cenários onde pode-se variar os parâmetros operacionais que englobam o carregamento e transporte de uma mina a céu aberto. O input dos dados pode ser feito de maneira determinística ou probabilística por meio de uma distribuição probabilística conhecida.

O DSIM simula cenários por períodos que podem variar de 24 horas a um mês. Sendo que a simulação quando feita na escala diária resulta em resultados mais assertivos, pois diversas alterações podem ocorrer no layout de uma mina no período de um mês. Após a simulação, o DSIM gera relatórios de distribuições de tempo, performance dos equipamentos, movimentação de massa e produtividade.

3.3 Tratamento estatísticos de dados

Nesse tópico são discutidos os conceitos estatísticos usados no tratamento de dados e validação de dados usados na etapa de modelagem dos dados para a criação do modelo de simulação.

Os intervalos de confiança são usados para aumentar a confiabilidade dos resultados de uma simulação. Uma simulação que resulte em um intervalo de confiança pequeno é mais confiável do que outra que resulte em um intervalo de confiança maior. Tavares (2007) descreve o intervalo de confiança como um intervalo de valores, baseados nos conceitos estatísticos, o qual podemos afirmar, com um risco conhecido de erro, estar o parâmetro de uma determinada população. Usou-se o conceito de intervalo de confiança neste trabalho para conhecer o intervalo onde podemos julgar que as médias das massas movimentadas se localizam. Sendo que o nível de confiança para o cálculo do intervalo, foi de 95% que corresponde ao nível de confiança mais utilizado para calcular-se esse intervalo.

O intervalo de confiança foi calculado de acordo com a seguinte fórmula.

$$\left(\bar{x} - z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (1)$$

Onde: \bar{x} representa a média amostra;

z_{α} representa o limite de confiança da curva normal padrão

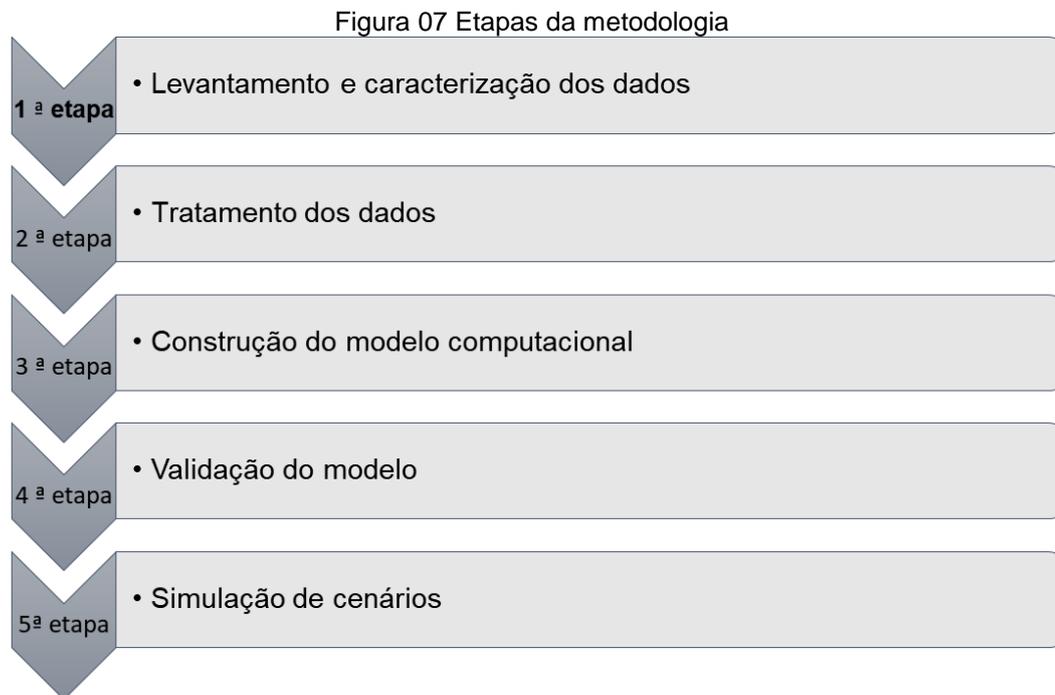
σ representa o desvio padrão amostral e;

n a quantidade de amostras utilizadas para o cálculo, no caso deste trabalho a quantidade de simulações realizadas.

Para a modelagem dos dados foi usado a ferramenta *Input analyzer* do ARENA e criado um histograma de frequência, onde está presente a carga dos caminhões por viagem. Após isso foi aplicado o teste do Qui-Quadrado para determinar a dispersão dos dados em torno de uma média e encontrado a distribuição de probabilidade que os dados de capacidade dos caminhões seguiam. Para a validação desta distribuição foi analisado o valor do *p-value*.

4 Metodologia

Neste capítulo foi discutido a metodologia empregada no trabalho bem como as condições de contorno que o tornaram possível. Tal metodologia pode ser dividida de acordo com a figura 07.



Fonte: elaboração própria

4.1 Levantamento e caracterização dos dados

A princípio a simulação foi desenvolvida com os dados retirados do banco de dados do despacho da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), porém o estudo proposto pode ser aplicado para outras minas. Embora, os resultados obtidos possam variar de acordo com a especificidade de cada local.

Os dados foram organizados em uma planilha do Excel de modo a facilitar o levantamento das informações necessárias para a realização da simulação. Os dados utilizados foram a capacidade média de transporte dos caminhões, a velocidade média por status do caminhão (carregado e vazio) e os tempos associados à operação (carregamento e báscula). As perdas no processo por conta da troca de turno também foram consideradas para a operação por caminhões tradicionais.

Além destes, a mina em estudo não apresenta uma frota de equipamentos autônomos em operação, sendo assim os dados de entrada para a simulação do transporte autônomo foram baseados na tese de doutorado apresentada por Juliana Parreira em 2013 com o tema “*An Interactive Simulation Model to Compare na Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System*”.

Desse modo, para o cenário com caminhões autônomos, as velocidades para o cenário onde as velocidades são maiores, foram obtidas através da seguinte fórmula presentes no trabalho de Parreira (2013):

$$VA = VT * (1 + i) \quad (2)$$

Onde:

VA = Velocidade média do caminhão (carregado ou vazio)

VT = Velocidade média do caminhão tradicional (carregado ou vazio)

i = incremento na velocidade do caminhão baseado no estudo de Juliana Parreira (2013), com valores de 13,8 % para caminhão carregado e 18,5 % para caminhão vazio.

Na tese de Parreira (2013) o perfil de operação do caminhão pode ser dividido em 3 níveis: passivo, normal e agressivo. O perfil agressivo é associado a operadores que operam o equipamento com velocidades maiores do que a média estabelecida pela mina. As porcentagens para o incremento “ i ” da fórmula foram obtidas após estudos comparativos entre os perfis de operação para a mina em estudo no estudo supracitado.

Por fim, para o cenário com caminhões autônomos foram desconsideradas as perdas relacionadas às trocas de turno, de modo a tornar o modelo o mais próximo a realidade.

4.2 Tratamento dos Dados

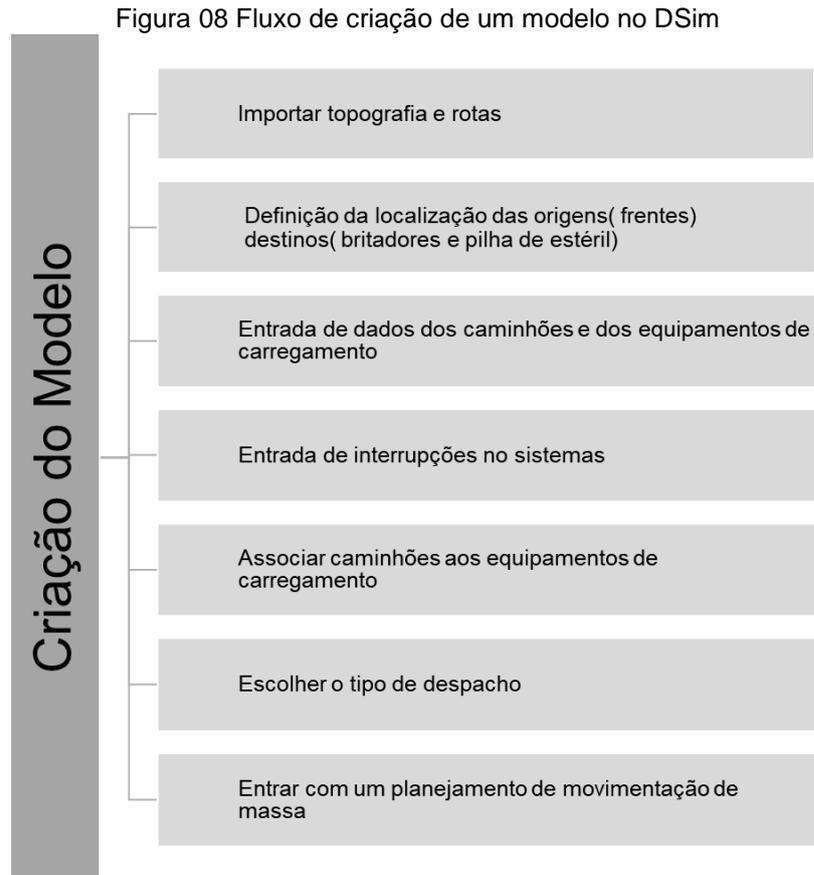
Os dados passaram por uma etapa de verificação. O intuito foi analisar a consistência dos mesmos a fim de detectar a existência de dados discrepantes ou duplicados que possam ter sido originados de uma falha durante o processamento dos mesmos.

O DSIm versão acadêmica permite o input de dados de maneira probabilística por meio de uma distribuição de probabilidade ou por meio determinístico. Desse modo, foi utilizado o *Input Analyzer*, uma ferramenta do software ARENA simulator® versão estudante para encontrar a distribuição de probabilidade dos dados das capacidades dos caminhões. Apesar da capacidade nominal de um caminhão ser constante, na prática, podemos perceber que ocorrem desvios em torno da capacidade média. Tais desvios podem acarretar em erros significativos nos resultados da simulação, desse modo é importante analisar se os dados se adequam em uma distribuição de probabilidade conhecida ou teórica. Os valores médios das velocidades dos caminhões vazios e carregados também foram obtidos por meio da ferramenta *Input Analyzer*.

A entrada dos dados no modelo relacionados aos índices de manutenção e os tempos de carregamento e báscula foram realizados de maneira determinística.

4.3 Construção do modelo

O modelo computacional foi desenvolvido no software de simulação DSIM. Sendo assim, o ciclo de construção do modelo foi desenvolvido de acordo com o que o programa especifica (figura 08).



Fonte: adaptado do Manual DSIM (2016)

Para a criação do modelo computacional é necessário entrar com os índices de manutenção MTBF e MTTR dos equipamentos. Além disso, a localização dos pontos de origem e destino do material, associar os equipamentos de carregamento (*shovel* e *front loader*) às frentes e aos caminhões e os possíveis tempos de perda do processo (troca de turno e aguardando desmonte).

Para finalizar o modelo, podemos inserir um plano de movimentação de massa ou deixá-lo em aberto, de acordo com o intuito do trabalho. Ao inserir um plano, podemos analisar a aderência ao plano comparando o plano de movimentação realizado com o plano de movimentação esperado. Caso contrário, podemos deixar o plano em aberto e analisar a capacidade de transporte da frota de caminhões, considerando que ela não terá a restrição de um planejamento. Nesse estudo, as simulações realizadas consideraram um plano de movimentação 8% superior ao plano realizado, de modo a não limitar as simulações à somente ao plano real realizado.

A partir da construção modelo de simulação real, foram feitas as alterações no mesmo modelo de modo a criar um modelo hipotético que reproduzisse uma operação autônoma.

4.4 Validação do modelo

O modelo computacional real foi validado através da comparação dos resultados da simulação com os resultados obtidos pelo planejamento realizado para aquele determinado dia. Para tal, foram realizadas 100 simulações que contemplaram o período de 24 horas de operação da mina e analisadas as massas movimentadas reais com as massas movimentadas simuladas.

O plano de produção diário prevê uma movimentação de massa de aproximadamente 240.000 toneladas. Para validar o modelo, foi comparado a massa real movimentada e massa real simulada e o seu desvio foi analisado. O desvio máximo estabelecido para a validação do modelo foi de 5 %.

4.5 Simulação de cenários

Após o modelo ser validado, podemos fazer alterações de modo a simular diversos cenários. O presente trabalho constitui-se de 3 cenários:

- I. Operação de transporte com caminhões autônomos com velocidade inferior ao sistema convencional;
- II. Operação de transporte com caminhões autônomos com velocidade superior ao sistema convencional;
- III. Operação de transporte com caminhões autônomos com velocidade inferior ao sistema convencional e frota reduzida em dois caminhões.

4.6 Análise econômica

Por fim, realizou-se uma análise econômica entre a operação de sistemas convencionais e autônomos. Discutiu-se também os custos de implantação das tecnologias e mecanismos que permite a operação segura de equipamentos

autônomos. A análise econômica foi desenvolvida a partir do levantamento de custos em trabalhos realizados previamente pelos autores Parreira (2013) e Brundrett (2014). É importante ressaltar que o intuito da análise econômica é demonstrar os custos e mostrar o potencial de redução dos custos, já que as informações são limitadas para uma análise mais profunda.

5 Estudo de Caso

Esse capítulo tem como objetivo descrever a mina em estudo e modelar os dados de entrada para os cenários a serem simulados de modo a aumentar a confiabilidade dos mesmos. Os dados em estudo foram cedidos através de uma parceria entre o departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto com a CSN. Eles foram adaptados de um plano diário realizado pela CSN durante o mês de julho/2018. A empresa opera continuamente por um período de 24 horas durante os 7 dias da semana e conta com 4 turnos diários de aproximadamente 6 horas.

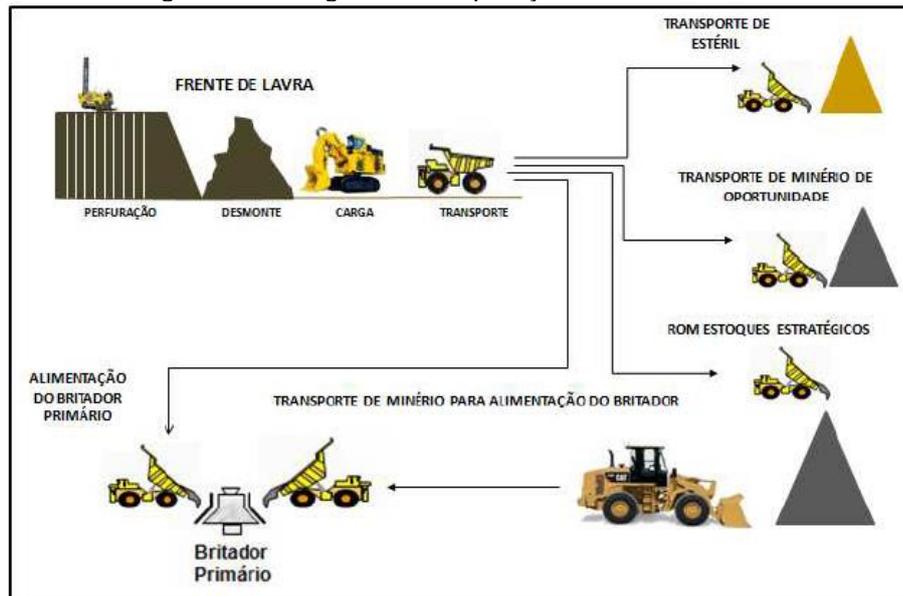
5.1 Descrição da Mina

A CSN detém os direitos minérios da mineração Casa de Pedra, situada na cidade de Congonhas/MG.

A lavra do minério de ferro começa pela fragmentação do minério in situ por meio das operações de perfuração e desmonte de rochas. Logo após o minério é carregado por pás carregadeiras e escavadeiras hidráulicas nos caminhões fora de estrada. Segundo Rodvalho (2013), o minério pode ser transportado para pilhas estratégicas de ROM, britagem primária ou pilha de “minério de oportunidade” (minério com baixo teor que futuramente pode ser beneficiado). O estéril, por sua vez, é removido e transportado para as pilhas de estéril.

A figura 09 descreve o fluxograma das operações de lavra realizadas pela CSN na mina de Casa de Pedra.

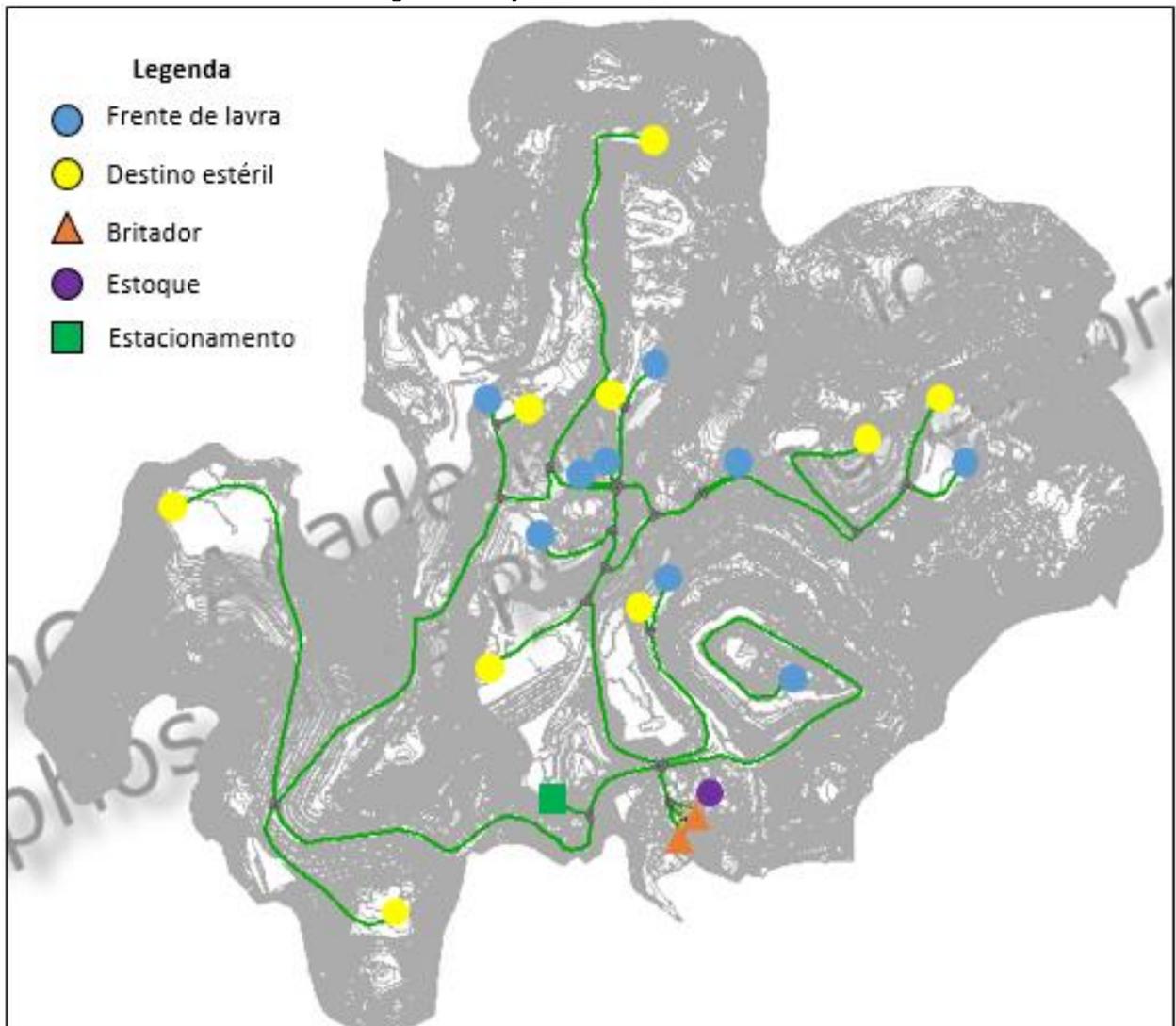
Figura 09 Fluxograma das operações de lavra da CSN



Fonte: Rodvalho (2013) apud CSN

O layout da mina no modelo de simulação constituiu-se de 9 frentes de lavra e 12 destinos entre eles 2 britadores e 1 estoque. A topografia e as rotas utilizadas estão presentes na figura 10. Além desses pontos, o layout contemplou também um estacionamento de onde saem os caminhões logo após a troca de turnos.

Figura 10 Layout da mina em estudo



Fonte: Rodvalho (2013) apud CSN

5.2 Modelagem dos dados de entrada

O modelo assume uma operação com os equipamentos e especificações que são apresentados na tabela 01.

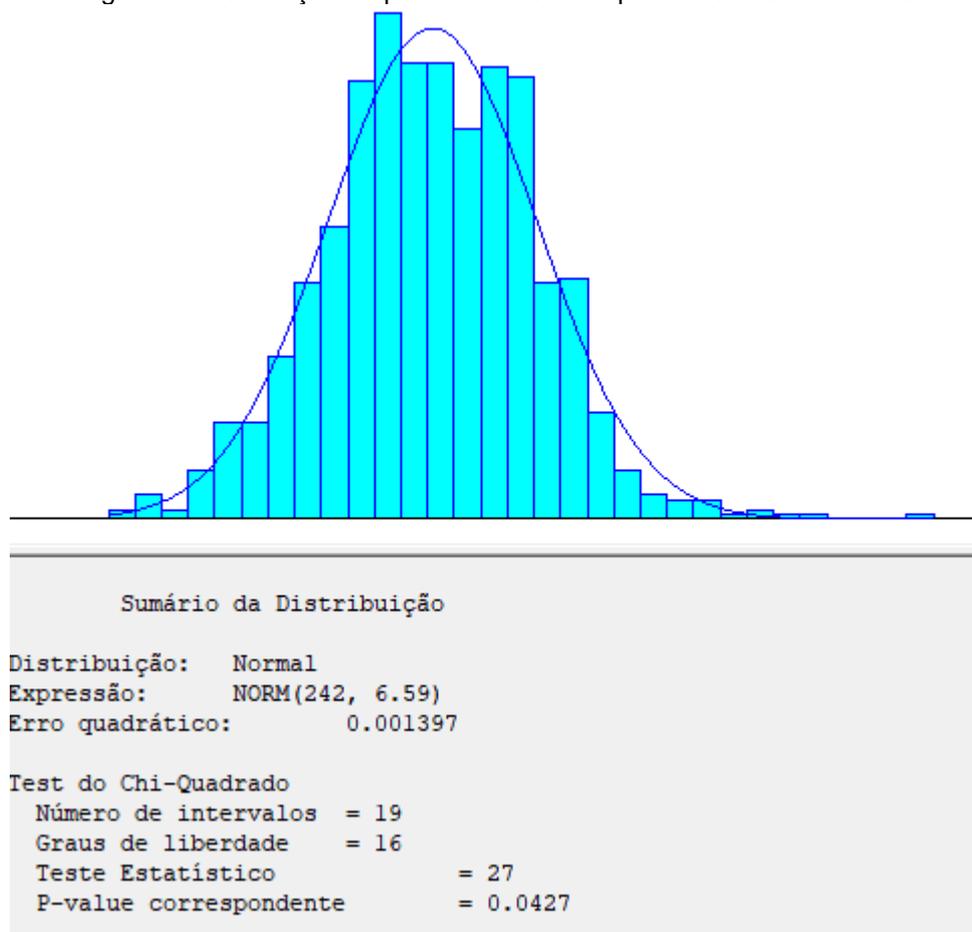
Tabela 1 Dados sobre a frota

Equipamento	Tipo	Quantidade	Capacidade Nominal
Komatsu PC5500	<i>shovel</i>	4	26 m ³
CAT 6060	<i>shovel</i>	2	34 m ³
CAT 994H	<i>wheel front loader</i>	2	20 m ³
CAT 793F Serie2	Caminhão fora de estrada	24	250 t

Fonte: elaboração própria

Do arquivo de Excel foram retirados 1006 dados para a análise da capacidade média de transporte por caminhão através do programa *Input Analyzer*. A capacidade média de transporte obtida correspondeu a uma distribuição de probabilidade normal com média de 242 e um desvio padrão de 6,52 toneladas de acordo com a figura 11. O valor do *p-value* obtido foi menor do que 5%, desse modo pode-se afirmar que os dados realmente se adequam em uma distribuição normal de probabilidade.

Figura 11 Distribuição de probabilidade da capacidade dos caminhões



Fonte: elaboração própria

Dessa forma, o input para o modelo de simulação ficou segundo a figura 12. A figura corresponde a uma tela do programa DSIM. O *equipment ID* corresponde a identificação de cada equipamento de carga, sendo as PM, pás carregadeiras e as ES shovels. Os tempos de carregamento considerados foram retirados da planilha de excel e corresponde ao *loading time*. Por sua vez, o *loading factor* corresponde a capacidade média de cada caminhão.

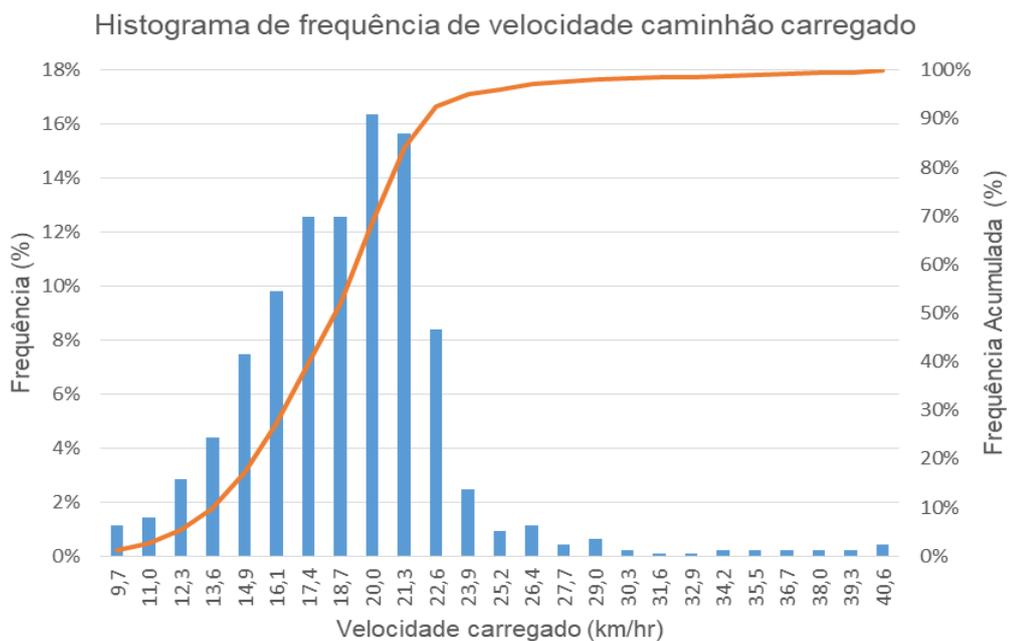
Figura 12 Planilha do DSIM contendo a carga média dos caminhões

Equipment ID	Truck Type	Loading Time	Loading Factor [ton]
PM_9909	CM	000:04:15	normal(242, 6.59)
PM_9910	CM	000:04:52	normal(242, 6.59)
ES_5504	CM	000:02:36	normal(242, 6.59)
ES_5502	CM	000:02:26	normal(242, 6.59)
ES_5503	CM	000:02:36	normal(242, 6.59)
ES_5501	CM	000:02:57	normal(242, 6.59)
ES_6003	CM	000:02:27	normal(242, 6.59)
ES_6004	CM	000:02:27	normal(242, 6.59)

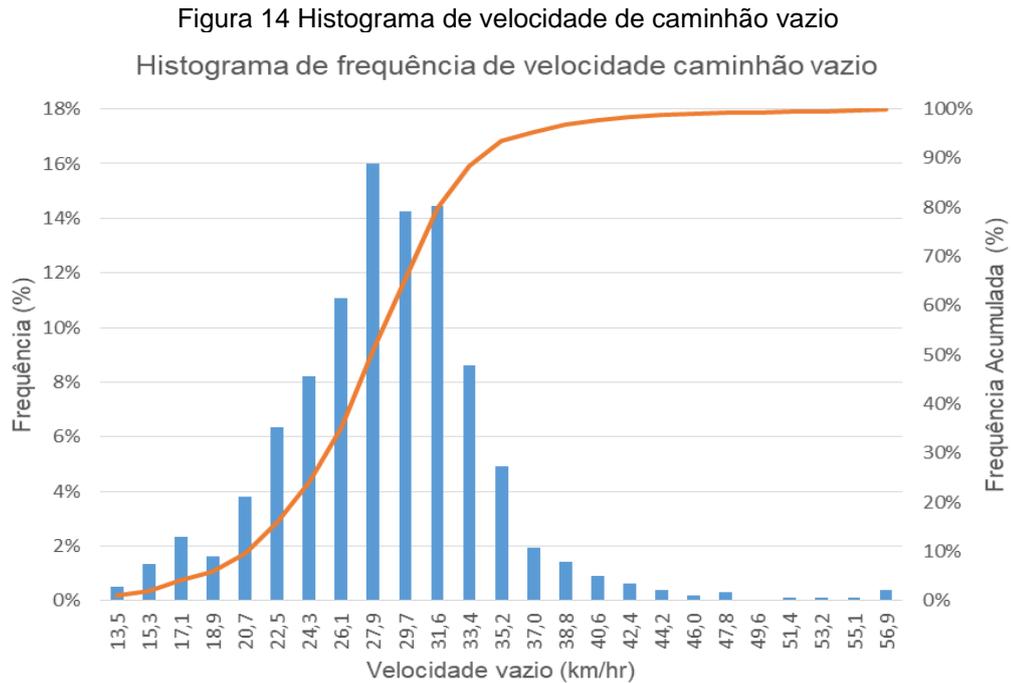
Fonte: elaboração própria

Da mesma forma, após o refino dos dados com a retirada de *outliers*, foram usados 978 dados para calcular as velocidades médias. As velocidades médias do sistema convencional obtida pelas análises dos dados foram de 27,9 Km/h para caminhões vazios (figura 12) e 18,4 km/h para caminhões carregados (figura 13), isso para caminhões tradicionais.

Figura 13 Histograma de velocidade de caminhão carregado



Fonte: elaboração própria



Fonte: elaboração própria

Os cenários futuros simulados foram compostos por caminhões autônomos, o primeiro (cenário A), com velocidades médias inferiores ao sistema convencional e o segundo (cenário B), com velocidades superiores ao sistema convencional. As velocidades médias para o cenário A, foram baseadas na tese desenvolvida por Parreira (2013) e estão presentes na tabela 2. A categoria de caminhões estudadas na tese correspondeu ao CAT793, os mesmos utilizados nesse presente estudo. Sendo assim, torna-se possível usar como referência as velocidades médias utilizadas no cenário A. Já para o sistema cenário B, as velocidades foram calculadas através da fórmula (2) usando como base os dados do sistema convencional em estudo. Por fim, o último cenário simulado foi o cenário C utilizando as velocidades do cenário A, porém com a frota de caminhões autônomos reduzida em dois caminhões.

Tabela 2 Velocidade média dos sistemas autônomos

Cenário	Vazio (km/h)	Carregado (km/h)	Tamanho da frota
A	24,8	16,6	24 caminhões
B	33	20,8	24 caminhões
C*	24,8	16,6	22 caminhões

*frota de veículos menor

Fonte: elaboração própria

Os índices de manutenção MTBF e MTTR foram repassados pela mineradora para cada equipamento com base no histórico do equipamento e foram mantidos constantes para todos os cenários. Parreira (2013) demonstra que os sistemas convencional e autônomo apresentam uma pequena variação em termos de índices de manutenção de aproximadamente 0,3 horas para cada 24 horas de operação. O veículo autônomo apresenta uma maior quantidade de dispositivos e sensores, isto pode ocasionar em uma maior possibilidade de falhas e um maior tempo de manutenção das falhas.

O plano de movimentação simulado está exposto no Apêndice e por fim, a metodologia de despacho utilizada foi o *default* do DSIM, espera-se com ele minimizar os tempos perdidos na operação de transporte relacionados a filas nas praças de carregamento.

6 Resultados e discussões

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos relatórios gerados pelo Dsim após a simulação dos cenários. Todos os cenários foram simulados 100 vezes por um período de 24 horas.

No primeiro momento, foi importante verificar a aderência entre as movimentações de massa real e simulada de modo a validar o modelo computacional desenvolvido no software Dsim. A partir daí foram feitas as simulações dos outros cenários e os resultados obtidos estão descritos na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 Dados da movimentação de massa e utilização dos cenários

Cenário	Média da massa movimentada (kT)	Intervalo de confiança (kT)	Ut. Média dos caminhões (%)
Real	240	-	-
Simulado	235	± 1,52	70
Cenário A	250	± 1,72	77
Cenário B	269	± 1,76	73
Cenário C	238	± 1,22	78,4

Fonte: elaboração própria

O intervalo de confiança estipulado para a realização das simulações foi estabelecido em um nível de 95 %. Dessa forma podemos afirmar que em 95 % das simulações realizadas a média de movimentação da massa se encontra entre a média amostral e o intervalo de confiança calculado. Partindo desse princípio e estabelecendo a média amostral das 100 simulações obtida, podemos comparar o real e o simulado de modo a validar ou não o modelo computacional desenvolvido.

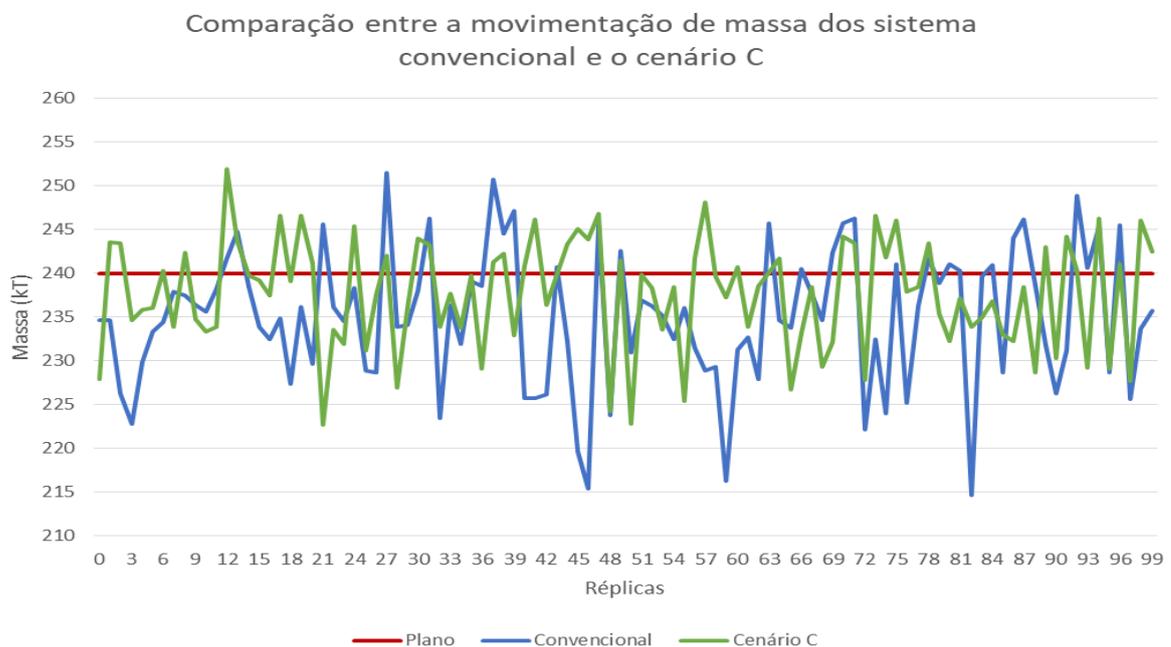
A média obtida para o simulado foi de 235.000 toneladas, ou seja, representou 98 % da massa real movimentada. Dessa forma, podemos perceber que o modelo computacional apresentou um desvio em relação ao real de apenas 2%, inferior ao desvio máximo estabelecido para a validação do modelo que foi de 5 %.

Após a validação do modelo simulou-se os dois cenários futuros com a operação composta por caminhões autônomos. Pode-se perceber que, o cenário A apresentou movimentação de massa 6,4 % maior que o sistema convencional simulado. Do

mesmo modo, o cenário B apresentou movimentação de massa 14,5 % maior. Esses resultados já eram esperados, pois o cenário autônomo não apresenta as perdas de tempo ligadas aos fatores humanos.

Diante dos resultados acima descritos e da facilidade de se analisar cenários diferentes com a simulação, resolveu-se comparar no cenário C, o sistema convencional de transporte com um sistema autônomo reduzido com a frota de 22 caminhões e com as mesmas velocidades do cenário A. Os resultados foram plotados na figura 14. Pode-se inferir através deles e da tabela 3 que, caso a frota convencional seja substituída por uma frota menor de caminhões autônomos conseguiríamos manter a mesma movimentação de massa. Sendo que, a movimentação de massa diária do cenário C obtida foi de 238 kT, diante do sistema convencional que foi de 235 kT. Desse modo, a operação com caminhões autônomos se torna otimista já que teríamos a redução de custos relacionadas a aquisição e manutenção relacionados a 2 caminhões.

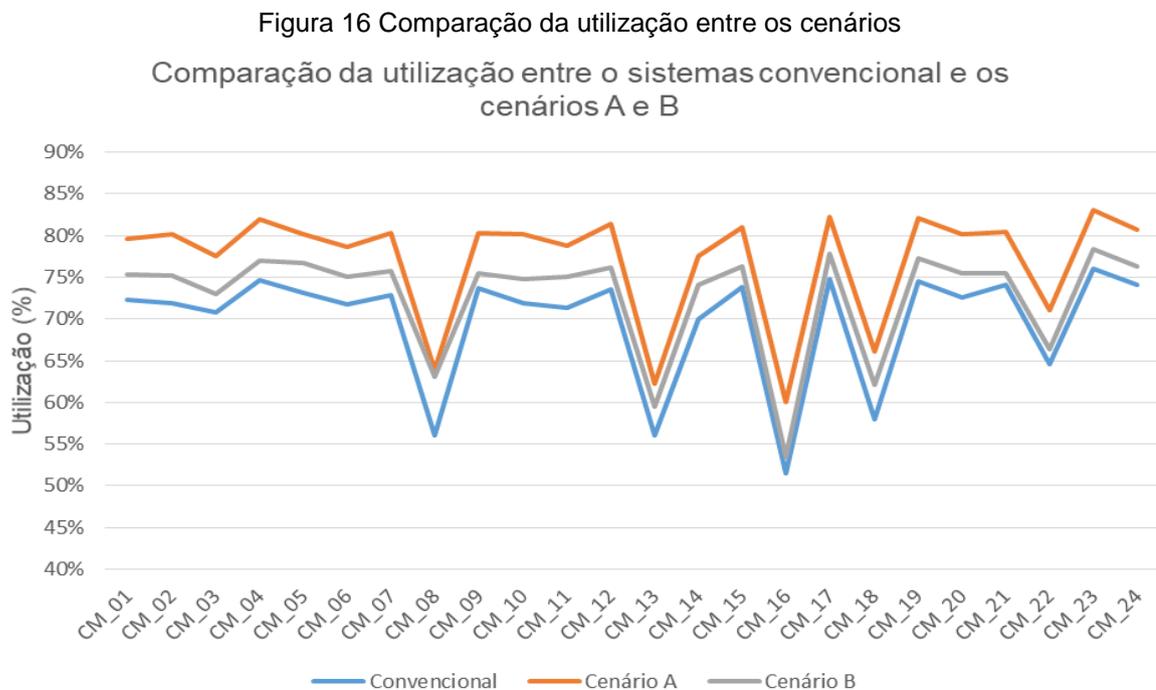
Figura 15 - Comparação entre o sistema convencional e o cenário C.



Fonte: elaboração própria

Ainda embasado nos resultados da Tabela 3, pode-se realizar a análise de acordo com a utilização de cada cenário de transporte. Comparando as utilizações entre os três cenários percebe-se que o cenário C apresentou o maior nível de utilização do sistema de transporte. Isso se deve ao fato de ele ter a frota de caminhões autônomas

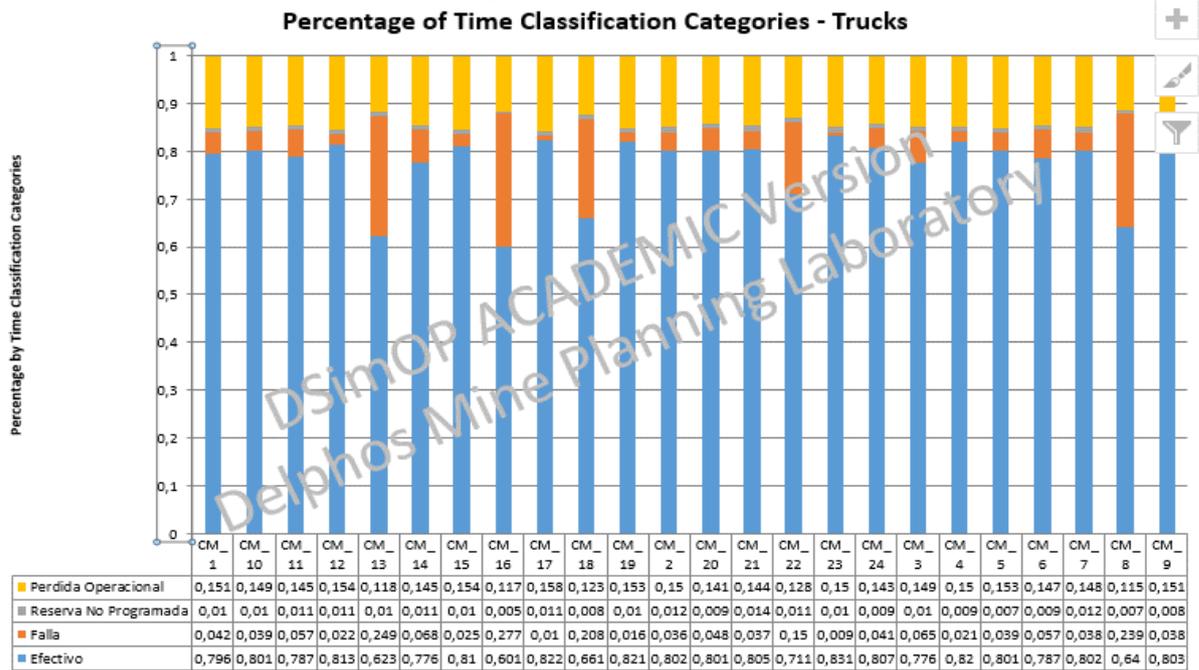
e apresentar menos tempos de perda. Já os resultados da utilização por caminhão para os cenários A e B foram plotados na figura 15. Como esperado, podemos perceber uma utilização maior nos sistemas autônomos, porém ao se comparar os dois sistemas temos a utilização do cenário A maior. A média da utilização do sistema convencional se encontra em torno de 70%, para o cenário A, 77% e, para o cenário B de 73%. aparentemente, esses resultados demonstraram que não há uma correlação entre o aumento da velocidade média e o aumento da utilização dos caminhões. Outros fatores podem estar afetando o panorama da a utilização destes cenários como, por exemplo, os tempos de fila do sistema. Portanto, seriam necessárias análises mais completas e utilizando outros indicadores operacionais para verificar a existência ou não de tal correlação.



Fonte: elaboração própria

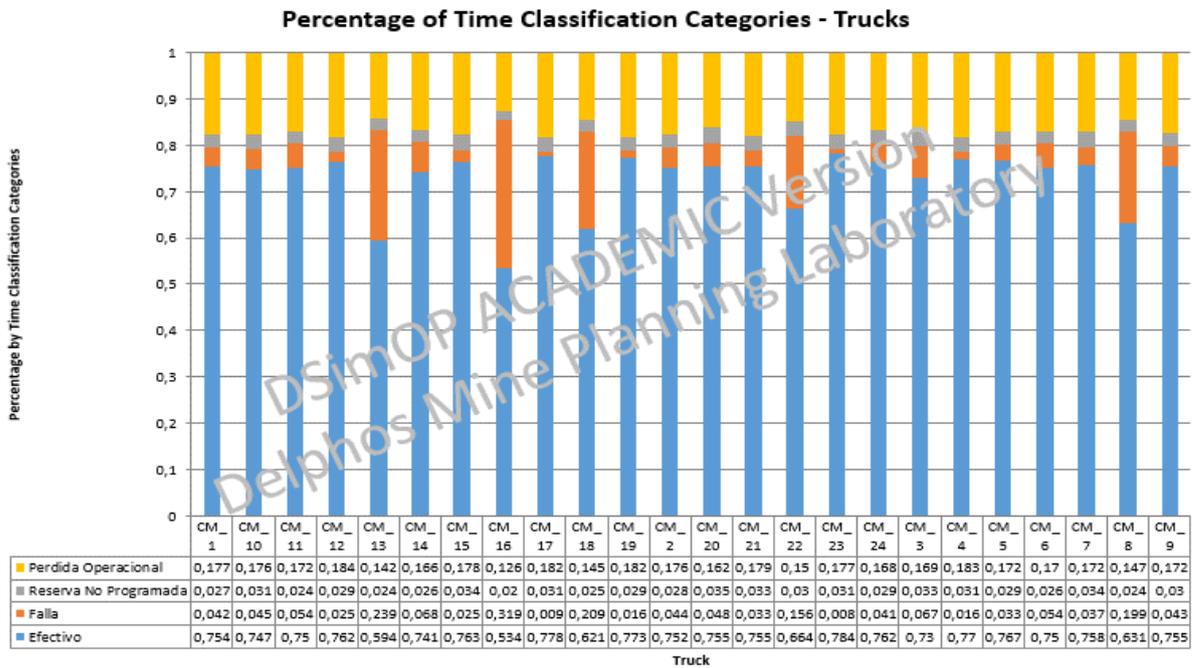
Pode-se levantar alguns motivos para demonstrar a diferença entre as utilizações entre os sistemas AHS. As figuras 16 (cenário A) e 17 (cenário B) apresentam a descrição das porcentagens do tempo de operação dos caminhões. Podemos perceber que o tempo de perda operacional para os equipamentos do cenário B é maior.

Figura 17 Gráfico da porcentagem da classificação do tempo para o cenário A



Fonte: elaboração própria

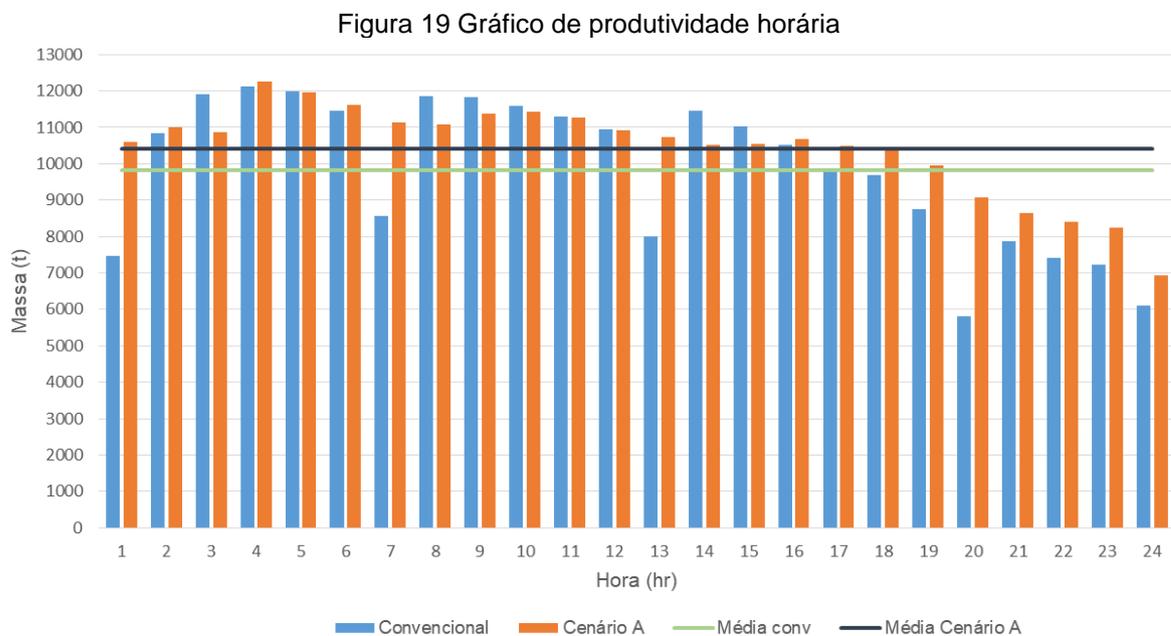
Figura 18 Gráfico da porcentagem da classificação do tempo para o cenário B



Fonte: elaboração própria

Pode-se também avaliar o comportamento da produtividade horária ao decorrer de um dia de operação entre o sistema convencional e o cenário A. A figura 19 apresenta a comparação entre a produtividade horária dos sistemas convencional e o cenário A

durante o período de 24 horas de operação. A média da produtividade horária para o sistema convencional foi de 9.820 toneladas e para o cenário A de 10.400 toneladas, ou seja, 6 % maior. A produtividade do cenário convencional simulado apresentou quedas de produtividade acentuadas nas horas de operação após a troca de turno (1,7,13 e 19). Como os caminhões do sistema autônomo não são afetados pelos tempos de perda relacionados a troca de turno, nota-se que a variabilidade da produtividade é menor para eles. Percebemos também uma tendência de decréscimo da produtividade com o fim do dia, isso se deve ao fato de termos considerado para a realização das simulações um plano determinístico de movimentação diária e a eminência do comprimento deste plano estar próximo.



A metodologia utilizada para comparar a economicidade dos sistemas demonstrou que o custo de capital relacionado à frota de caminhões de uma mina é exorbitante. Parreira (2013) estimou os custos de caminhões convencionais CAT793D, os mesmos usados neste presente estudo. Cada caminhão tem um custo estimado de 4 milhões de dólares, já para caminhão autônomo, 5 milhões de dólares (tabela 4). Desse modo, estima-se que os caminhões autônomos são 20% mais caros que os convencionais. Outros fatores importantes a serem analisados segundo Brundrett (2014) são os custos adicionais para a implantação do sistema autônomo, custos relacionados a: infraestrutura de telecomunicações e posicionamento, mapeamento digital da mina,

instalação, treinamentos e comissionamento. Parreira (2013) estimou os custos de implantação para uma frota de 7 caminhões CAT793D próximos a 7 milhões de dólares.

Tabela 4 Custos relacionados a uma frota de 7 caminhões autônomos

Fonte: adaptado de Parreira (2013)

Caminhão	Custo de aquisição (\$)	Custo de implantação (\$)
CAT 793 Convencional	4.000.000,00	-
CAT 793 Autônomo	5.000.000,00	6.690.000,00

Fonte: adaptado de Parreira (2013)

Entretanto, como demonstrado através das simulações, a utilização de caminhões autônomos é maior, ocasionando em uma produtividade maior. Além disso, Parreira (2013) e Brundrett (2014) demonstram nos trabalhos realizados que o sistema autônomo consome menos combustível e menos peças de reposição e, aumentam a vida útil do sistema freio-pneu. Desse modo, apesar do alto capital investido para converter a operação convencional em operação autônoma, uma análise mais ampla se faz necessária para conhecermos os reais custos/benefícios dos sistemas autônomos em relação aos convencionais.

7 Conclusões

A simulação é uma ferramenta de apoio muito útil para analisar previamente as mudanças em um processo. O software de simulação Dsim mostrou-se uma alternativa interessante e útil para simular cenários complexos de carregamento e transporte. A partir do modelo computacional criado e validado, pode-se simular diversos cenários futuros em um curto período de tempo. Quanto maior o banco de dados para entrar no modelo mais realístico se torna o modelo.

O modelo de simulação construído foi validado, pois apresentou um desvio inferior a 5 % em comparação com o cenário real, permitindo simular cenários futuros como base para tomar decisões no processo.

A simulação, de acordo com a metodologia usada, demonstrou que a operação realizada por caminhões autônomos é atraente. Além de permitir um maior controle da operação, a movimentação de massa nos cenários do autônomos foi em média de 6,4 % a 14,5 % maior e a utilização aumento de 3 % a 8,4 % em comparação com o cenário convencional.

Em relação a produtividade horária, o cenário autônomo A apresentou maior produtividade e menor variabilidade ao ao cenário convencional simulado. Sendo que, a produtividade média horária do sistema autônomo foi 6 % maior.

Em relação a utilização, o cenário A apresentou utilização de 77 % e o cenário B de 73 %, sendo que a velocidade média dos caminhões no sistema cenário B são superiores aos do cenário A.

A movimentação de massa diária do cenário C obtida foi de 238 kT, diante do sistema convencional que foi de 235 kT. Pode-se concluir através das simulações realizadas que, diante das variáveis usadas neste estudo, com 22 caminhões autônomos conseguiríamos manter a produção diária do sistema adotado atualmente, além de termos uma redução de custos na aquisição e manutenção de equipamentos. Entretanto, a análise econômica nos mostra que para se ter uma maior certeza das oportunidades precisaríamos de um maior banco de dados.

Sugestões para trabalhos futuros

Desenvolver modelos de simulação que considerem dados de custos, manutenção e indicadores operacionais de uma frota real de caminhões autônomos.

Realizar diversas simulações variando o tamanho da frota de caminhões e realizar análises considerando outros indicadores operacionais além da produtividade, utilização e movimentação de massa.

Apêndice

Figura 20 Plano simulado

Plan

	Equipment ID	Front ID	Destination	Delay	Maximum Tonnage [kton]	Maximum Working Time	Priority
1	ES_5501	15K	BRIT	000:00:00	9	024:00:00	0
2	ES_5501	15K	BRIT2	000:00:00	10	024:00:00	0
3	ES_5501	15K	DEP_BAT	000:00:00	1	024:00:00	0
4	ES_5501	15K	LAVCONJT	000:00:00	4	024:00:00	0
5	ES_5501	15K	DEP_OP	000:00:00	1	024:00:00	0
6	ES_5501	15K	EST_01	000:00:00	3	024:00:00	0
7	ES_5501	15K	EST_FERROUS	000:00:00	13	024:00:00	5
8	ES_5502	13S	DEP_13T	000:00:00	13	024:00:00	0
9	ES_5502	13S	LAVCONJT	000:00:00	14	024:00:00	0
10	ES_5502	13S	DEP_OP	000:00:00	8	024:00:00	0
11	ES_5502	13S	EST_FERROUS	000:00:00	7	024:00:00	5
12	ES_5503	7K	BRIT	000:00:00	19	024:00:00	0
13	ES_5503	7K	BRIT2	000:00:00	19	024:00:00	0
14	ES_5503	7K	DEP_BAT	000:00:00	1	024:00:00	0
15	ES_5503	7K	DEP_OP	000:00:00	4	024:00:00	0
16	ES_5504	8O	DEP_BAT	000:00:00	1	024:00:00	0
17	ES_5504	8O	DEP_OP	000:00:00	1	024:00:00	0
18	ES_5504	8O	EST_01	000:00:00	2	024:00:00	0
19	ES_5504	8O	EST_29	000:00:00	4	024:00:00	0
20	ES_6003	6L	DEP_BAT	000:00:00	7	024:00:00	0
21	ES_6003	6L	DEP_OP	000:00:00	41	024:00:00	0
22	ES_6004	14G	LAVCONJT	000:00:00	36	024:00:00	0
23	PM_9909	11J	BRIT	000:00:00	3	024:00:00	0
24	PM_9909	11J	BRIT2	000:00:00	14	024:00:00	0
25	PM_9909	11J	EST_01	000:00:00	2	024:00:00	0
26	PM_9910	11J1	BRIT2	000:00:00	3	024:00:00	0
27	PM_9910	11J1	DEP_OP	000:00:00	2	024:00:00	0
28	PM_9910	11J1	EST_01	000:00:00	2	024:00:00	0
29	PM_9910	T06	BRIT	000:00:00	3	024:00:00	0
30	PM_9910	T06	BRIT2	000:00:00	8	024:00:00	0

Fonte: elaboração própria

Referências

ARENALES, M. N. et al. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007. 524p. Reimpressão.

BRUNDRETT, S. 2014. **Industry Analysis of Autonomous Mine Haul Truck Commercialization**. 81 p. Published Master Dissertation. The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. 2014.

CASSANDRAS, C. & LAFORTUNE, S. (2010). **Introduction to Discrete System**. 2^a edição.

CATTERPILAR. **Cat Autonomous trucks Haul 1b Tonnes**. Disponível em <<http://www.mining.com/web/cat-autonomous-trucks-haul-1b-tonnes/>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

DELPHOS. **Manual do DSIM Open Pit v1.2. 2016** . Disponível em: <<http://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/99-dsim-open-pit>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

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

KOMATSU. **Komatsu Celebrates 10th Anniversary of Commercial Deployment of AHS**. Disponível em <[http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/NewsAndPublications/News/Pages/Komatsu-celebrates-10th-anniversary-of-commercial-deployment-of-Autonomous-Haulage-System-\(AHS\).aspx](http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/NewsAndPublications/News/Pages/Komatsu-celebrates-10th-anniversary-of-commercial-deployment-of-Autonomous-Haulage-System-(AHS).aspx)>. Acesso em: 21 nov. 2018.

LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica de lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto-propelido**. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. 2010. 105p.

MAMBO, I. F. **Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina à céu aberto de carvão**. 2017. 62 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

PARREIRA, J. 2013 . **An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System**. 212 p. Published Doctoral Dissertation. The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. 2013.

PARREIRA, J.; MEECH, J.. **Simulation of an Open Pit Mine to Study Autonomous Haulage Trucks**. Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T2Z4. 2012.

PINTO, L. R. **Curso de Pesquisa Operacional Aplicada à Mineração: Programação Matemática, Teoria das Filas e Simulação**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas – UFOP, 2002. 61 p. (Apostila).

PRADO, D. **Teoria das Filas e da Simulação**, 5ª ed. Nova Lima: Falconi, 2014a.

PEREIRA, R. M. **O uso da simulação na análise de cenários em operações de carregamento e transporte na Mineração Usiminas S.A.**. 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

RIVERA, J. R. M. 2014. **Efectos de la Incorporación de Tecnologías Autònomas em el Diseño y la Planificación Minera**. Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade do Chile, Santiago de Chile, 2014.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção; 2006. 87p.

RODOVALHO, E. C. **Aplicação de Ferramentas de Simulação em Operações Mineiras para Determinação de Índices Operacionais Utilizados em Planos de Lavra Adaptados ao Estudo de Caso da Mineração Casa de Pedra - CSN**. 2013.

111 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2013.

SAKURADA, N.; MIYUKE, D. I. **Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços**. 2009. Revista Gestão e Produção, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 25-43, jan.-mar.

SOUZA, W. T. J. **Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão. Estudo de caso: mineração de bauxita**. 2012. 146p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Brasil, 2012.

SUBTIL, R. F.; SILVA, D. M. & ALVES, J. C. (2011). **A practical approach to truck dispatch for open pit mines**. 35 Th APCOM Symposium, pp. 765-777.

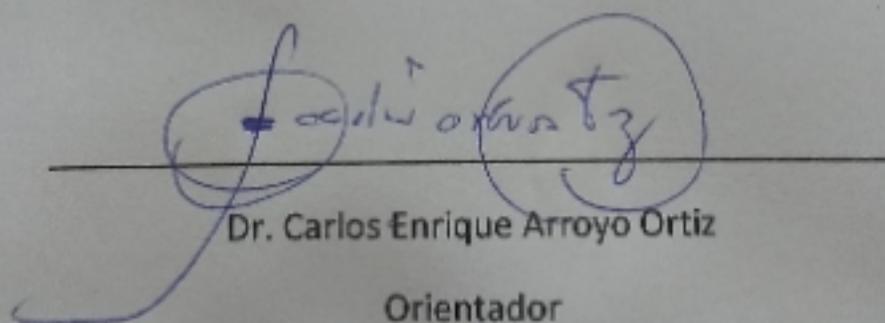
STURGUL, J.R. **Modeling and Simulation in Mining – Its Time Has Finally Arrived**, SIMULATION: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International; 76: 286, 2001.

TAN, Y.; CHINBAT, U.; MIWA, K. e TAKAKUMA, S. **Operations Modeling and Analysis of Open Pit Copper Mining Using GPS Tracking Data**. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. C.Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M.Uhrmacher, eds.2012.

TORRES, M. **Estatística Aplicada à Administração**. Universidade Aberta do Brasil. 2017.

VALE. **Vale tera a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no Brasil**. Disponível em <
<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx> >. Acesso em: 21 nov. 2018.

Certifico que o aluno André Felipe Ferreira de Oliveira, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Análise comparativa para tomada de decisão entre sistemas de transporte convencionais vs autônomos", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Orientador

Ouro Preto, 21 de dezembro de 2018.