

VICTORIA COSTA FERREIRA

victoriacostaf@gmail.com

**Um modelo de simulação computacional aplicado ao problema de
planejamento de lavra em minas a céu aberto**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Orientador(a): Guido Pantuza Jr.

**Governador Valadares
Julho de 2015**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
CAMPUS GOVERNADOR VALADARES
COLEGIADO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
 Av. Minas Gerais, nº 5.189 – Ouro Verde – Governador Valadares – Minas Gerais – CEP: 35057-760
 Tel: (33) 3717 - 0107



ANEXO VII – ATA DE DEFESA

Aos 03 dias do mês de julho de 2015, às 10 horas, na sala 11 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pela aluna Victoria Costa Ferreira, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Guido Pantuza Júnior, Débora Rosa Nascimento e Djalma Araújo Rangel.

O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: Um Modelo de Simulação Computacional Aplicado ao Problema de Planejamento de Lavra em Minas a Céu Aberto. A comissão examinadora deliberou, pela aprovação do(a) aluno (a), com a nota 95,0. No caso de aprovação, o aluno possui **15 dias** corridos para entregar as correções. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno(a).

Governador Valadares, 03 de julho de 2015.

Orientador: Guido Pantuza Jr.

Professora: Débora Rosa Nascimento

Professor: Djalma Araújo Rangel

Aluno: Victoria Costa Ferreira



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
CAMPUS GOVERNADOR VALADARES
COLEGIADO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Av. Minas Gerais, nº 5.189 – Ouro Verde – Governador Valadares – Minas Gerais – CEP: 35057-760
Tel: (33) 3717 - 0107



ANEXO VI - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Um modelo de simulação computacional aplicado ao problema de lavra em minas a céu aberto” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

Governador Valadares, 03 de julho de 2015

Victoria Costa Ferreira

Victoria Costa Ferreira

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre me abençoar e me dar saúde, força e capacidade para continuar estudando e superar as dificuldades.

À minha mãe Mércia, pela criação a mim proporcionada e por ser meu guia espiritual há 15 anos, me fazendo ter certeza de que não estou sozinha nessa caminhada. E ao meu pai Jorge, pela criação, pelo incentivo para que eu cursasse Engenharia de Produção e durante todo o curso, não medindo esforços para que eu realizasse mais um sonho.

Às minhas irmãs Ísis e Caroline, por todo carinho, motivação, dedicação, apoio e paciência, sempre me incentivando a superar todos os obstáculos e a acreditar no meu potencial.

À Nicole, pelos 13 anos de amizade e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos professores que fizeram parte do meu crescimento pessoal e formação profissional, e em especial ao professor Guido, pela orientação e pela oportunidade concedida a mim de participar do projeto de pesquisa.

Ao Henrique e ao Luís, amigos conquistados durante a faculdade, que sempre me ajudaram e me apoiaram.

À Jéssica, pela parceria durante o projeto de pesquisa.

A todos os grandes amigos conquistados nos últimos cinco anos e durante toda minha vida, pela dedicação, apoio, carinho, motivação e por deixarem meus dias mais divertidos.

Aos tios, tias, avós e primas, por acreditarem na minha capacidade e sempre me incentivarem a seguir em frente.

Finalmente, a todos que de alguma maneira, contribuíram para a minha caminhada escolar e formação acadêmica.

*“O saber é o único utensílio da
produção que não está sujeito a
rendimentos decrescentes”*

John Clark

RESUMO

FERREIRA, Victoria Costa. Um modelo de simulação computacional aplicado ao problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto, 2015. (Graduação em Engenharia de Produção). Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Governador Valadares.

Esta monografia tem como foco o problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto e os dados utilizados para o estudo referem-se a minas da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Tem como objetivo propor um modelo de simulação computacional para otimizar o problema citado, utilizando os resultados de um modelo matemático para gerar um plano de lavra com alocação dinâmica de caminhões. No planejamento de lavra é necessário, basicamente, determinar o sequenciamento e o número de viagens dos veículos de transporte e a alocação de equipamentos de carga, respeitando as restrições, características das frentes de lavra e limites da mina. Com os resultados alcançados foi possível mostrar a capacidade do modelo em atingir a produção pretendida, considerando diferentes tipos de roteamento da frota e ainda, de maximizar a utilização dos caminhões do sistema, o que reduz os custos do processo. O modelo também demonstrou um limite máximo de produção, independente do número de caminhões utilizados. As conclusões evidenciam a funcionalidade e eficiência das ferramentas da pesquisa operacional, mais precisamente da simulação computacional, em resolver o problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto.

Palavras-chave: Planejamento de lavra; Produção; Simulação Computacional; Roteamentos.

ABSTRACT

This monograph focuses on mine planning problem in open pit mines and the data used for the study refer to mines in the Iron Quadrangle region of Minas Gerais. It aims to propose a computer simulation model to optimize the aforementioned problem by using the results of a mathematical model to generate a mining plan with dynamic allocation of trucks. In mine planning is necessary, basically, determine the sequence and the number of trips of transport vehicles and the allocation of cargo equipment, respecting the restrictions, characteristics of mining fronts and mine boundaries. With the results achieved has been possible to show the model's ability to achieve the desired production, considering different types of fleet routing and also to maximize the utilization of system trucks, which reduces process costs. The model also showed a ceiling of production, regardless of the number of used trucks. The findings demonstrate the functionality and efficiency of operations research tools, specifically computer simulation, in solving the mine planning problem in open pit mines.

Key-words: *Mine planning; Production; Computer Simulation; Routings.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Heurística VND	27
Figura 2	Heurística VNS	27
Figura 3	Notação básica para o DCA	32
Figura 4	Símbolos básicos de um fluxograma	32
Figura 5	DCA	43
Figura 6	Implementação Promodel	43
Figura 7	Resultado da implementação para uma das minas	45
Figura 8	Resultado para o teste de roteamento referente à produção	48
Figura 9	Resultado para o teste de roteamento referente à produtividade média das carregadeiras	48
Figura 10	Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo A para a mina 1	50
Figura 11	Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo B para a mina 1	51
Figura 12	Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo A para a mina 3	52
Figura 13	Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo B para a mina 3	52

LISTA DE QUADROS

Tabela 1	Descrição dos cenários	46
Tabela 2	Meta de produção x Produção alcançada	49
Tabela 3	Roteamento “Aleatório” para mina 1 referente à produção	64
Tabela 4	Roteamento “Mais disponível” para mina 1 referente à produção	64
Tabela 5	Roteamento “Por vez” para mina 1 referente à produção	64
Tabela 6	Resultado para a mina 1 referente à produção	65
Tabela 7	Roteamento “Aleatório” para mina 1 referente à produtividade das carregadeiras	65
Tabela 8	Roteamento “Mais disponível” para mina 1 referente à produtividade das carregadeiras	65
Tabela 9	Roteamento “Por vez” para mina 1 referente à produtividade das carregadeiras	65
Tabela 10	Resultado para a mina 1 referente à produtividade média das carregadeiras	66
Tabela 11	Roteamento “Aleatório” para mina 2 referente à produção	66
Tabela 12	Roteamento “Mais disponível” para mina 2 referente à produção	66
Tabela 13	Roteamento “Por vez” para mina 2 referente à produção	66
Tabela 14	Resultado para a mina 2 referente à produção	66
Tabela 15	Roteamento “Aleatório” para mina 2 referente à produtividade das carregadeiras	67
Tabela 16	Roteamento “Mais disponível” para mina 2 referente à produtividade das carregadeiras	67
Tabela 17	Roteamento “Por vez” para mina 2 referente à produtividade das carregadeiras	67
Tabela 18	Resultado para a mina 2 referente à produtividade média das carregadeiras	67
Tabela 19	Roteamento “Aleatório” para mina 3 referente à produção	68
Tabela 20	Roteamento “Mais disponível” para mina 3 referente à produção	68

Tabela 21	Roteamento “Por vez” para mina 3 referente à produção	68
Tabela 22	Resultado para a mina 3 referente à produção	68
Tabela 23	Roteamento “Aleatório” para mina 3 referente à produtividade das carregadeiras	69
Tabela 24	Roteamento “Mais disponível” para mina 3 referente à produtividade das carregadeiras	69
Tabela 25	Roteamento “Por vez” para mina 3 referente à produtividade das carregadeiras	69
Tabela 26	Resultado para a mina 3 referente à produtividade média das carregadeiras	69
Tabela 27	Roteamento “Aleatório” para mina 4 referente à produção	70
Tabela 28	Roteamento “Mais disponível” para mina 4 referente à produção	70
Tabela 29	Roteamento “Por vez” para mina 4 referente à produção	70
Tabela 30	Resultado para a mina 4 referente à produção	70
Tabela 31	Roteamento “Aleatório” para mina 4 referente à produtividade das carregadeiras	71
Tabela 32	Roteamento “Mais disponível” para mina 4 referente à produtividade das carregadeiras	71
Tabela 33	Roteamento “Por vez” para mina 4 referente à produtividade das carregadeiras	71
Tabela 34	Resultado para a mina 4 referente à produtividade média das carregadeiras	71
Tabela 35	Produção para o caminhão tipo A para a mina 1	72
Tabela 36	Produção para o caminhão tipo B para a mina 1	72
Tabela 37	Produção para o caminhão tipo A para a mina 3	73
Tabela 38	Produção para o caminhão tipo B para a mina 3	73

ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES

PO	Pesquisa Operacional	14
PMM	Problema da Mistura de Minérios	16
PAC	Problema de Alocação de Caminhões	16
PMB	Produção Mineral Brasileira	18
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração	18
PL	Programação Linear	24
AG	Algoritmo Genético	26
VND	Método de descida em vizinhança variável	26
VNS	Método de pesquisa em vizinhança variável	26
DCA	Diagrama de ciclo de atividades	32
POLAD	Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica	42

Sumário

1	INTRODUÇÃO AO ESTUDO	133
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	133
1.1.1	Descrição do problema em estudo	15
1.1.1.1	Problema da mistura de minérios	15
1.1.1.2	Problema de alocação de caminhões	Erro! Indicador não definido. 6
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral.....	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	PESQUISA OPERACIONAL.....	21
2.1.1	Otimização	23
2.1.2	Simulação Computacional	27
2.1.2.1	Conceitos básicos e etapas de implementação.....	27
2.1.2.2	Classificação dos modelos e aplicações da simulação.....	33
2.1.3	Pesquisa Operacional aplicada ao setor mineral.....	34
3	METODOLOGIA	38
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	38
3.2	METODOLOGIA ADOTADA.....	39
4	MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	41
4.1	DIAGRAMA DE CICLO DE ATIVIDADES	41
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO	43
4.2.1	Descrição dos cenários.....	46
5	RESULTADOS E ANÁLISES	47
5.1	RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO	47
5.1.1	Resultados para o teste de roteamento	47
5.1.2	Resultados para a comparação entre as produções alcançadas e planejadas	49
5.1.3	Resultados da análise da produção em relação à quantidade de caminhões.....	50
5.1.3.3	Resultado para a instância 1	50
5.1.3.4	Resultado para a instância 3	51
5.1.3.5	Considerações a respeito da análise da produção.....	53
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	54

6.1	CONCLUSÕES	54
6.2	RECOMENDAÇÕES.....	55
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO A - MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICO	61
	ANEXO B - QUADROS COM RESULTADOS PARA O TESTE DE ROTEAMENTO	64
	ANEXO C - QUADROS COM RESULTADOS DA ANÁLISE DA PRODUÇÃO EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DE CAMINHÕES	72

1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO

Este capítulo define uma apresentação do assunto abordado nesta monografia, tal como o envolvimento do setor mineral na economia brasileira, bem como a descrição do problema que precisa ser solucionado.

É apresentada uma introdução à ferramenta utilizada para o estudo, a Pesquisa Operacional – PO, mais precisamente a simulação. Posteriormente é enfatizada a justificativa desse projeto de pesquisa e, por fim, seus objetivos e sua estruturação.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Devido ao rompimento das fronteiras e ao processo de integração econômica, social e cultural que surgiu com a globalização, o capitalismo se expandiu entre os países. Isto possibilitou o aumento das relações comerciais, expansão de negócios e o estímulo à competitividade em todo o mundo.

O Brasil se encaixa nesse perfil econômico por possuir uma economia aberta ao mercado internacional, exportando e importando produtos de diversos países. O acesso aos produtos internacionais pode proporcionar menores gastos por serem mais baratos ou mesmo, de melhor qualidade, do que os fabricados no país.

Este acesso implica, também, no aumento ainda mais significativo da competitividade entre as empresas. Tal fato incentiva a busca de processos mais desenvolvidos, qualificados e otimizados. Isto pode gerar um diferencial para as empresas se tornarem mais eficientes do que a concorrência.

No cenário econômico atual, as organizações trabalham de forma a aumentar a produtividade, seja de bens ou serviços. Elas procuram otimizar os recursos humanos e físicos, melhorar os processos produtivos e financeiros, visando sempre o aumento do lucro e a redução dos custos.

Em relação aos diferentes seguimentos empresariais existentes na economia brasileira, o país detém boa parte de seu desenvolvimento econômico através das empresas de mineração. No caso desse setor, considerando especialmente a lavra a céu aberto, a adoção de um planejamento operacional bem estruturado pode determinar o sucesso da empresa mineradora (PANTUZA JR., 2008).

Uma empresa do setor mineral deve ser eficiente para conseguir reduzir seus custos relacionados à produção. Deve melhorar a qualidade do produto e conseqüentemente agregar maior valor ao mesmo. Isto promove resultados mais lucrativos e competitivos para a empresa, fatores essenciais para a sua permanência no mercado.

A função da atividade mineradora começa na descoberta dos recursos minerais passando por sua extração. E ainda, executar atividades de beneficiamento do minério e posteriormente, o disponibilizar para o uso das indústrias.

A melhor maneira de se alcançar a maior eficiência em uma empresa mineradora é através do planejamento de lavra mais adequado. Tal planejamento tem a função de otimizar a logística de transporte e os recursos operacionais. Ele deve determinar o ritmo de lavra mais adequado a cada frente, bem como identificar o número de viagens que cada veículo de transporte deve fazer a cada uma delas.

Com o adequado planejamento de lavra, é possível alocar os equipamentos da melhor maneira possível, minimizar o tempo do processo, aumentar a produtividade e maximizar a taxa de utilização dos veículos, respeitando sempre os requisitos de qualidade exigidos no processo.

Além de todas essas informações, sabe-se ainda que para a otimização dos recursos de produção, inclusive no setor mineral, a Pesquisa Operacional (PO) é uma das ferramentas mais utilizadas. Com o seu surgimento durante a Segunda Guerra Mundial, segundo Andrade (2009, p.1), “esse novo campo de análise de decisão caracterizou-se pelo uso de técnicas e métodos científicos [...] no esforço de determinar a melhor utilização de recursos limitados e para a programação otimizada das operações de uma empresa”.

E ainda, Andrade (2009, p. 1), afirma que:

Outra característica importante da Pesquisa Operacional, que facilita muito o processo de análise de decisão, é a utilização de modelos. Essa abordagem permite a “experimentação”, ou seja, a possibilidade de uma tomada de decisão ser mais bem avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada. Por si sós, a economia de recursos e a experiência adquirida com a experimentação justificam o conhecimento e a utilização da Pesquisa Operacional como instrumento de gerência.

A PO envolve basicamente a otimização através de modelos matemáticos e a simulação de um sistema. Essa monografia tem seu foco na simulação que é uma técnica

muito eficaz e bastante utilizada. Com ela é possível manipular um modelo fazendo as alterações necessárias sem implementá-lo efetivamente no sistema real.

A simulação possibilita identificar a viabilidade de executar o modelo simulado, de modo a diminuir os riscos de falhas e evitar o aumento dos custos, consequências que provavelmente aconteceriam caso o modelo fosse realmente implementado sem ser validado anteriormente.

Nesse contexto, esta monografia utiliza os resultados de um modelo de programação matemática que envolve o setor mineral. Especificamente, aborda o problema de alocação de caminhões em uma mina a céu aberto e através da simulação do processo, e tem o intuito de responder a seguinte questão-problema:

É viável otimizar o problema de planejamento de lavra em uma mina a céu aberto, utilizando a simulação computacional?

1.1.1 Descrição do problema em estudo

O problema estudado no presente trabalho envolve o planejamento operacional de lavra de minas a céu aberto. Neste planejamento é necessário determinar o ritmo de lavra de cada frente, seja ela de minério (material com valor econômico), ou de estéril (material sem valor econômico), e o sequenciamento dos veículos de transporte. Deve-se respeitar a capacidade da mina e as especificações e metas de qualidade da mistura de minério.

Dentro deste contexto, podemos dividir o problema em estudo em dois sub problemas, o Problema da Mistura de Minérios (PMM) e o Problema de Alocação dos Caminhões (PAC).

1.1.1.1 Problema da Mistura de Minérios

O problema da mistura de minérios fundamenta-se na determinação da quantidade de minério que será retirado de cada frente, que deve ser misturada de modo a atender as especificações e exigências dos clientes.

As especificações do minério variam de acordo com cada frente de lavra. Cada uma delas possui características distintas como a quantidade de minério a ser lavrada e os teores dos parâmetros de controle usados para manter a qualidade do minério, ou seja, a porcentagem de determinados elementos químicos. Os desvios desses parâmetros, em relação

à meta pré-determinada, devem ser minimizados para que a meta de qualidade do minério seja alcançada.

De acordo com Costa, Souza e Pinto (2005):

Para que o produto seja aceito, os parâmetros de qualidade devem ter valores pertencentes a um intervalo especificado pelo cliente. Vale lembrar que o termo “mistura de minérios” diz respeito à determinação dessa proporção e não deve ser confundido com “homogeneização de minério”, processo no qual pretende-se que todo o minério misturado possua as mesmas características.

O minério a ser lavrado deve atender às condições específicas para que o beneficiamento seja eficaz. E, além das especificações e dos parâmetros da qualidade do minério, no planejamento de lavra deve-se respeitar também a relação estéril/minério requerida.

Como o estéril é o material que não possui valor econômico, para que o minério seja extraído, muitas vezes é preciso retirar o estéril antes. Assim, é preestabelecida uma relação estéril/minério a ser cumprida, tendo como objetivo minimizar os seus desvios em relação à meta.

1.1.1.2 Problema de Alocação de Caminhões

O problema da alocação de caminhões fundamenta-se na determinação do número de viagens a serem feitas pelos veículos em cada frente de lavra. Para a alocação dos caminhões, existem duas formas básicas, estática e dinâmica.

A alocação estática consiste em alocar cada caminhão a uma única frente de lavra, seguindo apenas uma rota. Já a alocação dinâmica envolve a não fixação dos veículos às frentes de lavra, pois os caminhões podem ser direcionados a diferentes pontos de carga.

O tempo de ciclo de um caminhão é o tempo que leva para fazer uma viagem. Uma viagem começa no ponto de origem, geralmente um ponto de descarga, até a frente de lavra, local de carregamento, e seu retorno ao ponto de descarga. Este ciclo é influenciado pelo destino do veículo, pelo tipo de material que está sendo carregado, estéril ou minério, e pela capacidade do caminhão, pois cada um deles possui capacidades diferentes.

Considera-se o planejamento para uma hora de produção e a existência de dois pontos de descarga de material, o britador para o minério e a pilha de estéril para a descarga

de estéril. A descarga de minério também pode ser feita próxima ao britador, para evitar a ocorrência de filas.

Deseja-se maximizar a taxa de utilização dos caminhões e minimizar o número de veículos utilizados. É imposta uma taxa máxima de utilização para cada caminhão. Esta baseia-se no tempo de ciclo de cada um deles e no seu número de viagens. Esta taxa é estabelecida, pois, na prática, o tempo de ciclo dos veículos possui variação e a capacidade de trabalho do ser humano não atinge 100% de seu tempo.

Há também a relação dos equipamentos de carga que são alocados às frentes de lavra. A carregadeira retira o produto das frentes e carrega os caminhões, que posteriormente se dirigem ao destino específico.

Cada carregadeira possui uma produtividade diferente, devendo ser respeitada a sua capacidade. A quantidade desses equipamentos é inferior ao número de frentes as quais serão alocados. Deve-se haver compatibilidade entre a carregadeira e os caminhões para que o planejamento de lavra seja eficaz. Tal compatibilidade diz respeito quanto às características de operação, como o tamanho.

Todas as restrições devem ser devidamente respeitadas para que se possa alcançar a meta de produção. É preciso minimizar os desvios da mesma para que a produção atingida não divirja da meta de produção pretendida. Sendo necessário também, assegurar que o ritmo de lavra em cada frente não supere a quantidade de minério disponível.

1.2 JUSTIFICATIVA

A mineração no Brasil exerce um papel muito importante para o desenvolvimento econômico do país. “O Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial e tem a sexta maior produção mineral do mundo” (BIOGOLD INVESTMENT FUND, 2013).

A partir de 2000, o aumento da demanda por minerais impulsionou o valor da Produção Mineral Brasileira (PMB) devido, principalmente, ao aumento do índice de crescimento mundial, e em uma década o setor mineral apresentou crescimento significativo. (IBRAM, 2012).

Devido a essa relevância do setor mineral para a economia brasileira, este trabalho surgiu para tratar de alguns problemas relacionados aos grandes custos que envolvem o processo de produção em minas a céu aberto, além de propor maneiras de solucioná-los. E segundo Pantuza Jr. e Souza (2011) “no setor mineral, os custos e volumes de produção estão intimamente ligados ao planejamento operacional de lavra”.

Como já citado, este planejamento operacional envolve muitas variáveis. Dentre elas estão, por exemplo, a determinação do ritmo de lavra mais adequado para cada frente, a alocação dos equipamentos de carga e de transporte com uma capacidade específica, tempos de ciclo do processo, além das especificações relacionadas às características de qualidades distintas para cada minério a ser lavrado.

Devido à complexidade desses problemas, a PO é uma ferramenta bastante apropriada para auxiliar nas tomadas de decisões, focando no aumento da produtividade e na minimização dos custos de produção (SOUZA *et al*, 2010).

A PO é uma ciência voltada para a resolução de problemas reais que aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas. Ela possibilita testar uma decisão antes da implementação real, sendo uma excelente estratégia para os gestores da produção.

Ainda sobre as vantagens da PO, Andrade (2009, p. 9) afirma que:

Um estudo de Pesquisa Operacional consiste, basicamente, na construção de um modelo para um sistema real que sirva como instrumento de análise e compreensão do comportamento desse sistema, com o objetivo de levar o sistema a representar o desempenho desejado.

Através das técnicas utilizadas na PO é possível prever o efeito que as decisões tomadas ocasionarão. A eficiência das ferramentas de PO em resolver problemas que envolvem o planejamento operacional da mineração, especialmente se tratando da simulação de sistemas, já proporcionou o desenvolvimento de alguns trabalhos encontrados na literatura, tais como Ramos Neto e Pinto (2004), Pinto (2007), Pantuza Jr. e Souza (2011), Pantuza Jr. (2011) e Rodrigues e Pinto (2012).

Devido ao fato de já haver trabalhos sobre o assunto que atingiram resultados satisfatórios, constata-se que a PO é de grande utilidade para solucionar problemas do setor mineral. Assim, esta monografia surgiu através da verificação de que a simulação de um sistema real é de grande aproveitamento para as empresas que atuam em uma mina a céu aberto.

Com o uso da simulação, as organizações podem tentar solucionar seus problemas de planejamento de lavra e encontrar os melhores métodos para diminuir seus custos operacionais. É possível elevar a produtividade, sempre otimizando seus recursos e processos de modo a continuar colaborando com o crescimento econômico do setor mineral no país.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de simulação para otimizar o problema de planejamento de lavra em uma mina a céu aberto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Efetuar uma revisão bibliográfica sobre o assunto em questão.
- Utilizar um modelo matemático para gerar um plano de lavra.
- Desenvolver um modelo de simulação baseado nos dados do modelo matemático.
- Implementar o modelo em questão em um *software* de simulação.
- Validar o modelo matemático.
- Testar tipos de roteamentos para o planejamento de lavra baseando-se na produção e na produtividade dos equipamentos de carga.
- Analisar a produção alcançada pelo modelo de simulação em comparação à produção planejada.
- Identificar a possibilidade de maximização da produção baseando-se na utilização dos veículos de transporte.
- Apresentar os resultados e a viabilidade de implementação do modelo de simulação no sistema real.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a realização deste estudo foram apresentados neste primeiro capítulo a formulação do problema a ser abordado, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos a serem alcançados.

No próximo capítulo são apresentados a fundamentação teórica do trabalho, abrangendo a pesquisa operacional e suas duas vertentes básicas, a otimização e a simulação computacional e ainda, algumas aplicações da PO no setor mineral.

O capítulo 3 aborda a metodologia desta monografia e a classificação do projeto de pesquisa.

O quarto capítulo apresenta o modelo de simulação computacional, incluindo o modelo conceitual utilizado para o estudo, a implementação do modelo de simulação e a descrição dos cenários.

O quinto capítulo aborda os resultados e análises obtidas após a implementação do modelo de simulação proposto.

Por fim, no capítulo 6 são expostas as conclusões e as recomendações finais. E em seguida, são apresentadas as referências que serviram de apoio para esta monografia e os anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como já citado, algumas ferramentas da Pesquisa Operacional são bastante utilizadas para solucionar problemas em relação ao planejamento de lavra de minas a céu aberto.

O presente capítulo apresenta a fundamentação teórica na qual se baseia este estudo. São explanados resumidamente a história da PO, sua importância e funcionalidade.

São apresentados também as duas vertentes da PO, a otimização e a simulação computacional. E ainda, sua aplicação no setor mineral, através de outros trabalhos encontrados na literatura nos quais se comprova a eficiência do uso dessa ferramenta no processo de mineração.

2.1 PESQUISA OPERACIONAL

O início da atividade denominada como Pesquisa Operacional está vinculada com os primórdios da Segunda Guerra Mundial. Era necessário tomar decisões com bases científicas sobre a alocação eficiente dos recursos militares. Após a guerra, ideias propostas por cientistas britânicos e norte-americanos para as operações militares foram adaptadas para melhorar a produtividade e eficiência no setor civil (TAHA, 2008).

Segundo Hillier e Lieberman (2013), com o desenvolvimento industrial pós-guerra, surgiram problemas complexos e especializados nas empresas que poderiam ser comparados aos problemas enfrentados durante as operações militares. Assim, no início dos anos 1950, os indivíduos que trabalharam nas equipes de PO durante a guerra, introduziram a ferramenta nas diversas organizações dos setores comercial, industrial e governamental.

Um fato que deu forças ao crescimento da PO foi a revolução computacional. Devido à complexidade dos problemas, estaria fora de cogitação resolvê-los manualmente. Portanto, com o desenvolvimento de computadores eletrônicos digitais, e mais tarde dos computadores pessoais munidos de *softwares* para a PO, foi possível realizar cálculos matemáticos com maior rapidez e impulsionar ainda mais o uso da ferramenta (HILLIER E LIEBERMAN, 2013).

A PO é uma ciência voltada para a resolução de problemas de sistemas reais. Ela abrange técnicas científicas, matemáticas e estatísticas e tem seu foco no planejamento de

operações auxiliando na tomada de decisões. Tem como objetivo encontrar soluções para melhorar, ou otimizar, o desempenho de sistemas.

As técnicas de PO possibilitam testar uma decisão antes da implementação num sistema real. Tal ciência é aplicada em problemas que envolvem a condução e a coordenação das operações em uma organização. Ela tem sido utilizada em diversas áreas, como por exemplo, manufaturas, assistência médica, transportes, construção e logística (HILLIER E LIEBERMAN, 2013).

Os sistemas reais são apresentados através de modelos. Segundo Taha (2008), os modelos de PO compõem-se principalmente das alternativas para a tomada de decisão, do critério objetivo para avaliar as alternativas e das restrições que essa decisão possui.

De acordo com Hillier e Lieberman (2013), o processo para o uso da PO inicia-se observando-se e formulando-se o problema, ou seja, coletando os dados relevantes para a caracterização do sistema real. Posteriormente, constrói-se um modelo que tenta representar da melhor maneira possível as variáveis e restrições do sistema. Pressupõe-se que as soluções encontradas para o problema também serão válidas na realidade. E por fim, são realizadas experimentações com o modelo e modificações adequadas, de modo a validá-lo.

As técnicas de PO dividem-se, basicamente, na otimização e na simulação computacional. A otimização consiste na representação do sistema através de um modelo matemático ou de heurísticas.

Esse modelo matemático é composto por equações que retratam as variáveis e as relações matemáticas entre elas. Neste caso, busca-se a melhor solução possível para o problema, conhecida como ótimo global.

Para problemas, nos quais não há tempo hábil para encontrar uma solução ótima, recomenda-se o uso das heurísticas. Estas são algoritmos baseados em inteligência computacional que buscam boas soluções (ótimos locais), mas não há garantia do ótimo global.

A simulação computacional trata da imitação de um sistema real, através de modelos teóricos que representam a lógica de funcionamento do processo. Os modelos podem ser manipulados e alterados em sua implementação efetiva, através de *softwares* específicos ou de linguagens de programação como o C++ ou Java, por exemplo. Isto diminui os riscos de falhas e auxilia na tomada de decisões.

2.1.1 Otimização

A otimização pode ser dividida em duas grandes áreas: programação matemática e heurísticas.

A Programação Matemática consiste na construção de um modelo matemático que represente um sistema real. Esta representação é feita através de equações ou inequações e expressões matemáticas que descrevem a natureza de um problema.

Ele é composto pelas variáveis do sistema, conhecidas como variáveis de decisão e pela função objetivo, que representa o objetivo do problema. Os modelos também apresentam as restrições, que são expressões para as limitações presentes no sistema, e os parâmetros, que são as constantes presentes nas restrições e nas funções objetivo (HILLIER E LIEBERMAN, 2013).

A programação matemática busca alcançar uma solução ótima para um problema. Segundo Taha (2008), ao satisfazer todas as restrições de um modelo a solução é dita como viável. E esta será ótima se, além de ser viável, encontrar o melhor valor da função objetivo, seja ele máximo ou mínimo. Neste caso, tem-se o ótimo global.

Basicamente, os modelos de programação são divididos em lineares e não lineares. Esta classificação diz respeito quanto às relações matemáticas presentes nas restrições e na função objetivo. Em PO, a técnica mais utilizada é a programação linear (PL). Ela é composta por modelos que possuem equações lineares para representarem as restrições e funções objetivo.

Estes modelos podem ser classificados segundo o seu domínio. Ao possuir variáveis reais é chamado de programação linear, e variáveis inteiras, constitui a programação linear inteira. Existem também os modelos de programação binária, com variáveis binárias e os lineares mistos onde há diferentes tipos de variáveis.

De acordo com Taha (2008), os modelos de PL implicam em algumas propriedades. Dentre elas estão, a proporcionalidade, na qual a contribuição de cada variável de decisão deve ser diretamente proporcional ao valor da variável. Há também a aditividade, na qual a contribuição total de todas as variáveis seja a soma direta das contribuições individuais de cada variável. E a propriedade da certeza, onde todos os coeficientes das restrições e das funções objetivo devem ser constantes conhecidas.

Pantuza Jr. (2008) apresenta as equações (1.1) a (1.3) que podem exemplificar um problema de programação linear.

$$\min \quad \sum_{i=1}^n c_i x_i = F(x) \quad (1.1)$$

S. a:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = b_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (1.2)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

Sendo:

- c_i = custo da atividade i ;
- 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.

A equação (1.1) representa a função objetivo que deve ser minimizada. A equação (1.2) representa as restrições do problema. A equação (1.3) apresenta o domínio do modelo de programação, o qual garante que a variável de decisão (x_i) não assumirá valores negativos.

Para os casos em que o objetivo do modelo de programação matemática é atingir uma meta, também são conhecidos os problemas de programação linear por metas. Neste modelo procura-se atingir uma meta permitindo desvios, os quais serão penalizados.

Segundo Pantuza Jr. (2011), no problema de programação linear por metas a importância de cada meta na otimização é representada através de pesos. Uma meta de maior importância receberá o maior peso.

Caso o modelo possua mais de um objetivo, atingir a meta de produção e qualidade, por exemplo, ele também é chamado de modelo de otimização multiobjetivo.

Na literatura existem alguns trabalhos que abordam modelos de programação linear por metas. Um exemplo é o de Munhoz e Morabito (2001), que utilizam esta programação para apoiar decisões em um sistema de produção e distribuição de suco de laranja. O modelo contém informações de problemas de mistura e planejamento de produção com múltiplos produtos, estágios e períodos.

Outro trabalho existente é o de Moraes (2005), que utiliza a programação linear por metas no problema de mistura de produtos de minério de ferro, estocados em uma mina em Minas Gerais. Pantuza Jr. (2011) também propôs uma abordagem multiobjetivo para o planejamento de lavra de uma mina.

Alguns modelos precisam de um tempo maior para encontrar uma solução exata. Geralmente, eles não são capazes de encontrar a solução ótima em tempo hábil. Para estes problemas, o uso de modelos exatos não é aconselhável e, em muitos casos, não é necessário encontrar uma solução ótima global. Uma solução próxima do ótimo global, chamada de ótimo local, pode ser satisfatória (PANTUZA JR., 2008).

Para a solução destes problemas mais complexos, pode-se utilizar os métodos heurísticos. Estes métodos consistem em técnicas inspiradas em processos intuitivos que, através de um custo computacional admissível, buscam uma boa solução sem serem capazes de garantir uma solução ótima, mas sim, garantir a proximidade desta solução (ARAÚJO E SOUZA, 2011).

Segundo Bueno (2009), tais métodos buscam resolver problemas através de algoritmos. Tem-se como ponto de partida, uma solução viável para a resolução de um problema. Os métodos heurísticos baseiam-se em frequentes aproximações direcionadas a um ponto ótimo. Assim, tendem a encontrar as melhores soluções possíveis para os problemas, dentro de um esforço computacional aceitável, e não soluções exatas e definitivas.

Um dos métodos heurísticos mais utilizados é o Algoritmo Genético. Tal algoritmo é baseado em um conjunto de soluções possíveis, não envolvem a modelagem do problema e apresentam como resultado uma população de soluções (BUENO, 2009).

O Algoritmo Genético (AG), inicialmente proposto por John Holland na década de 70, estão presentes na área da Computação Evolutiva. Esta área refere-se a um conjunto de métodos computacionais baseados na teoria da evolução natural das espécies.

Nos AGs tem-se, inicialmente, a geração de uma população formada por um conjunto de indivíduos, que são as possíveis soluções do espaço de busca. Estes indivíduos são combinados entre si gerando outros indivíduos. São utilizados operadores genéticos de cruzamento e mutação para a geração de uma nova população. Após este processo, é formada uma nova geração constituída por parte da nova população e pela população anterior. No final de cada iteração há o descarte dos indivíduos menos aptos (piores soluções) e o processo é continuado até que algum critério seja alcançado.

Outros métodos heurísticos conhecidos são o *Variable Neighborhood Descent* (VND) ou Método de descida em vizinhança variável e o *Variable Neighborhood Search* (VNS) ou Método de pesquisa em vizinhança variável.

O VND consiste em uma técnica utilizada para o refinamento de soluções iniciais. Por meio de trocas sistemáticas nas estruturas de vizinhança de uma solução corrente, é feita uma análise da região de soluções factíveis. Tal método aceita as soluções melhoradas em

relação à solução corrente, havendo o retorno à primeira estrutura quando se encontra uma melhor solução.

O método VNS não segue um caminho ao explorar uma vizinhança. Ele tem a função de explorar as vizinhanças gradativamente, aumentando seu espaço de busca e direcionando essa busca em torno de uma nova solução quando se tratar de um movimento de melhora. O VNS também utiliza o VND, que geralmente é aplicado sobre a solução corrente.

As figuras 1 e 2 apresentam os algoritmos referentes ao VND e VNS, respectivamente.

```

Procedimento VND ( $f(\cdot), N(\cdot), r, s$ );
1  Seja r o número de estruturas diferentes de vizinhança;
2   $k \leftarrow 1$ ;
3  Enquanto ( $k \leq r$ ) faça
4      Encontre um vizinho  $s' \in N^{(k)}(s)$ ;
5      se ( $f(s') < f(s)$ ) então
6           $s \leftarrow s'$ ;
7           $k \leftarrow 1$ ;
8      Senão
9           $k \leftarrow k + 1$ ;
10     Fim se
11 Fim-enquanto;
12 Retorne  $s$ ;
Fim VND;

```

Figura 1: *Heurística VND.*
 Fonte: Pantuza Jr., 2012.

```

Procedimento VNS ( $f(\cdot), N(\cdot), r, s$ );
1  Seja  $s_0$  uma solução inicial;
2  Seja r o número de estruturas diferentes de vizinhança;
3   $s \leftarrow s_0$ ;
4  Enquanto (critério de parada não satisfeito) faça
5       $k \leftarrow 1$ ;
6      Enquanto ( $k \leq r$ ) faça
7          Gere um vizinho qualquer  $s' \in N^{(k)}(s)$ ;
8           $s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s')$ ;
9          se ( $f(s'') < f(s)$ ) então
10              $s \leftarrow s''$ ;
11              $k \leftarrow 1$ ;
12         Senão
13              $k \leftarrow k + 1$ ;
14         Fim se
15     Fim-enquanto;
16 Fim-enquanto;
17 Retorne  $s$ ;
Fim VNS;

```

Figura 2: *Heurística VNS.*
 Fonte: Pantuza Jr., 2012.

2.1.2 Simulação computacional

2.1.2.1 Conceitos básicos e etapas de implementação

A simulação é uma ferramenta da PO que estuda o comportamento e reações de um sistema através de modelos. Para Andrade (2009), a simulação é a operação de um modelo que representa um sistema, geralmente através de computadores, respeitando-se os limites e condições reais a que o processo está vinculado.

O modelo de simulação permite que se faça manipulações nos sistemas sem a necessidade de interferir nos mesmos. É possível fazer mudanças e alterações que seriam inviáveis no sistema real, devido ao custo elevado ou às dificuldades de implementá-las. Todo estudo feito é testado no computador, geralmente em *softwares* de simulação, permitindo o uso de vários cenários e diferentes alternativas de solução.

O uso da simulação apresenta vantagens como o fato de possibilitar o estudo e a experimentação de interações internas de um dado sistema. Ela também proporciona a análise de algumas variações no meio ambiente e seus efeitos. Pode fornecer informações sobre as variáveis mais importantes e a maneira como interagem entre si. E ainda, permite experiências com novas situações, de modo a preparar a gestão para acontecimentos futuros e auxiliar nas tomadas de decisão (ANDRADE, 2009).

Alguns conceitos fundamentais dentro da simulação que são importantes para o entendimento do estudo, serão definidos a seguir:

- Evento é um instante do tempo em que há mudança no estado do sistema, algum acontecimento programado ou não.
- Variáveis de estado determinam o estado de um sistema e constituem as informações necessárias, em determinado instante de tempo, do que está ocorrendo no sistema.
- Entidades são os componentes do sistema que será simulado. Podem ser dinâmicas, que movimentam-se através do sistema ou estáticas, que servem a outras entidades.
- Atributos são informações que definem as características das entidades.
- Classes são os conjuntos de entidades.
- Atividade corresponde a um período de tempo predeterminado que representa as ações e procedimentos iniciados em cada evento.

- Período de espera é o tempo sobre o qual não há controle, não sendo possível programar o seu fim.
- Processo é uma sequência de eventos que seguem uma ordem cronológica.
- Recursos são entidades estáticas que prestam serviços às entidades dinâmicas.
- Relógio de simulação é a variável do modelo de simulação que armazena o tempo simulado.

Dentro do processo de simulação deve-se seguir algumas etapas, que segundo Andrade (2009), podem ser definidas da seguinte forma:

1. Formulação do problema e coleta de dados: onde devem ser definidos os objetivos da simulação e coletados os dados e informações significativas disponíveis que serão processadas.
2. Identificação das variáveis e das condições do sistema: é importante definir as variáveis, as relações entre elas e as restrições do sistema, para que se possa construir um modelo que represente da melhor maneira possível sua operação no mundo real.
3. Construção do modelo: consiste na formulação das equações que devem representar as relações entre as variáveis do sistema, as restrições e os limites de variação dos resultados e valores.
4. Validação do modelo com dados históricos: normalmente, o primeiro teste que se faz é a operação do modelo com dados históricos e condições conhecidas com o intuito de se retratar o desempenho do sistema real. E depois disso, deve ser implementado o modelo de simulação em algum programa de computador específico.
5. Realização de experimentos e análise estatística dos resultados: devem-se analisar os resultados dos experimentos feitos com o modelo de simulação, que em geral compõem uma distribuição de valores que devem ser interpretadas por meio de técnicas estatísticas. O intuito é presumir o comportamento esperado do sistema e suas possíveis variações, para que se obtenham os riscos estimados que a operação implique.

Dentro da primeira etapa, a formulação do problema refere-se ao ponto inicial na modelagem de sistemas. Têm-se como finalidade entender o problema e definir os objetivos a serem atingidos. Esta etapa é primordial, pois nela pretendem-se entender o porquê do estudo do problema, quais as respostas que o estudo pretende alcançar, quais as hipóteses de solução, restrições e os limites que são impostos.

A coleta de dados é a definição das informações relevantes para representar o modelo. Os dados podem ser coletados, por exemplo, a partir de fatos, informações e estatísticas. Tais informações geralmente provêm de medições e observações do sistema estudado ou de sistemas similares, experiências pessoais ou de arquivos históricos.

Os dados devem ser coletados aleatoriamente, pois caso contrário, pode-se ter um modelo tendencioso não representando a realidade da maneira adequada. Essa etapa é de fundamental importância e deve ser analisada minuciosamente.

Após a coleta dos dados necessários, é preciso analisá-los para que deles se extraia as informações desejadas. Uma das maneiras de compreender o grande volume de dados e compactá-los é através de gráficos, como o histograma. Com ele, identifica-se qual a melhor distribuição de probabilidade que se ajusta aos dados coletados. Alguns exemplos de distribuições são a Normal, Exponencial e Poisson.

O histograma é uma representação gráfica que representa o comportamento da variável analisada. Através dele identifica-se o melhor modelo probabilístico que pode representar a amostra coletada. É uma forma de certificar-se da qualidade na escolha da distribuição que melhor represente os dados, é através do teste de aderência.

Após a construção do histograma com a análise e tratamento de dados, passa-se ao teste citado. O teste de aderência verifica se a distribuição de probabilidade escolhida adequa-se aos dados da população. Ele pode ser feito computacionalmente e geralmente emprega métodos gráficos e estatísticos. Graficamente, são comparadas a proximidade ou a aderência entre o desenho da distribuição teórica e o histograma referente aos dados coletados. Quanto menor a diferença, melhor será a aderência entre os dados e a distribuição determinada. E estatisticamente, tenta-se provar a hipótese de que o conjunto de dados amostrais não difere, significativamente, da distribuição teórica identificada.

Assim, juntamente com a coleta dos dados, a identificação da distribuição probabilística e, a melhor representação da variável analisada, está a segunda etapa da simulação. Nesta etapa, há a compreensão de quais variáveis e quais dados são relevantes para o comportamento do sistema e como elas interagem entre si e com os outros componentes. A

identificação dos dados e das variáveis relevantes é a base para a melhor representação da realidade.

Na terceira etapa, há a construção do modelo com as equações matemáticas. De acordo com Taha (2008) o emprego da simulação inicia-se com o desenvolvimento da lógica do modelo computacional, e esta lógica é de fundamental importância, pois permitirá coletar os dados fundamentais para a representação da situação real.

O modelo matemático, como especificado no tópico referente à otimização, deve conter as equações e inequações que representem os objetivos do problema, ou seja, as funções objetivo, e as restrições, as quais impõem limites ao processo que está sendo estudado. Tais equações devem apresentar da melhor maneira possível as relações entre as variáveis do sistema e as restrições impostas.

A etapa quatro consiste na validação do modelo com dados históricos. O modelo matemático construído deve ser validado com o intuito de saber se ele atende aos objetivos da simulação, representando adequadamente o sistema. Os testes com o modelo devem abranger também os dados, incluindo dados históricos do processo em estudo, de modo a se poder verificar sua consistência (ANDRADE, 2009).

Após a validação do modelo matemático, o mesmo é implementado em um *software* de programação específico. O modelo de simulação é criado posteriormente com os resultados do modelo matemático, podendo ser uma maneira de validá-lo. Mas não necessariamente, precisa-se de um modelo matemático para a criação de um modelo de simulação.

Um modelo de simulação pode ser criado após a coleta de dados em uma planilha de *software*, por exemplo. A planilha do Excel é capaz de realizar simulações básicas. Nela seriam introduzidos, por exemplo, os dados coletados, a variável de decisão e as equações usadas para calcular as células de saída (HILLIER E LIEBERMAN, 2013).

Existem outros *softwares* específicos para a criação de modelos de simulação. Segundo Hillier e Lieberman (2013), está cada vez mais comum a criação de programas de computador destinados à simulação com o uso de animações. As animações têm a função de exibir as simulações em ação, onde elementos-chave de um sistema são representados na tela através de ícones que mudam de forma, cor ou posição dependendo da alteração do estado do sistema simulado.

Antecedendo a implementação do modelo de simulação em um *software*, é necessário estabelecer um modelo conceitual, como por exemplo, um diagrama de ciclo de

atividades (DCA). Este diagrama representa o ciclo individual e o conjunto de ciclos de atividades das entidades do sistema simulado (PANTUZA JR., 2008).

O DCA apresenta as entidades, atividades e as filas. A figura 3 representa os elementos da notação básica para o diagrama.

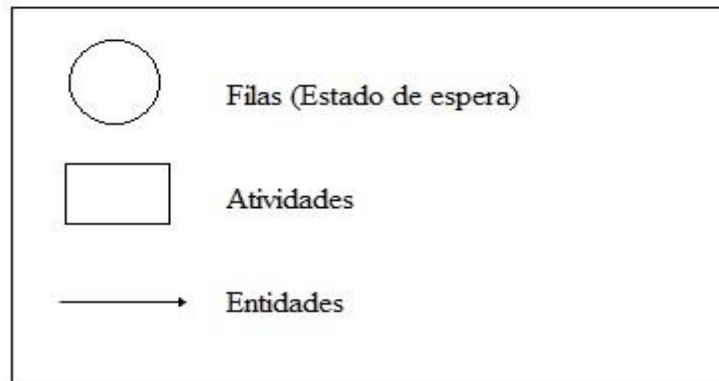


Figura 3: Notação básica para o DCA.

Outra forma de descrever os modelos são os fluxogramas, que consistem em uma representação gráfica de um processo ou sistema. É apresentado o funcionamento do sistema através da sequência de etapas ilustradas por meio de símbolos geométricos encadeados.

Segundo Andrade (2009), a elaboração de fluxograma de processos é a execução da lógica de operação dos sistemas. A partir desta representação pretende-se compreender as relações com o ambiente externo, as interações entre as variáveis e a evolução sucessiva dos eventos. Os fluxogramas formam a estrutura básica da construção do modelo computacional.

A figura 4 apresenta os símbolos básicos que podem ser utilizados na construção de um fluxograma.

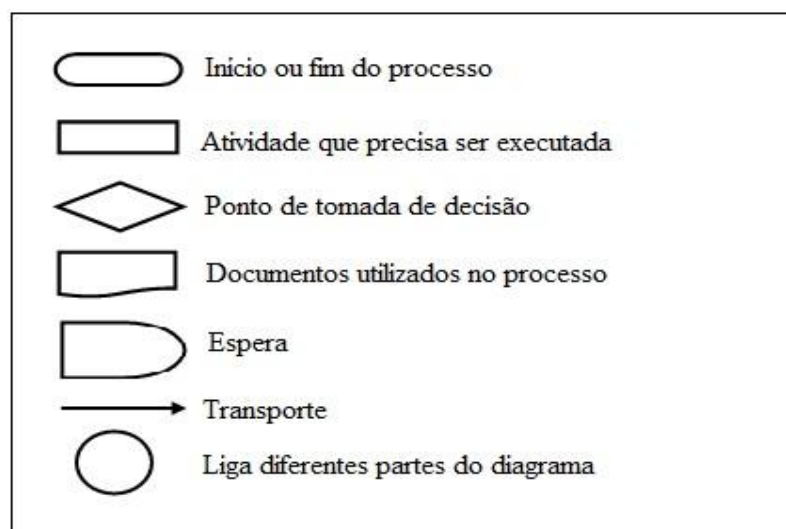


Figura 4: Símbolos básicos de um fluxograma.

Assim, como em qualquer processo produtivo, após a elaboração do modelo conceitual, DCA ou Fluxograma, há a tradução do mesmo para a linguagem de simulação específica. O modelo de simulação deve ser implementado utilizando um *software* adequado.

Existem alguns tipos de simulação que podem ser utilizadas para a criação dos modelos. A simulação por processos, por exemplo, consiste na geração de cenários e na verificação de impactos de cada um nos processos estudados.

Segundo Ramos Neto e Pinto (2004), na abordagem por processos, elementos estáticos formam um ambiente bem definido, com regras e características, e esses elementos interagem com os elementos dinâmicos, presentes neste ambiente.

Nesta abordagem é possível acrescentar incertezas e variabilidades e reproduzir uma possível realidade gerando análises para uma tomada de decisão adequada. De acordo com Taha (2008), em troca da flexibilidade de modelagem, essa linguagem utiliza a simplicidade e a facilidade de utilização.

Outra abordagem para a criação dos modelos é o método das três fases. De acordo com Chwif e Medina (2006), esta abordagem consiste em, primeiramente, uma fase A, conhecida como varredura de tempo, onde determina-se o instante no qual está agendada uma atividade B e move o relógio de simulação para este instante. A fase B, determina quais são as atividades B para este instante e as executa. E por fim, na fase C, após a execução das atividades B, analisam-se todas as atividades C e as executam de modo que sejam processadas as possíveis atividades C.

Existe também a simulação de Monte Carlo. Esta técnica é uma precursora da simulação. Trata-se de um esquema de modelagem que estima parâmetros com base em amostragem aleatória. É uma amostragem de valores aleatórios de distribuição de probabilidade específicas de cada operação, que disponibiliza ao tomador de decisões vários resultados possíveis e a probabilidade de ocorrências dos mesmos (TAHA, 2008).

E por fim, na quinta etapa de implementação, têm-se a realização de experimentos e a análise estatística dos resultados. Segundo Hillier e Lieberman (2013), esta fase consiste na execução da simulação fornecendo estimativas dos parâmetros desejados para a configuração do sistema estudado.

Nesta etapa de experimentos é possível variar e ajustar os valores dos parâmetros de entrada, analisar suas influências no modelo e decidir sobre alternativas. Geralmente, por meio de gráficos e tabelas é feita a análise estatística dos resultados que em geral compõem uma distribuição de valores.

A validação do modelo trata-se de uma avaliação de quanto o modelo construído assemelha-se ao sistema real simulado, com o intuito de se questionar se o modelo atendeu as finalidades para o qual foi desenvolvido. O principal objetivo seria determinar a utilidade do modelo que, ao se mostrar útil por atender os objetivos propostos, seus resultados ajudarão na tomada de decisões da empresa (BRIGHENTI, 2006).

Nenhum modelo representa precisamente o comportamento do sistema apresentado na realidade e por isso, antes de qualquer tomada de decisão, os resultados do modelo de simulação devem ser comparados com o desenvolvimento do sistema real. Assim, as mudanças ocorridas durante o processo de simulação podem ser implementadas da maneira mais segura possível, acarretando melhores resultados.

2.1.2.2 Classificação dos modelos e aplicações da simulação

Os modelos de simulação mais usuais são aqueles que estudam o comportamento dos sistemas reais como uma função do tempo, sendo classificados em contínuos ou discretos. Os modelos contínuos tratam de sistemas que possuem o comportamento que muda continuamente ao longo do tempo. Já os modelos discretos tratam do estudo de filas de espera, onde as mudanças ocorrem nos momentos que representam os pontos discretos do tempo (eventos de chegadas e partidas), ou seja, o estado do sistema não se altera durante o intervalo entre dois eventos consecutivos (TAHA, 2008).

Outra forma de se classificar os eventos dos modelos de simulação consiste em modelos determinísticos ou estocásticos. Os determinísticos são aqueles que possuem um conjunto conhecido de entradas e que resultam em um conjunto único de saídas. Os estocásticos são os que possuem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada resultando em saídas aleatórias, e geralmente, os modelos estocásticos estão mais próximos da realidade.

De acordo com Ramos Neto e Pinto (2004), os modelos de simulação devem ser utilizados em sistemas considerados estocásticos, por possibilitarem a análise de diversos cenários para o processo de tomada de decisão. E referindo-se à mineração, esta pode ser tratada como sendo um sistema propenso a ser simulado, por possuir variáveis aleatórias e operações complexas, sendo necessária a avaliação de estratégias para esse processo.

Os modelos criados para simular operações de lavra em minas podem ser utilizados como ferramenta na avaliação de cenários. Tais cenários podem, por exemplo, identificar gargalos na produção, estudar o dimensionamento, disponibilidade e seleção de

equipamentos e veículos utilizados na mina, ou testar a viabilidade de implantação de um sistema de alocação de caminhões (RAMOS NETO E PINTO, 2004).

Além do uso no setor mineral, na literatura existem vários trabalhos que utilizam a simulação computacional para a resolução de problemas de diversas áreas ou validação de modelos matemáticos. Garcia Júnior (2012), por exemplo, utiliza a simulação computacional para desenvolver uma proposta de arranjo físico otimizado para uma indústria do setor moveleiro.

Outro exemplo do uso dessa ferramenta é o de Duarte (2003) em que há a aplicação da simulação computacional em uma célula de manufaturas de uma empresa do setor de auto peças. Albertin *et al* (2006), criou um modelo de simulação para análise de desempenho de um sistema de recursos hídricos. Torga, Montevechi e Pinho (2006) utilizou a ferramenta na manufatura de sistemas de produção através da aplicação em uma linha de produção puxada.

Leal (2003) também utilizou a simulação computacional como ferramenta auxiliar às tomadas de decisão. Ele elaborou o mapeamento do processo e um modelo de simulação para a análise da operação de atendimento de uma agência bancária. Este trabalho propõe melhorias ao processo de atendimento, tais como redução do tempo de fila e de outras atividades que não agregam valor ao cliente e à empresa.

2.1.3 Pesquisa Operacional aplicada ao setor mineral

O uso da PO para a solução de problemas no processo de mineração tem sido bastante eficaz para o desenvolvimento do setor. Diversos trabalhos que abordam o assunto e aplicações desta ferramenta, incluindo a programação matemática e a simulação computacional, podem ser encontrados na literatura.

Merschmann e Pinto (2001), por exemplo, criaram modelos matemáticos para resolução de problemas que envolvem o planejamento de lavra de minas a céu aberto. Os modelos consideram a alocação estática e dinâmica dos caminhões. Têm como objetivo a determinação do ritmo de lavra a ser implementado em cada frente respeitando as características da mina.

Ramos Neto e Pinto (2004) desenvolveram um *Template*, ou seja, conjunto de módulos a serem seguidos para utilização no programa ARENA, com o intuito de auxiliar a modelagem e a simulação de processos de transporte e carregamento em minas a céu aberto. O *Template* apresenta informações sobre as atividades de lavra, incluindo, por exemplo, a

carga, descarga e o deslocamento vazio e carregado dos caminhões, além da abordagem do sistema de alocação dinâmica de caminhões, presente atualmente em boa parte das minas.

Costa *et al* (2004), desenvolveram um modelo de programação linear por metas aplicado ao problema de planejamento de produção do setor mineral. O objetivo principal é determinar o ritmo de lavra mais adequado de modo a melhorar o beneficiamento da usina. Um modelo para a alocação dinâmica de caminhões é apresentado, o qual atende as características da mina, as metas de qualidade e de produção, além das restrições em relação aos equipamentos de carga e de transporte.

Costa (2005) desenvolveu um modelo que aborda os problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Neste modelo, considerou-se o problema da mistura de minérios, as metas de produção e de qualidade, restrições operacionais e a disposição dos equipamentos de cargas e veículos utilizados no processo. Os problemas são resolvidos através da programação matemática e técnicas heurísticas.

Pinto (2007) desenvolveu um algoritmo de despacho de caminhões em minas a céu aberto e posteriormente foi usada a simulação para comprová-lo. O algoritmo viabiliza o atendimento às políticas relacionadas ao aumento de produtividade dos equipamentos e ao atendimento da qualidade do minério.

Ceciliano (2007) desenvolveu e aplicou um método de tomada de decisão, baseando-se na otimização e na simulação durante o processo de planejamento da cadeia produtiva de minérios de ferro.

Amaral (2008) desenvolveu novos modelos matemáticos e utilizou técnicas heurísticas para auxiliar no planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Tais modelos consideram os custos de deslocamentos dos equipamentos de carga, sendo úteis também para previsões de médio e longo prazo.

Souza (2009) criou um modelo de simulação de uma parte do sistema de produção de uma empresa do setor mineral. Teve-se como objetivo apresentar a utilidade da simulação aplicada a eventos discretos como ferramenta de apoio à tomada de decisões. A simulação foi executada em operações do processo produtivo de uma mina.

Pantuza Jr., Souza e Cabral (2009) apresentaram uma abordagem multiobjetivo de um modelo de programação matemático vindo de uma extensão de uma formulação da literatura. Tal modelo trata-se de uma nova formulação para o problema de planejamento operacional de lavra e visa atender as metas produção e de qualidade preestabelecidas.

Toffolo (2009) propôs algoritmos para o problema de fluxos dos produtos de uma empresa mineradora. Um modelo multiobjetivo baseado em programação linear por metas foi

desenvolvido, englobando problemas como a mistura de minérios, planejamento de transporte e planejamento e sequenciamento da produção.

Alexandre (2010) elaborou a modelagem matemática do despacho de veículos em minas a céu aberto. Foi apresentado e discutido também o desenvolvimento de um sistema de simulação do processo de uma mina a céu aberto com características diversas. Permitiu-se analisar e validar o desempenho de dois algoritmos de otimização em vários cenários distintos.

Newman *et al* (2010) realizou uma revisão de literatura de várias décadas sobre a otimização e simulação aplicada à problemas de planejamento de lavra de minas subterrâneas e a céu aberto. A revisão envolve o planejamento de longo e curto prazo, seleção de equipamentos, expedição, além de sugestões para áreas emergentes e destaques das aplicações para indústrias de sucesso.

Souza *et al* (2010) desenvolveram um modelo que trata do problema de planejamento operacional com alocação dinâmica de caminhões. Devido à complexidade do problema também é apresentada uma estratégia heurística. O algoritmo proposto foi testado usando um conjunto de problemas de dados reais e os resultados foram validados através de um otimizador específico com os mesmos dados.

Andrade *et al* (2011) apresentaram o emprego da simulação de processos em um sistema de pesagem e carregamento de caminhões em um mina. Para eles, em empresas mineradoras, é possível aplicar a simulação em sistemas distintos, desde lavra até a venda de minério.

Pantuza Jr. e Souza (2011) implementaram um modelo de simulação computacional para o processo de sequenciamento de caminhões do problema de planejamento operacional de lavra em mina a céu aberto. Este modelo é capaz de estabelecer uma sequência de viagens dos veículos partindo de uma programação de produção pré-estabelecida.

Pantuza Jr (2011), também desenvolveu um modelo de simulação computacional. O mesmo valida os resultados obtidos por modelos de programação matemática para determinar o sequenciamento de caminhões.

Rodrigues e Pinto (2012) realizaram uma análise comparativa das metodologias utilizadas para despacho de caminhões em minas a céu aberto. Foram implementadas metodologias baseadas em programação linear e programação dinâmica e em heurística. Foi elaborado um modelo de simulação com o intuito reproduzir o comportamento das operações de lavra e avaliar o efeito das decisões nas metodologias estudadas.

Coelho *et al* (2012) desenvolveram algoritmos heurísticos multiobjetivos aplicados ao planejamento de lavra em minas a céu aberto com alocação dinâmica de caminhões. Os experimentos computacionais comprovaram a eficiência do uso de algoritmos baseados em métodos VNS para encontrar o melhor conjunto de soluções.

Kumral (2013) procurou otimizar as capacidades, roteamento e problemas de sequenciamento de minas em um sistema de mineração. A abordagem é baseada em uma heurística e na programação inteira mista e garante soluções práticas gerando taxas de produção com o cumprimento das capacidades.

3 METODOLOGIA

O conteúdo deste capítulo aborda a maneira pela qual foi executada a pesquisa, destacando sua classificação e metodologia do projeto seguida das considerações finais.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

As pesquisas podem ser classificadas de diversas maneiras, visto que existem modos diferentes de se praticar o estudo e a investigação científica. Uma das classificações básicas que devem ser analisadas é a diferenciação entre a pesquisa qualitativa e a pesquisa quantitativa.

De acordo com Rodrigues (2007), a pesquisa qualitativa se distingue da quantitativa por ter como principal objetivo descrever e compreender o significado de um fenômeno onde os dados não podem ser quantificáveis. Ainda considerando a definição do autor citado, o presente trabalho possui natureza quantitativa. Ele requer o uso de recursos e técnicas estatísticas para traduzir em números informações a serem analisadas e classificadas.

Segundo Severino (2007), a pesquisa também pode ser identificada fazendo-se referência às fontes utilizadas para a abordagem do assunto em estudo, podendo ser classificada em bibliográfica, documental, experimental e pesquisa de campo.

A presente pesquisa pode ser classificada como experimental, sendo realizada a partir de pesquisas anteriores, na qual o pesquisador trabalha a partir das contribuições de outros autores. São utilizados dados já encontrados na literatura referentes à adoção de ferramentas da pesquisa operacional para o planejamento de lavra de minas a céu aberto.

Esta pesquisa baseia-se em métodos experimentais, ou seja, a partir de um objeto de estudo, são identificadas variáveis que participam do processo, como, por exemplo, o número de veículos de transporte e de carregadeiras, e as frentes de lavra que devem ser usadas. Deve-se analisar a relação de dependência entre elas realizando testes com diferentes cenários através da simulação.

Assim, é possível identificar a melhor solução para um planejamento de lavra, e ao final, parte-se dos resultados destes testes para implementar e analisar as interferências que causariam na própria realidade.

3.2 METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia de um projeto de pesquisa aborda os melhores métodos utilizados em determinada área para se atingir um fim específico ou para se obter maior conhecimento. Assim, a metodologia deste trabalho, tal como as etapas para a sua elaboração que foram adaptadas de Andrade (2009), serão descritas a seguir.

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto em questão, ou seja, sobre o planejamento de lavra em minas a céu aberto e os problemas que o envolvem. E posteriormente, estudou-se sobre o uso de ferramentas da pesquisa operacional, incluindo a otimização e a simulação computacional.

Foi utilizado um modelo matemático, apresentado no Anexo A, desenvolvido durante um projeto de pesquisa intitulado como “Pesquisa Operacional aplicada ao problema de alocação de caminhões em uma mina a céu aberto”, que ainda está em andamento. Este modelo gera um plano de lavra, onde estão definidas as variáveis, as relações entre elas e as restrições dos sistemas. O modelo matemático busca imitar o comportamento do sistema real com as equações que representam as relações entre essas variáveis.

Para a criação do modelo não houve a operação com dados históricos. Os dados utilizados foram baseados em minas de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais.

Foram adotados dados de *Benchmarking* que é um método que compara o desempenho de algum processo, visando adaptar a realidade e implementar melhorias. Com isso, os dados referentes ao planejamento de lavra já foram utilizados por outros autores com a finalidade de compará-los através de uma série de testes e ensaios já realizados.

De posse dos dados colhidos da implementação do modelo matemático, foi desenvolvido o DCA, o qual foi implementado em um modelo de simulação computacional contendo vários cenários baseados nos resultados do modelo matemático.

O modelo criado foi testado no *software* de simulação Promodel 2011, alterando-se e ajustando-se os dados para analisar o comportamento do modelo e sua coerência com o sistema real. Foram feitos testes para a escolha do melhor tipo de roteamento para o planejamento de lavra, além de análises referentes à produção alcançada pelo modelo de simulação e à utilização dos caminhões no processo.

Por fim, analisou-se os resultados dos experimentos feitos com o modelo de simulação, os quais geralmente possuem valores que são interpretados por meio de técnicas estatísticas. Apresentou-se a viabilidade de implementação do modelo no sistema real,

considerando as variações apresentadas e os riscos estimados. Caso não seja validado, recomenda-se o retorno ao desenvolvimento do modelo matemático para que seja analisado e os erros corrigidos.

4 MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentados o diagrama de ciclo de atividades, a implementação do modelo computacional de simulação e os cenários aplicados.

Para a implementação do modelo de simulação foram utilizados os resultados do modelo matemático otimizado apresentado no Anexo A. O PAC mostrado no modelo matemático é referenciado também como Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica (POLAD). Neste planejamento, os caminhões não ficam fixos às frentes de lavra, podendo se direcionar a diferentes pontos de carga.

4.1 DIAGRAMA DE CICLO DE ATIVIDADES

Para a elaboração do modelo de simulação computacional empregado neste trabalho, o modelo conceitual criado foi o diagrama de ciclo de atividades (DCA). Ele é composto pelo ciclo individual de atividades das entidades em estudo.

O diagrama inclui dois tipos diferentes de entidades, os caminhões e carregadeiras, que podem estar em estado ativo ou ocioso. E estão representadas também seus conjuntos de atividades considerando o sistema estudado.

O sistema inicia-se quando o veículo entra no processo e se dirige à frente de lavra em que pode visitar. A figura 5 apresenta o DCA e exemplifica as atividades.

Entidade Caminhão: —————>
 Entidade Carregadeira: - . . . ->

F1: Frente de minério
F2, F3: Frentes de estéril

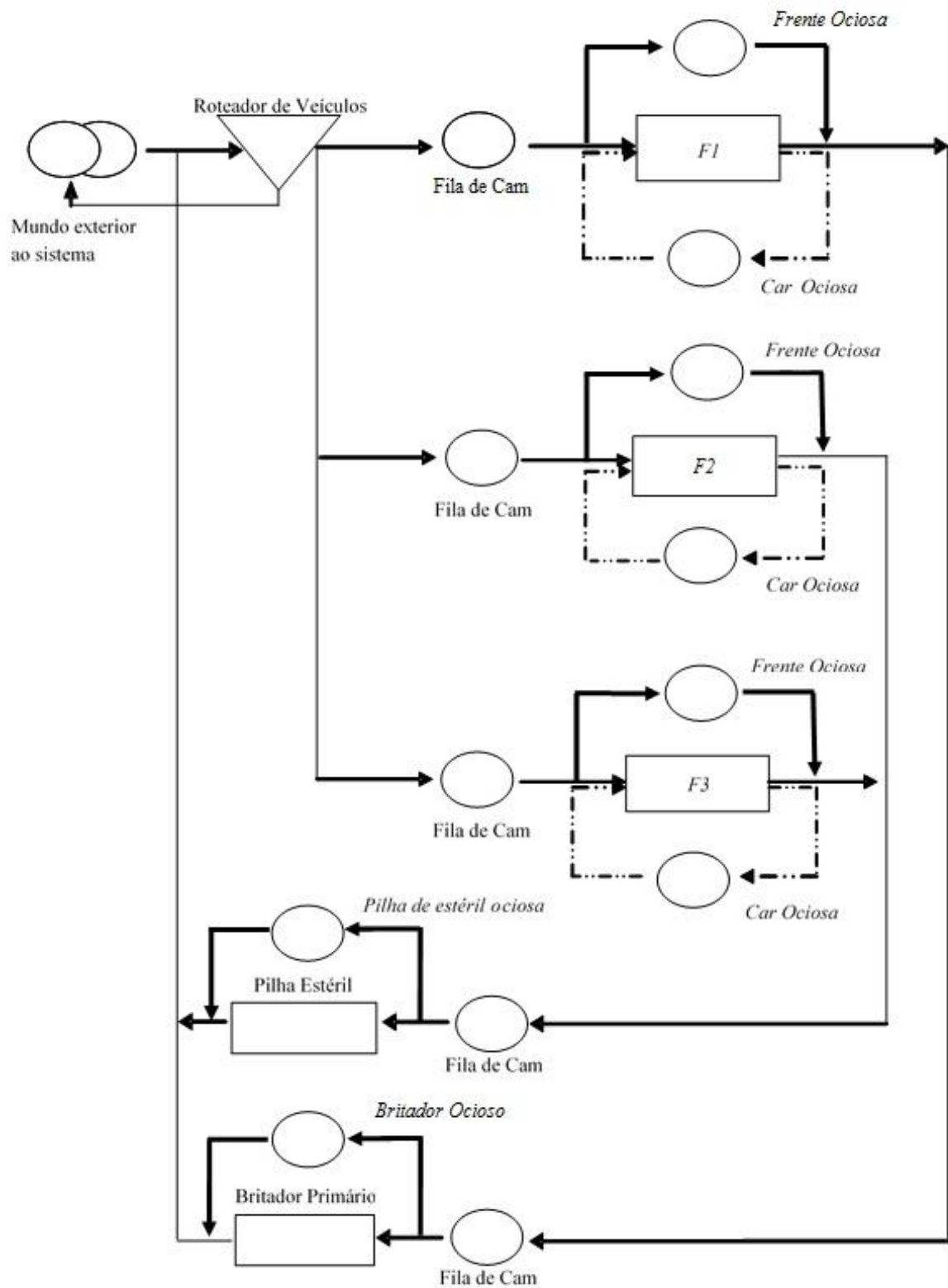


Figura 5: DCA.

Neste DCA, durante a visita de um caminhão a uma frente de lavra, o equipamento de carga entra em operação, carregando o caminhão. Após o caminhão fazer uma visita até a frente, ele retorna até o britador, se a frente de lavra visitada for de minério, ou até a pilha de estéril, se a frente visitada for de estéril. Em seguida, caso ainda existam viagens para este caminhão, ele retorna até alguma frente, segundo a regra de roteamento.

Após a construção do diagrama, o mesmo foi implementado utilizando um programa de simulação específico, para que posteriormente os resultados fossem avaliados.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação foi implementado no *software* ProModel 2011 em um microprocessador Intel Core i5, 1.8 GHz, e 4 GB de memória RAM. Os cenários do modelo englobam os resultados do modelo matemático referentes a quatro minas distintas.

Cada mina ou instância possui dezessete frentes de lavra disponíveis, mas apenas uma quantidade específica é utilizada, seja de estéril ou de minério. Tais frentes possuem as respectivas carregadeiras que são compatíveis com os caminhões. E existem caminhões de dois tipos, tipo A (pequenos) e tipo B (grandes) com capacidades referentes à 50 e 80 toneladas, respectivamente. A figura 6 exemplifica parte de como foi feita a implementação.

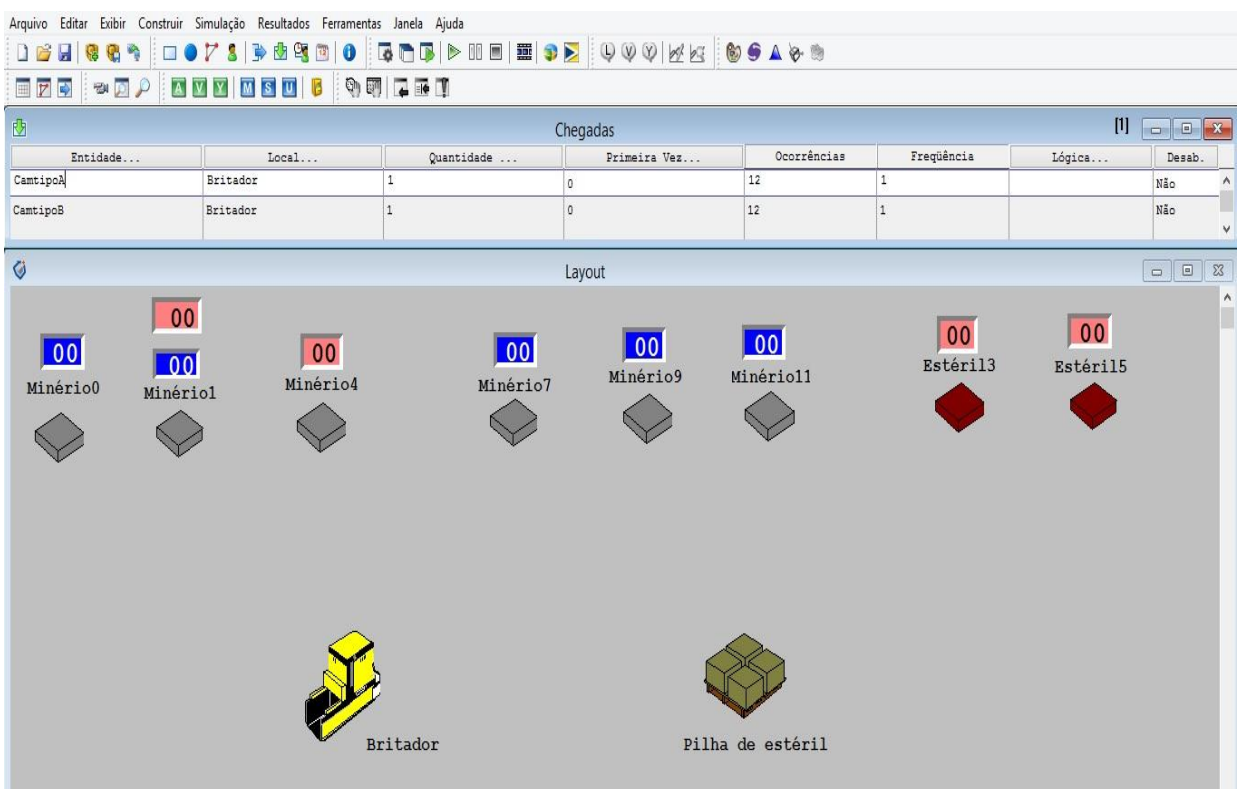


Figura 6: Implementação Promodel.

Como mostrado na figura 6, para a implementação do modelo considerou-se o britador, a pilha de estéril e cada frente de lavra como um local e cada tipo de caminhão como uma entidade diferente. Essa figura representa a implementação para uma das minas estudadas. Nesse caso, foram utilizadas seis frentes de minério e duas de estéril e doze caminhões de cada tipo, que chegam no sistema partindo do britador.

Utilizou-se também o tempo de ciclo do processo que se altera de acordo com a frente de lavra utilizada. Ele envolve o tempo necessário para a carga e descarga do caminhão, juntamente com o tempo de deslocamento do caminhão vazio do britador ou pilha de estéril até a frente de lavra e o tempo de deslocamento do caminhão cheio da frente de lavra até o britador ou pilha de estéril.

Foram testados três tipos de roteamentos para cada instância, “Aleatório”, “Mais disponível” e “Por vez”. No roteamento “Aleatório”, o ProModel seleciona aleatoriamente um dos vários locais disponíveis listados no bloco de roteamento, no caso, as frentes de minério ou de estéril, de forma que o programa pode escolher qualquer local que tenha capacidade disponível. Se nenhum dos locais tiver capacidade disponível, ele irá selecionar o primeiro local que ficar disponível (BELGE, 2010).

No roteamento “Mais disponível”, o ProModel seleciona um dos locais listados em um bloco de roteamento, baseado no local que tiver maior capacidade disponível. Se não houver disponibilidade de capacidade em nenhum dos locais, o programa seleciona o primeiro que ficar disponível. E no “Por vez”, o ProModel seleciona rotativamente os locais listados no bloco de roteamentos que estiverem disponíveis. Se nenhum dos locais tiver disponibilidade, o programa selecionará o primeiro que ficar disponível (BELGE, 2010).

Para cada tipo de roteamento utilizou-se como variável o número de viagens de cada tipo de caminhão para cada frente utilizada. A figura 7 apresenta os resultados para uma das minas e um dos roteamentos testados, após a uma hora de simulação estipulada.

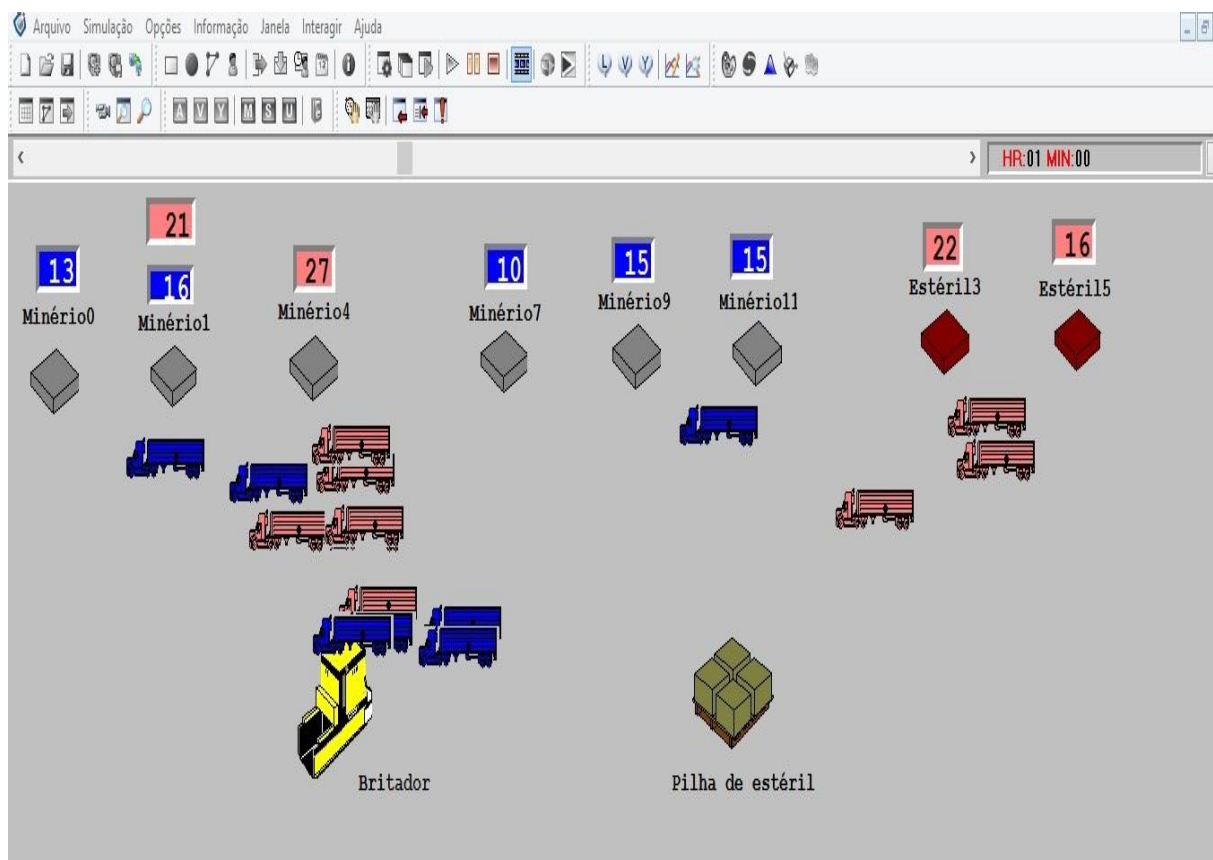


Figura 7: Resultado da implementação para uma das minas.

Na figura 7 estão representados de rosa os caminhões de 50 toneladas e de azul, os de 80. Acima das frentes estão registrados o número de viagens feitas por cada tipo de caminhão à cada frente de lavra. E a partir do número de viagens encontrado, foi calculada a produção total e a produtividade média das carregadeiras utilizadas no processo.

Os resultados foram comparados com intuito de analisar qual o melhor tipo de roteamento para o planejamento de lavra em cada mina, ou seja, qual atinge maior produção e maior produtividade das carregadeiras.

Com os dados do modelo matemático, comparou-se também a meta de produção pretendida para cada instância e a produção alcançada pelo modelo de simulação. A finalidade desta comparação é verificar a possibilidade de se alcançar a meta de produção planejada no plano de lavra de cada mina estudada.

E ainda, analisou-se o efeito causado pelo aumento do número de veículos na produção de uma mina a céu aberto. Um dos problemas encontrados em um planejamento de lavra é a maximização da taxa de utilização dos caminhões.

Esta análise foi realizada com as instâncias 1 e 3. O teste consistiu em elevar gradualmente a quantidade dos dois tipos de caminhões, grandes e pequenos, de acordo com o

melhor roteamento encontrado para as instâncias. Com isso, analisou-se o número de viagens e a produção alcançada, sempre considerando uma hora, com o propósito de encontrar uma quantidade ótima de caminhões que maximiza a produção.

4.2.1 Descrição dos cenários

Nesta seção serão apresentados quatro tipos diferentes de cenários que foram implementados no ProModel 2011. Estes cenários representam as minas ou instâncias estudadas e eles variam entre si em relação à quantidade de frentes de lavra e caminhões utilizados.

Em todos os cenários foram testados os três tipos de roteamentos descritos. Como critério de parada da simulação usou-se o tempo de produção estipulado, ou seja, considerou-se o tempo de simulação de uma hora. A tabela 1 descreve os cenários utilizados.

Tabela 1 – Descrição dos cenários

Locais ou entidades	Cenários			
	Mina 1	Mina 2	Mina 3	Mina 4
Frentes de minério	6	5	6	6
Frentes de estéril	2	1	2	2
Caminhões tipo A	12	4	12	12
Caminhões tipo B	12	3	12	12

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo expõe os resultados do modelo de simulação computacional. Estes foram obtidos pela metodologia apresentada na seção 3.2 considerando os resultados do modelo matemático utilizado.

São apresentados os resultados para o teste de roteamento em relação à produção e à produtividade das carregadeiras em cada mina estudada. Será analisada também a produção alcançada comparando com a meta de produção pretendida. E ainda, são apresentados os resultados do teste feito com duas das quatro minas estudadas, relacionando a quantidade de caminhões utilizados no processo e a produção alcançada.

5.1 RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

5.1.1 Resultados para o teste de roteamento

Nesta seção encontram-se os resultados obtidos para o teste de roteamento referentes à produção alcançada e à produtividade das carregadeiras. Os roteamentos testados em cada mina, como descrito na seção 4.2, foram os “Aleatório”, “Mais disponível” e “Por vez”.

As tabelas com os resultados encontram-se no Anexo B. Eles abordam o número de viagens feitas por cada tipo de caminhão, em cada frente lavra e a produção alcançada em toneladas/hora. Assim como os valores para o teste com as carregadeiras, possuindo também os tempos de operação dos equipamentos de carga e suas produtividades em porcentagem.

As figuras 8 e 9 apresentam graficamente os resultados para o teste de roteamento para a produção e produtividade média das carregadeiras, respectivamente.

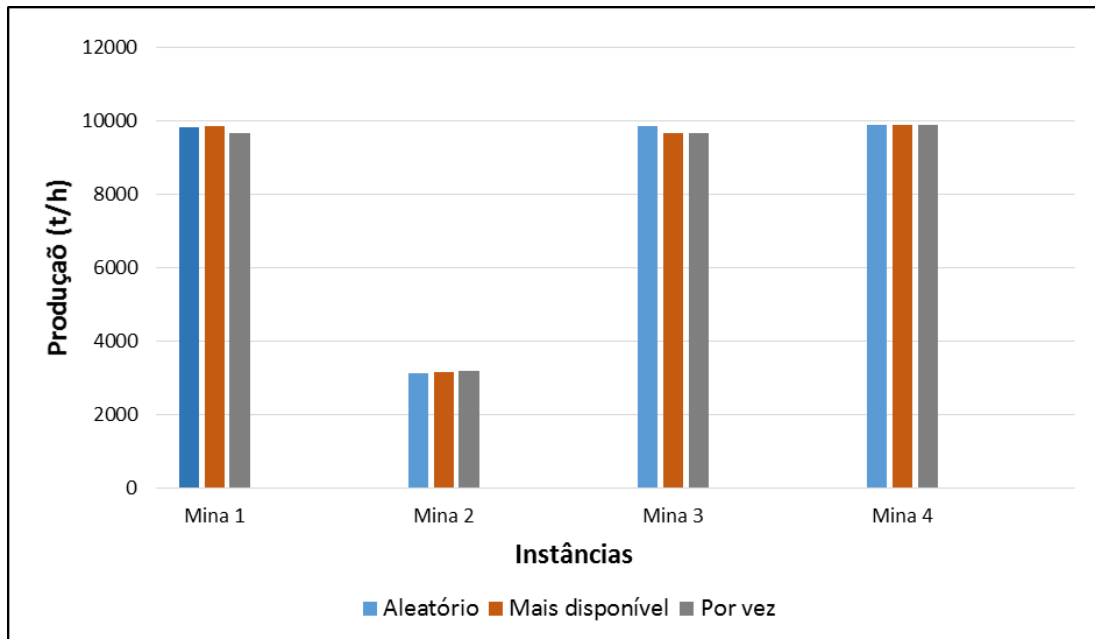


Figura 8: Resultado para o teste de roteamento referente à produção.

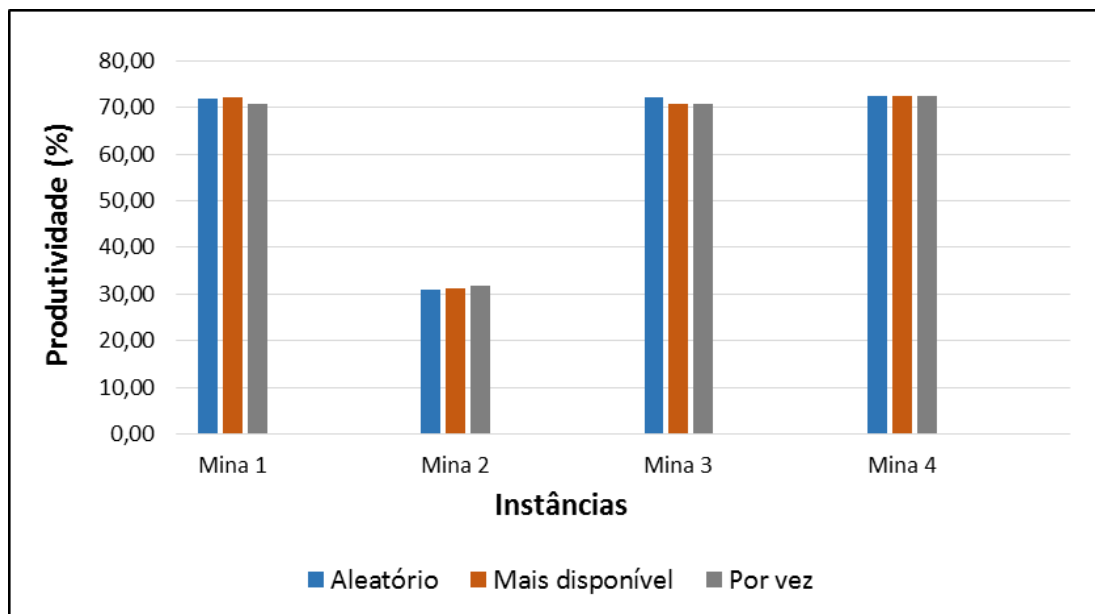


Figura 9: Resultado para o teste de roteamento referente à produtividade média das carregadeiras.

As figuras 8 e 9 mostram que para cada mina um roteamento foi considerado mais satisfatório. Para a primeira instância, o melhor roteamento foi o “Mais disponível” alcançando uma produção de 9870 t/h e a produtividade média de 72,19% das carregadeiras.

Para a mina 2, o roteamento “Por vez” foi o que obteve melhores resultados, atingindo a produção de 3200 t/h e as carregadeiras ficaram em operação em média 31,67% do tempo do processo. Na mina 3, o melhor roteamento é o “Aleatório”, alcançando 9870 t/h

de produção e a produtividade média de 72,19% dos equipamentos de carga. E por fim, na mina 4, não houve um roteamento que maximizasse a produção, em todos eles atingiu-se a produção de 9890 t/h e as carregadeiras trabalharam em média 72,50% do tempo do processo.

Estes resultados evidenciam que não é possível determinar um mesmo tipo de roteamento que otimize a produção e a produtividade dos equipamentos de carga em todas as instâncias.

A escolha do roteamento mais satisfatório depende das características da mina. Cada uma possui, por exemplo, determinadas frentes de lavra e caminhões que são utilizados, e ainda, os tempos de ciclo de cada veículo se alteram de acordo com a frente operada. Tal fato causa alterações no número de viagens de cada caminhão e conseqüentemente na produção da mina e na produtividade das carregadeiras.

5.1.2 Resultados para a comparação entre as produções alcançadas e planejadas

Para a implementação do modelo matemático foi considerada uma meta de produção a ser alcançada em cada mina. O resultado apresentado nesta seção mostra a comparação entre esta meta e as produções alcançadas pelo melhor tipo de roteamento para cada instância estudada.

A tabela 2 apresenta os resultados referentes à comparação e à porcentagem em que a produção encontrada ficou acima da meta pretendida.

Tabela 2 – Meta de produção x Produção alcançada

Instâncias	Meta de produção (t/h)	Maior produção alcançada (t/h)	Produção acima da meta (%)
Mina 1	5800	9870	70,17
Mina 2	1798	3200	77,98
Mina 3	5800	9870	70,17
Mina 4	5800	9890	70,52

De acordo com os dados apresentados na tabela 2, pode-se constatar que é possível alcançar a meta de produção estipulada para cada instância.

Utilizando a quantidade de caminhões do modelo apresentada na descrição dos cenários, é possível atingir a meta. A produção alcançada em cada instância é superior à meta de produção pretendida, porque, neste caso, o modelo de simulação não considerou o número de viagens dos caminhões especificado no modelo matemático.

O modelo em estudo analisa os tipos de roteamento para o planejamento de lavra de cada mina, encontrando o número de viagens possíveis em uma hora de produção. A quantidade de viagens atingida no modelo de simulação é maior do que a estipulada no modelo matemático, o que explica a diferença entre as produções.

5.1.3 Resultados da análise da produção em relação à quantidade de caminhões

Esta seção apresenta os resultados referentes ao efeito causado na produção pelo aumento da quantidade de veículos utilizados no processo produtivo. Este estudo foi realizado com as instâncias 1 e 3, com ambos caminhões, tipo A e tipo B e considerando os melhores roteamentos apresentados na seção 5.1.1.

As tabelas com os valores para esta análise estão presentes no Anexo C. Eles apresentam as quantidades de caminhões, o número de viagens feitas em cada frente de lavra, o número de viagens total e a produção para cada frente em toneladas/hora.

5.1.3.1 Resultado para a instância 1

Como apresentado na seção 5.1.1, para a instância 1, o roteamento “Mais aleatório” foi o que atingiu maior produção e maior produtividade dos equipamentos de carga, se mostrando mais satisfatório para o planejamento de lavra desta mina.

Assim, o teste para a análise da produção foi realizado com o roteamento apresentado. As figuras 10 e 11 mostram, graficamente, os resultados para o aumento da quantidade de veículos tipo A e tipo B, respectivamente.

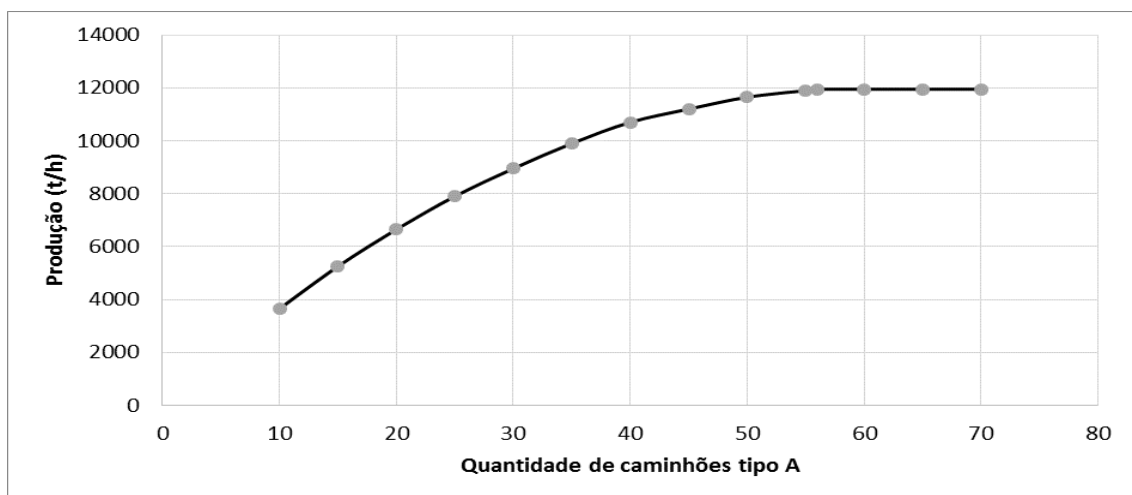


Figura 10: Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo A para a mina 1

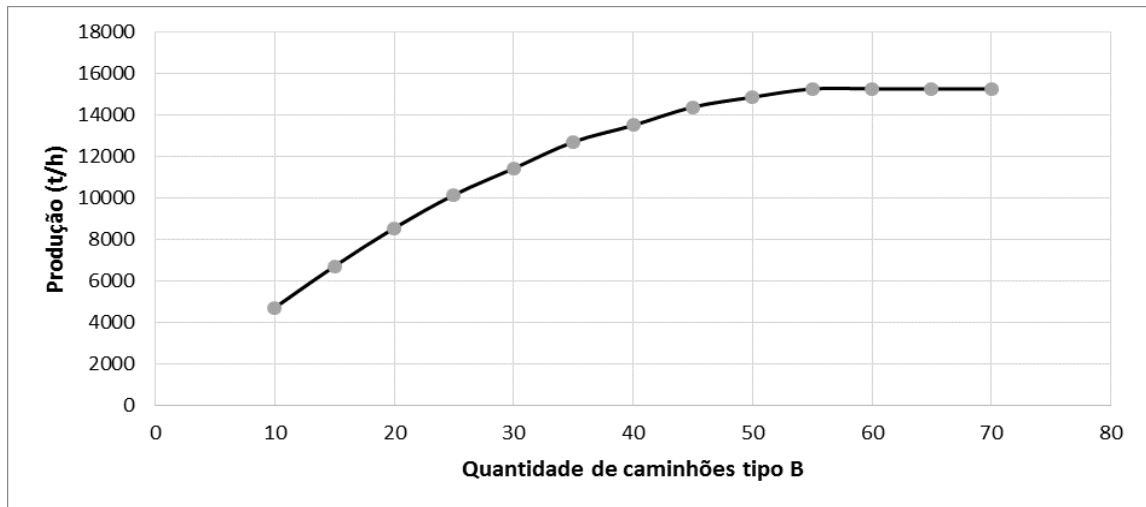


Figura 11: Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo B para a mina 1

As figuras 10 e 11 mostram que ao elevar a quantidade dos dois tipos de caminhões no roteamento estudado, pode-se verificar a elevação nas produções encontradas. A partir de certo ponto, a produção torna-se constante, evidenciando que é possível identificar a quantidade de caminhões ótima que maximiza a produção.

No caso desta instância e considerando uma hora de produção, para o caminhão tipo A, a quantidade ótima é de 56 veículos no plano de lavra, atingindo 11950 t/h de produção e para o tipo B, é de 55 veículos no sistema, alcançando 15280 t/h.

5.1.3.2 Resultado para a instância 3

De acordo com a seção 5.1.1, para a instância 3, o roteamento que atingiu melhores resultados foi o “Aleatório”, se mostrando mais eficiente para o planejamento de lavra desta mina.

Com isso, elevou-se a quantidade dos dois tipos de caminhões utilizando o melhor roteamento acima citado, para identificar a quantidade de caminhões ótima que maximiza a produção. As figuras 12 e 13 mostram, graficamente, os resultados para o aumento da quantidade de veículos tipo A e tipo B, respectivamente.

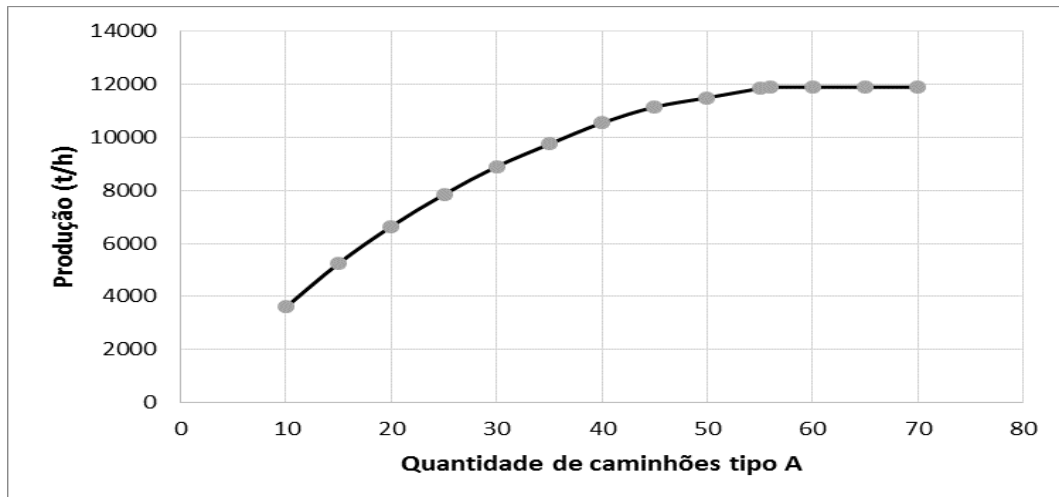


Figura 12: Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo A para a mina 3

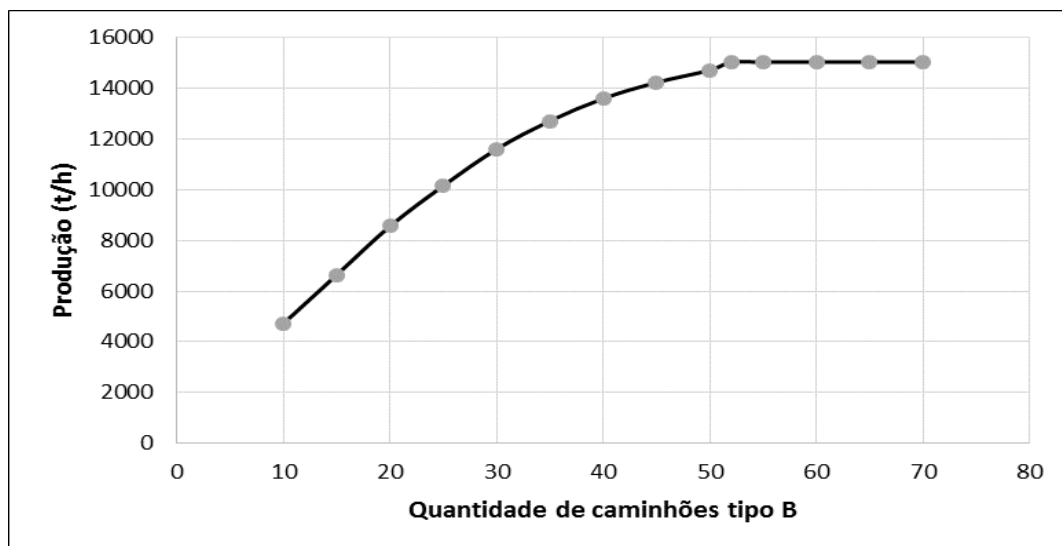


Figura 13: Gráfico da produção relacionada ao aumento da quantidade de veículos tipo B para a mina 3

A partir das figuras 12 e 13 é possível considerar que ao elevar a quantidade dos dois tipos de caminhões para o roteamento “Aleatório”, pode-se verificar novamente a elevação nas produções encontradas. Assim como na instância 1, a partir de certo ponto a produção permanece constante, evidenciando que é possível identificar a quantidade de caminhões ótima que maximiza a produção nesta mina.

Neste caso, para o caminhão tipo A, a quantidade ótima é de 56 veículos no plano de lavra, atingindo 11900 t/h de produção e para o tipo B, é de 52 veículos no sistema, alcançando 15040 t/h.

5.1.3.3 Considerações a respeito da análise da produção

De posse dos resultados apresentados para as duas instâncias estudadas, percebe-se que, a partir de certo ponto, não é necessário aumentar a quantidade de veículos, visto que o número de viagens e a produção permanecerão constantes.

Geralmente, o aumento da produtividade acarreta no aumento da produção da mina. Isso evidencia que o ideal é maximizar a utilização dos caminhões, sendo possível encontrar uma quantidade ótima de veículos para cada instância que otimize a produção. Assim, é possível manter a produtividade de uma frota em um plano de lavra de minas a céu aberto e evitar a elevação dos custos do processo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Esta monografia utiliza ferramentas da pesquisa operacional, mais precisamente a simulação computacional, para a resolução do problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto com alocação dinâmica de caminhões.

Durante este trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o problema abordado. O problema inclui variáveis como a determinação do sequenciamento de caminhões, alocação de equipamentos de carga e as especificações de qualidade das minas. Foi apresentada também a PO como fundamentação para o estudo, com o foco na simulação de sistemas.

Foi proposto um modelo de simulação computacional, baseando-se no resultados de um modelo matemático que contém os parâmetros, restrições e funções objetivos do problema. O modelo foi implementado no *software* de simulação ProModel 2011. E como cenários de simulação utilizou-se quatro minas com características específicas.

Os dados utilizados para a realização do modelo matemático são dados já conhecidos na literatura e se baseiam em minas de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Estes dados já foram utilizados por outros autores que se propuseram a solucionar os problemas relacionados à produtividade de minas a céu aberto e aos custos elevados presentes nesta atividade.

Com o modelo de simulação proposto, foi possível constatar a possibilidade de otimizar o problema de planejamento de lavra em uma mina a céu aberto. A simulação do sistema, mostra-se eficiente neste caso, por considerar o tempo de fila do processo através dos tempos de ciclo dos caminhões, um importante dado que não é considerado no modelo matemático.

O modelo de simulação utilizou as frentes de lavra e a quantidade de caminhões apresentadas nos resultados do modelo matemático referentes a quatro minas distintas. Através do modelo foi possível encontrar um melhor tipo de roteamento para a otimização do planejamento de lavra em cada instância estudada, maximizando a produção e a produtividade das carregadeiras.

O teste de roteamento evidenciou também que não há um único roteamento que maximize a produção de todas as minas. A escolha do mesmo depende, por exemplo, do

tempo de ciclo que se altera de acordo com a frente de lavra utilizada em cada mina, assim como a quantidade e capacidade distintas de ambos os caminhões usados no processo.

Com os resultados do modelo de simulação concluiu-se também que é possível atingir a meta de produção estipulada no modelo matemático. E considerando a produção atingida, pode-se validar o modelo. Pois, utilizando o número de veículos proposto para cada mina, a produção alcançada no modelo de simulação foi superior à meta planejada.

Esta diferença nos resultados ocorreu porque o modelo de simulação não considera o número de viagens encontrado no modelo matemático e sim a quantidade de veículos utilizado no sistema. O modelo encontrou o melhor tipo de roteamento para cada instância considerando uma hora de produção, o que acarretou num maior número de viagens feitas por cada tipo de caminhão se comparado ao modelo matemático.

Concluiu-se também que é possível determinar uma quantidade máxima de caminhões que maximize a produção. O modelo de simulação apresentado conseguiu demonstrar que não é viável aumentar o número de veículos no processo, além do máximo encontrado, visto que a produção permanece constante a partir de certo ponto. Tais resultados comprovam a viabilidade de atender requisitos fundamentais para otimização do plano de lavra, como a diminuição da quantidade caminhões, a maximização da utilização dos mesmos e a diminuição dos custos do processo.

Com o modelo de simulação proposto não é possível validar completamente o modelo matemático e apresentar sua viabilidade de implementação no sistema real. O trabalho não considerou alguns dados que podem influenciar nos resultados, como o número de viagens específico para cada caminhão e os requisitos de qualidade do minério apresentados em cada frente de lavra das minas estudadas.

Contudo, esta monografia conseguiu atingir os objetivos propostos. Foi possível demonstrar a eficiência do uso de ferramentas da PO, com o foco na simulação de sistemas, para a resolução de problemas referentes ao setor mineral. Com o modelo de simulação proposto evidenciou-se as inúmeras análises que podem ser feitas para auxiliar nas tomadas de decisões, o que ajuda a identificar o planejamento de lavra de uma mina a céu aberto que obtenha resultados mais satisfatórios e seja mais eficiente.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Para a realização de trabalhos futuros recomenda-se:

- Incrementar o modelo de simulação;
- Considerar outros dados relevantes, como o número de viagens específico para cada caminhão encontrado no modelo matemático e as restrições de qualidade presentes na mistura de minérios;
- Testar o modelo com mais instâncias;
- Testar outros tipos de roteamentos;
- Testar o modelo de simulação com a alocação estática de caminhões.

Referências

ALBERTIN, Liliane Lazzari; MAUAD, Frederico Fabio e DANIEL, Luiz Antônio. **Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Paulo: 2006.

ALEXANDRE, Rafael Frederico. **Modelagem, Simulação da Operação e Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Problema de Despacho de Veículos em Minas a Céu Aberto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2010.

AMARAL, Mônica. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2008.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ANDRADE, Rafael Quintão; GOLOBOVANTE, André Filipe Moraes; PRAZERES, Igor Padilha; OLIVEIRA, Lucas Machado e MARTINS, Luciana Lago. **Aplicação de simulação de processos em um sistema de carregamento e pesagem de caminhões em uma mina**. XXXI ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, Minas Gerais: 2011.

ARAÚJO, Francisco César Rodrigues e SOUZA, Marccone Jamilson Freitas. **Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões**. REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais: 2011.

BELGE – Engenharia e Sistemas. **Guia de referência: material extraído do ‘Reference Guide’ do promodel para consulta rápida dos usuários do software**. São Paulo, 2010.

BIOGOLD INVESTMENT FUND. **Mineração no Brasil**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2013.

BRIGHENTI, José Renato Nunes. **Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais: 2006.

BUENO, Fabrício. **Métodos Heurísticos: Teoria e implementações**. Tutorial. Instituto Federal de Santa Catarina, Araranguá: 2009.

CECILIANO, Wellington Rodrigo Aparecido. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 2007.

CHWIF, L. e MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. São Paulo: Ed. dos autores, 2006.

COELHO, V. N.; SOUZA, M. J. F.; COELHO, I. M.; GUIMARÃES, F. G.; Lust, T.; CRUZ, R. C. (2012). **Multi-objective approaches for the open-pit mining operational planning problem**. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. v. 39, p. 233-240.

COSTA, Felipe Pereira da. **Aplicação de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: 2005.

COSTA, Felipe Pereira e SOUZA, Marcone Jamilson F. e PINTO, Luiz Ricardo. **Um modelo de alocação dinâmica de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade**. CBMA. 2004.

COSTA, Felipe Pereira da; SOUZA, Marcone Jamilson Freitas e PINTO, Luiz Ricardo. **Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade**. REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais: 2005.

DUARTE, Roberto Nunes. **Simulação Computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de autopeças**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais: 2003.

GARCIA JÚNIOR, Guiler Oliveira. **Proposta de melhoria de layout produtivo utilizando simulação computacional: estudo de caso em uma indústria do setor moveleiro**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade da Amazônia, Belém, Pará: 2012.

HILLIER, Frederick S. e LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7. ed. Brasília, 2012.

KUMRAL, Mustafa. (2013). **Multi-period mine planning with multi-process routes**. *International Journal of Mining Science and Technology*, v 172, p. 317-321.

LEAL, Fabiano. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais: 2003.

MERSCHMANN, Luiz Henrique de Campos e PINTO, Luiz Ricardo. **Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos**. REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais: 2001.

MORAES, Edilaila Fernandes. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: 2005.

MUNHOZ, José Renato; MORABITO, Reinaldo. **Um modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de**

suco concentrado congelado de laranja. Revista Gestão e Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo: 2001.

NEWMAN, Alexandra M.; RUBIO, Enrique; CARO, Rodrigo; WEINTRAUB, Andrés e EUREK, Kelly. (2010). **A Review of Operations Research in Mine Planning.** Journal Interfaces, v 40, p. 222-245.

PANTUZA JR., Guido. **Utilização das ferramentas da pesquisa operacional aplicadas ao planejamento de lavra em minas a céu aberto.** Monografia (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: 2008.

PANTUZA JR., Guido. **Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: 2011.

PANTUZA JR., Guido. **Um algoritmo vns multiobjetivo para o problema de sequenciamento com alocação de trabalhadores.** CLAIO – Congresso Latino Americano de Investigación Operativa. SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: 2012.

PANTUZA JR., Guido; SOUZA, Marcone Jamilson Freitas e CABRAL, Ivo Eyer. **Uma nova formulação de programação matemática para o problema de planejamento de lavra.** Revista GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas, São Paulo: 2009.

PANTUZA JR., Guido e SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. **Um modelo de simulação no arena para o sequenciamento e redução do tempo das viagens dos caminhões em uma mina a céu aberto.** XIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, São Paulo: 2011.

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

RAMOS NETO, Augusto Nogueira; PINTO, Luiz Ricardo. **Template do programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto.** REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais: 2004.

RODRIGUES, Lásara Fabrícia e PINTO, Luiz Ricardo. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto.** REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais: 2012.

RODRIGUES, William Costa. **Metodologia Científica.** FAETEC – Fundação de Apoio à Escola Técnica, Paracambi, Rio de Janeiro: 2007.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico.** 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SOUZA, M. J. F.; COELHO, I. M.; RIBAS, S.; SANTOS, H. G. e MERSCHMANN, L. H. C. (2010). **A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem.** European Journal of Operational Research, v. 207, p. 1041-1051.

SOUZA, Tiago Francioli. **A Simulação a Eventos Discretos como ferramenta de apoio à Tomada de Decisão em empresas do ramo de mineração: Aplicação em uma unidade da Yamana Gold.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais: 2009.

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional.** 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TOFFOLO, Túlio Ângelo Machado. **Otimização do fluxo de produtos de uma empresa mineradora.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2009.

TORGA, Bruno Lopes Mendes; MONTEVECHI, José Arnaldo Barra e PINHO, Alexandre Ferreira. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura.** XIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, São Paulo: 2006.

ANEXO A - MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICO

Para o modelo, têm-se os seguintes parâmetros de entrada:

M	: Conjunto de frentes de minério;
E	: Conjunto de frentes de estéril;
F	: Conjunto de frentes formado por $M \cup E$
Q	: Conjunto de parâmetros de qualidade analisados no minério;
C	: Conjunto de equipamentos de carga;
V	: Conjunto de equipamentos de transporte;
Pr	: Ritmo de lavra recomendado (t/h);
Pl	: Ritmo de lavra mínimo (t/h);
Pu	: Ritmo de lavra máximo (t/h);
α^-	: Penalidade por desvio negativo da produção;
α^+	: Penalidade por desvio positivo da produção;
β_j^-	: Penalidade por desvio negativo para o parâmetro j na mistura;
β_j^+	: Penalidade por desvio positivo para o parâmetro j na mistura;
γ^-	: Penalidade por desvio negativo em relação a estéril/minério;
γ^+	: Penalidade por desvio positivo em relação a estéril/minério;
ω	: Penalidade por utilização do caminhão;
t_{ij}	: Teor do parâmetro j na frente i (%);
tr_j	: Teor recomendado para o parâmetro j na mistura (%);
tl_j	: Teor mínimo admissível para o parâmetro j na mistura (%);
tu_j	: Teor máximo admissível para o parâmetro j na mistura (%);
Qu_i	: Ritmo de lavra máximo para a frente i (t/h);
Rem	: Relação estéril/minério requerida;
Cm_k	: Produção mínima de minério do equipamento de carga k (t/h);
Cum_k	: Produção máxima de minério do equipamento de carga k (t/h);
Cle_k	: Produção mínima de estéril do equipamento de carga k (t/h);
Cue_k	: Produção máxima de estéril do equipamento de carga k (t/h);
$capm_l$: Capacidade de minério dos caminhões l ;
$cape_l$: Capacidade de estéril dos caminhões l ;
Txu	: Taxa de utilização máxima dos caminhões (%);
Tc_{il}	: Tempo de ciclo total do caminhão l de acordo com seu número de viagens até a frente de lavra i ;
g_{lk}	: $\begin{cases} 1 & \text{se o caminhão } l \text{ é compatível com a carregadeira } k; \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$

O modelo considera as seguintes variáveis de decisão:

x_i	: Ritmo de lavra da frente i do material (t/h);
-------	---

- y_{ik} : $\begin{cases} 1 \text{ se o equipamento de carga } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 \text{ caso contrário;} \end{cases}$
 n_{il} : Número de viagens que um caminhão l até a frente i ;
 P^- : Desvio negativo do ritmo de lavra em relação ao recomendado (t/h);
 P^+ : Desvio positivo do ritmo de lavra em relação ao recomendado (t/h);
 E^- : Desvio negativo da relação estéril/minério;
 E^+ : Desvio positivo da relação estéril/minério;
 d_j^- : Desvio negativo do parâmetro j na mistura (t/h);
 d_j^+ : Desvio positivo do parâmetro j na mistura (t/h);
 u_l : $\begin{cases} 1 \text{ se o caminhão } l \text{ está sendo utilizado;} \\ 0 \text{ caso contrário;} \end{cases}$
 Tx_l : Taxa de utilização do caminhão l .

O modelo possui cinco funções objetivo: FO_1 , FO_2 , FO_3 , FO_4 de minimização e FO_5 de maximização.

Minimizar

$$\begin{cases} FO_1 = \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ \\ FO_2 = \sum_{j \in Q} (\beta_j^- d_j^- + \beta_j^+ d_j^+) \\ FO_3 = \sum_{i \in V} \omega u_i \\ FO_4 = \gamma^- E^- + \gamma^+ E^+ \end{cases}$$

Maximizar

$$FO_5 = \sum_{i \in V} \omega Tx_i$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i &\leq 0 && \forall j \in Q \\ \sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i &\geq 0 && \forall j \in Q \\ \sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j) x_i + d_j^- - d_j^+ &= 0 && \forall j \in Q \\ \sum_{i \in M} x_i - Pu &\leq 0 \\ \sum_{i \in M} x_i - P_l &\geq 0 \\ \sum_{i \in M} x_i - Pr + P^- - P^+ &= 0 \\ x_i - Qu_i &\leq 0 && \forall i \in F \\ \sum_{k \in C} y_{ik} &\leq 1 && \forall i \in F \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in F} y_{ik} &\leq 1 && \forall k \in C \\
x_i - \sum_{k \in C} Cum_k y_{ik} &\leq 0 && \forall i \in M \\
x_i - \sum_{k \in C} Cue_k y_{ik} &\leq 0 && \forall i \in E \\
x_i - \sum_{k \in C} Clm_k y_{ik} &\geq 0 && \forall i \in M \\
x_i - \sum_{k \in C} Cle_k y_{ik} &\geq 0 && \forall i \in E \\
n_{il} Tc_{il} - 60 \sum_{k \in C / g_{ik}=1} y_{ik} &\leq 0 && \forall l \in V, i \in F \\
\sum_{i \in F} n_{il} Tc_{il} &\leq 60 u_l T_x u && \forall l \in V \\
Tx_l = \sum_{i \in F} \frac{n_{il} Tc_{il}}{60} &&& \forall l \in V \\
\sum_{i \in E} x_i - \sum_{i \in M} x_i Rem - E^+ + E^- &= 0 && \\
x_i - \sum_{l \in V} n_{il} capm_l &= 0 && \forall i \in F \\
x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cape_l &= 0 && \forall i \in F
\end{aligned}$$

ANEXO B – QUADROS COM RESULTADOS PARA O TESTE DE ROTEAMENTO

Tabela 3 – Roteamento “Aleatório” para mina 1 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério0	0	13	1040
Minério1	21	16	2330
Minério4	27	0	1350
Minério7	0	10	800
Minério9	0	15	1200
Minério11	0	15	1200
Estéril3	22	0	1100
Estéril5	16	0	800

Tabela 4 – Roteamento “Mais disponível” para a mina 1 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério0	0	21	1680
Minério1	22	3	1340
Minério4	20	0	1000
Minério7	0	14	1120
Minério9	0	13	1040
Minério11	0	18	1440
Estéril3	29	0	1450
Estéril5	16	0	800

Tabela 5 – Roteamento “Por vez” para a mina 1 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério0	0	14	1120
Minério1	21	13	2090
Minério4	21	0	1050
Minério7	0	14	1120
Minério9	0	13	1040
Minério11	0	14	1120
Estéril3	22	0	1100
Estéril5	21	0	1050

Tabela 6 – Resultado para a mina 1 referente à produção

Roteamento	Produção Total (t/h)
Aleatório	9820
Mais disponível	9870
Por vez	9690

Tabela 7 - Roteamento “Aleatório” para a mina 1 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério0	0	13	32,5	54,17
Minério1	21	16	82	136,67
Minério4	27	0	54	90,00
Minério7	0	10	25	41,67
Minério9	0	15	37,5	62,50
Minério11	0	15	37,5	62,50
Estéril3	22	0	44	73,33
Estéril5	16	0	32	53,33

Tabela 8 - Roteamento “Mais disponível” para a mina 1 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. Carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério0	0	21	52,5	87,50
Minério1	22	3	51,5	85,83
Minério4	20	0	40	66,67
Minério7	0	14	35	58,33
Minério9	0	13	32,5	54,17
Minério11	0	18	45	75,00
Estéril3	29	0	58	96,67
Estéril5	16	0	32	53,33

Tabela 9 - Roteamento “Por vez” para a mina 1 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. Carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério0	0	14	35	58,33
Minério1	21	13	74,5	124,17
Minério4	21	0	42	70,00
Minério7	0	14	35	58,33
Minério9	0	13	32,5	54,17
Minério11	0	14	35	58,33
Estéril3	22	0	44	73,33
Estéril5	21	0	42	70,00

Tabela 10 – Resultado para a mina 1 referente à produtividade média das carregadeiras

Roteamento	Produtividade média das carregadeiras (%)
Aleatório	71,77
Mais disponível	72,19
Por vez	70,83

Tabela 11 – Roteamento “Aleatório” para a mina 2 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério1	0	7	560
Minério3	7	0	350
Minério5	0	5	400
Minério7	17	0	850
Minério11	0	7	560
Estéril5	8	0	400

Tabela 12 – Roteamento “Mais disponível” para a mina 2 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério1	0	7	560
Minério3	9	0	450
Minério5	0	7	560
Minério7	8	0	400
Minério11	0	6	480
Estéril5	14	0	700

Tabela 13 – Roteamento “Por vez” para a mina 2 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério1	0	7	560
Minério3	11	0	550
Minério5	0	7	560
Minério7	11	0	550
Minério11	0	6	480
Estéril5	10	0	500

Tabela 14 – Resultado para a mina 2 referente à produção

Roteamento	Produção Total (t/h)
Aleatório	3120
Mais disponível	3150
Por vez	3200

Tabela 15 - Roteamento “Aleatório” para a mina 2 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério1	0	7	17,5	29,17
Minério3	7	0	14	23,33
Minério5	0	5	12,5	20,83
Minério7	17	0	34	56,67
Minério11	0	7	17,5	29,17
Estéril5	8	0	16	26,67

Tabela 16 - Roteamento “Mais disponível” para a mina 2 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério1	0	7	17,5	29,17
Minério3	9	0	18	30,00
Minério5	0	7	17,5	29,17
Minério7	8	0	16	26,67
Minério11	0	6	15	25,00
Estéril5	14	0	28	46,67

Tabela 17 - Roteamento “Por vez” para a mina 2 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. Carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério1	0	7	17,5	29,17
Minério3	11	0	22	36,67
Minério5	0	7	17,5	29,17
Minério7	11	0	22	36,67
Minério11	0	6	15	25,00
Estéril5	10	0	20	33,33

Tabela 18 – Resultado para a mina 2 referente à produtividade média das carregadeiras

Roteamento	Produtividade média das carregadeiras (%)
Aleatório	30,97
Mais disponível	31,11
Por vez	31,67

Tabela 19 – Roteamento “Aleatório” para a mina 3 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério2	18	0	900
Minério3	0	15	1200
Minério4	27	0	1350
Minério5	0	16	1280
Minério7	0	17	1360
Minério11	0	21	1680
Estéril3	24	0	1200
Estéril5	18	0	900

Tabela 20 – Roteamento “Mais disponível” para a mina 3 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério2	23	0	1150
Minério3	0	20	1600
Minério4	19	0	950
Minério5	0	16	1280
Minério7	0	14	1120
Minério11	0	18	1440
Estéril3	27	0	1350
Estéril5	16	0	800

Tabela 21 – Roteamento “Por vez” para a mina 3 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério2	21	0	1050
Minério3	0	17	1360
Minério4	21	0	1050
Minério5	0	17	1360
Minério7	0	17	1360
Minério11	0	17	1360
Estéril3	22	0	1100
Estéril5	21	0	1050

Tabela 22 – Resultado para a mina 3 referente à produção

Roteamento	Produção Total (t/h)
Aleatório	9870
Mais disponível	9690
Por vez	9690

Tabela 23 - Roteamento “Aleatório” para a mina 3 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério2	18	0	36	60,00
Minério3	0	15	37,5	62,50
Minério4	27	0	54	90,00
Minério5	0	16	40	66,67
Minério7	0	17	42,5	70,83
Minério11	0	21	52,5	87,50
Estéril3	24	0	48	80,00
Estéril5	18	0	36	60,00

Tabela 24 - Roteamento “Mais disponível” para a mina 3 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério2	23	0	46	76,67
Minério3	0	20	50	83,33
Minério4	19	0	38	63,33
Minério5	0	16	40	66,67
Minério7	0	14	35	58,33
Minério11	0	18	45	75,00
Estéril3	27	0	54	90,00
Estéril5	16	0	32	53,33

Tabela 25 - Roteamento “Por vez” para a mina 3 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério2	21	0	42	70,00
Minério3	0	17	42,5	70,83
Minério4	21	0	42	70,00
Minério5	0	17	42,5	70,83
Minério7	0	17	42,5	70,83
Minério11	0	17	42,5	70,83
Estéril3	22	0	44	73,33
Estéril5	21	0	42	70,00

Tabela 26 – Resultado para a mina 3 referente à produtividade média das carregadeiras

Roteamento	Produtividade média das carregadeiras (%)
Aleatório	72,19
Mais disponível	70,83
Por vez	70,83

Tabela 27 – Roteamento “Aleatório” para a mina 4 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério3	19	0	950
Minério4	0	15	1200
Minério7	0	20	1600
Minério8	0	16	1280
Minério10	21	0	1050
Minério11	0	17	1360
Estéril2	24	0	1200
Estéril3	25	0	1250

Tabela 28 – Roteamento “Mais disponível” para a mina 4 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério3	20	0	1000
Minério4	0	19	1520
Minério7	0	18	1440
Minério8	0	16	1280
Minério10	20	0	1000
Minério11	0	15	1200
Estéril2	30	0	1500
Estéril3	19	0	950

Tabela 29 – Roteamento “Por vez” para a mina 4 referente à produção

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Produção (t/h)
Minério3	23	0	1150
Minério4	0	17	1360
Minério7	0	17	1360
Minério8	0	17	1360
Minério10	22	0	1100
Minério11	0	17	1360
Estéril2	23	0	1150
Estéril3	21	0	1050

Tabela 30 – Resultado para a mina 4 referente à produção

Roteamento	Produção Total (t/h)
Aleatório	9890
Mais disponível	9890
Por vez	9890

Tabela 31 - Roteamento “Aleatório” para a mina 4 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério3	19	0	38	63,33
Minério4	0	15	37,5	62,50
Minério7	0	20	50	83,33
Minério8	0	16	40	66,67
Minério10	21	0	42	70,00
Minério11	0	17	42,5	70,83
Estéril2	24	0	48	80,00
Estéril3	25	0	50	83,33

Tabela 32 - Roteamento “Mais disponível” para a mina 4 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério3	20	0	40	66,67
Minério4	0	19	47,5	79,17
Minério7	0	18	45	75,00
Minério8	0	16	40	66,67
Minério10	20	0	40	66,67
Minério11	0	15	37,5	62,50
Estéril2	30	0	60	100,00
Estéril3	19	0	38	63,33

Tabela 33 - Roteamento “Por vez” para a mina 4 referente à produtividade das carregadeiras

Frentes	Nº de viagens caminhão Tipo A	Nº de viagens caminhão Tipo B	Tempo de prod. Carregadeira (min)	Produtividade carregadeira (%)
Minério3	23	0	46	76,67
Minério4	0	17	42,5	70,83
Minério7	0	17	42,5	70,83
Minério8	0	17	42,5	70,83
Minério10	22	0	44	73,33
Minério11	0	17	42,5	70,83
Estéril2	23	0	46	76,67
Estéril3	21	0	42	70,00

Tabela 34 – Resultado para a mina 4 referente à produtividade média das carregadeiras

Roteamento	Produtividade média das carregadeiras (%)
Aleatório	72,50
Mais disponível	72,50
Por vez	72,50

ANEXO C – QUADROS COM RESULTADOS DA ANÁLISE DA PRODUÇÃO EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DE CAMINHÕES

Tabela 35 – Produção para o caminhão tipo A para a mina 1

Quantidade de caminhões tipo A	Nº de viagens				Nº de viagens total	Produção (t/h)
	Minério1	Minério4	Estéril3	Estéril5		
10	21	17	24	11	73	3650
15	30	21	34	20	105	5250
20	34	31	41	27	133	6650
25	41	36	47	34	158	7900
30	48	39	53	39	179	8950
35	51	44	59	44	198	9900
40	55	49	62	48	214	10700
45	58	50	66	50	224	11200
50	61	52	68	52	233	11650
55	61	54	70	53	238	11900
56	62	54	70	53	239	11950
60	62	54	70	53	239	11950
65	62	54	70	53	239	11950
70	62	54	70	53	239	11950

Tabela 36 – Produção para o caminhão tipo B para a mina 1

Quantidade de caminhões tipo B	Nº de viagens					Nº de viagens total	Produção (t/h)
	Minério0	Minério1	Minério7	Minério9	Minério11		
10	18	9	9	9	14	59	4720
15	21	14	16	14	19	84	6720
20	27	17	20	18	25	107	8560
25	31	21	24	22	29	127	10160
30	34	24	28	24	33	143	11440
35	37	28	31	28	35	159	12720
40	39	29	35	29	37	169	13520
45	42	32	36	31	39	180	14400
50	42	33	38	33	40	186	14880
55	44	34	39	33	41	191	15280
60	44	34	39	33	41	191	15280
65	44	34	39	33	41	191	15280
70	44	34	39	33	41	191	15280

Tabela 37 – Produção para o caminhão tipo A para a mina 3

Quantidade de caminhões tipo A	Nº de viagens				Nº de viagens total	Produção (t/h)
	Minério2	Minério4	Estéril3	Estéril5		
10	21	16	17	18	72	3600
15	27	23	31	24	105	5250
20	34	33	34	32	133	6650
25	39	45	39	34	157	7850
30	42	54	42	40	178	8900
35	44	59	49	43	195	9750
40	49	62	53	47	211	10550
45	52	64	55	52	223	11150
50	54	65	55	56	230	11500
55	56	66	57	58	237	11850
56	57	66	57	58	238	11900
60	57	66	57	58	238	11900
65	57	66	57	58	238	11900
70	57	66	57	58	238	11900

Tabela 38 – Produção para o caminhão tipo B para a mina 3

Quantidade de caminhões tipo B	Nº de viagens				Nº de viagens total	Produção (t/h)
	Minério3	Minério5	Minério7	Minério11		
10	11	13	15	20	59	4720
15	22	18	19	24	83	6640
20	32	23	25	27	107	8560
25	32	30	31	34	127	10160
30	37	39	33	36	145	11600
35	39	46	35	39	159	12720
40	41	51	39	39	170	13600
45	42	54	40	42	178	14240
50	44	56	41	43	184	14720
52	45	58	41	44	188	15040
55	45	58	41	44	188	15040
60	45	58	41	44	188	15040
65	45	58	41	44	188	15040
70	45	58	41	44	188	15040