



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA: DESENVOLVIMENTO DE UM
MODELO MATEMÁTICO PARA AS MINAS DE CAPÃO XAVIER E MAR AZUL**

Ademar Lopes da Silva Júnior

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2019**

Ademar Lopes da Silva Júnior

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA: DESENVOLVIMENTO DE UM
MODELO MATEMÁTICO PARA AS MINAS DE CAPÃO XAVIER E MAR AZUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Marcone Jamilson Freitas Souza, D.Sc.

Coorientador: Prof. Luciano Perdigão Cota, D.Sc.

Ouro Preto
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586p Silva Junior, Ademar Lopes Da .
Planejamento operacional de lavra [manuscrito]: desenvolvimento de um modelo matemático para as minas de Capão Xavier e Mar Azul. / Ademar Lopes Da Silva Junior. - 2019.
46 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza.
Coorientador: Prof. Dr. Luciano Perdigão Cota.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Plano de Lavra - Relatórios técnicos. 2. Mineração a Céu Aberto. 3. Programação linear. I. Silva Junior, Ademar Lopes Da . II. Cota, Luciano Perdigão. III. Souza, Marcone Jamilson Freitas. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

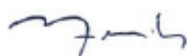
CDU 681.5:622.2

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Planejamento Operacional de Lavra: Desenvolvimento de Um
Modelo Matemático para as Minas de Capão Xavier e Mar Azul

Ademar Lopes da Silva Júnior

Dissertação defendida e aprovada em 23 de agosto de 2019 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza
Orientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Luciano Perdigão Cota
Coorientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)



D.Sc. Mauricio Cardoso de Souza
Membro externo – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. Gustavo Pessin
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

*A minha esposa, Liliam, que
sempre me apoia e aos meus
amados filhos, Joaquim e Vicente*

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado saúde e força para completar mais esta etapa na minha vida.

Ao ITV, corpo docente e equipe administrativa pelo aprendizado, estrutura e apoio.

A VALE, pela oportunidade e incentivo ao desenvolvimento pessoal, capacitação e estudo.

Ao meu orientador e coorientador, pelo suporte, aprendizado e instruções essenciais para conclusão deste trabalho.

Aos meus pais e irmã, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*“O conhecimento serve para
encantar pessoas, não para
humilhá-las”
(Mario Sergio Cortella)*

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA AS MINAS DE CAPÃO XAVIER E MAR AZUL

Ademar Lopes da Silva Júnior

Agosto/2019

Orientadores: Marcone Jamilson Freitas Souza

Luciano Perdigão Cota

Esta dissertação trata o problema de planejamento operacional de lavra diário de uma mina a céu aberto de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais, Brasil. O problema envolve um conjunto de frentes de minério e estéril, um conjunto de carregadeiras para lavar o minério e o estéril, um conjunto de pontos de descarga de minério e estéril. É considerado no trabalho a alocação dinâmica de caminhões com frota homogênea, o que significa que as rotas dos caminhões não são fixas. O problema consiste em decidir quais frentes lavar, bem como designar as carregadeiras a essas frentes que devem ser lavradas, e estabelecer as rotas dos caminhões entre as frentes de lavra e os pontos de descarga. Há três objetivos principais: minimizar os desvios de produção e qualidade em relação às metas estabelecidas e minimizar a quantidade de caminhões necessários ao processo. Para resolvê-lo foi desenvolvido um modelo de programação linear por metas em uma abordagem mono-objetivo, representada por uma função que é a soma ponderada dos desvios das metas estabelecidas e do número de caminhões. O modelo foi implementado no software LINGO e para testá-lo foram usados dados reais das minas. Os resultados obtidos mostram soluções satisfatórias com relação ao atendimento dos objetivos estabelecidos, mostrando a adequação do modelo como ferramenta de apoio à tomada de decisão para a equipe de planejamento de lavra de curto prazo.

Palavras-chave: Planejamento de lavra, Mineração à céu aberto, Programação linear por metas

Macrotema: Logística; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Melhoria de Qualidade de Produtos; Redução na Incerteza no Planejamento da Mina; **Área Relacionada da Vale:** Planejamento de Lavra.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Ademar Lopes da Silva Júnior

August/2019

Advisors: Marcone Jamilson Freitas Souza

Luciano Perdigão Cota

This dissertation addresses the problem of a daily mining operational planning of an open pit iron ore mine belonging to of the Quadrilátero Ferrífero, in Minas Gerais State, Brazil. The problem involves a set of ore and sterile pits, a set of shovels for mining the ore and sterile, a set of ore and sterile unloading points. It is considered in the work the dynamic allocation of trucks with homogeneous fleet, which means that the routes of the trucks are not fixed. The problem consists in deciding which pits to extract material, as well as assigning shovels to those pits, and establishing the truck routes between the pits and the unloading points. There are three main objectives: to minimize production and quality deviations from established goals and to minimize the number of trucks required for the operation. To solve it, a goal programming model was developed in a mono-objective approach, represented by a function that is the weighted sum of the deviations from the established goals and the number of trucks. The model was implemented in the LINGO software and for testing it used real mine data. The results show satisfactory solutions in relation to meeting the established objectives, showing the adequacy of the model as a decision support tool for the short term planning team.

Keywords: Mining planning, Open-pit mining, Goal programming

Macrotheme: Logistics; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Product Quality Improvement; Reduction in Mine Planning Uncertainty; **Related Area of Vale:** Mining Planning.

Lista de Figuras

Figura 2.1	Ilustração do problema objeto de estudo	15
Figura 2.2	Imagem da mina de Capão Xavier	16
Figura 2.3	Imagem da Mina de Mar Azul	16
Figura 2.4	Exemplo de geometria do plano de Lavra da Mina de Capão Xavier.	18
Figura 2.5	Exemplo de rotas de minério e estéril possíveis para os caminhões.(Imagem Retirada do Google Earth - Coordenadas: Lat= -20.050535° , Lon= -43.976817°)	19
Figura 3.1	Processo de modelagem, adaptado de Arenales <i>et al.</i> (2007).	21
Figura 5.1	Ritmo de produção dos pontos de descarga de minério em relação aos ritmos de produção mínimo pl_b e máximo pu_b	36
Figura 5.2	Percentual dos parâmetros de Mn Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.	37
Figura 5.3	Percentual dos parâmetros de Mn Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.	37
Figura 5.4	Percentual dos parâmetros de Pf com granulometria acima de 8 mm dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.	38
Figura 5.5	Percentual dos parâmetros de Pf com granulometria acima de 8 mm dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.	38
Figura 5.6	Percentual dos parâmetros de Fe Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.	39
Figura 5.7	Percentual dos parâmetros de Fe Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.	39
Figura 5.8	Percentual dos parâmetros de Al Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.	40
Figura 5.9	Percentual dos parâmetros de Al Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.	40
Figura 5.10	Percentual dos parâmetros de P Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.	41
Figura 5.11	Percentual dos parâmetros de P Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.	41

Lista de Tabelas

Tabela 5.1	Distribuição dos parâmetros de controle globais nas frentes de lavra.	32
Tabela 5.2	Distribuição dos parâmetros de controle na fração granulométrica +8mm nas frentes de lavra.	33
Tabela 5.3	Pesos das componentes da função objetivo.	34
Tabela 5.4	Parâmetros normalizados.	34
Tabela 5.5	Pesos dos parâmetros de controle.	34
Tabela 5.6	Resultados da REM e números de caminhões.	35
Tabela 5.7	Resultados do Cenário 1.	36
Tabela 5.8	Resultados do Cenário 2.	36

Lista de Siglas e Abreviaturas

CgMd Carga Média de Transporte dos Caminhões (em toneladas)

DMT Distância Média de Transporte (em km)

PDE Pilha de Deposição de Estéril

ProdCg Produtividade de Carga (em ton/h)

ProdTr Produtividade de Transporte (em ton/h)

REM Relação Estéril/Minério

TpBc Tempo de Basculamento (em minutos)

TpCg Tempo de Carregamento (em minutos)

TpCh Tempo de Deslocamento Cheio (em minutos)

TpCiclo Tempo de Ciclo (em minutos)

TpFl Tempo de Fila (em minutos)

TpMnb Tempo de Manobra (em minutos)

TpVz Tempo de Deslocamento Vazio (em minutos)

VelGl Velocidade Global (em km/h)

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Organização do Trabalho	13
2	Caracterização do Problema	15
3	Revisão de Literatura	21
3.1	Introdução	21
3.2	Problemas relacionados	22
4	Modelagem Matemática	26
5	Resultados e análises	32
5.1	Experimentos computacionais	32
5.1.1	Descrição da instância e dos parâmetros de avaliação	32
5.2	Cenários de teste	33
5.2.1	Análise do Uso de Caminhões e Relação Estéril/Minério	35
5.2.2	Análise do ritmo de produção obtido para os três pontos de descarga de minério	35
5.2.3	Análise dos parâmetros de especificação	36
6	Considerações finais	42
6.1	Conclusões	42
6.2	Trabalhos futuros	43
6.3	Publicações geradas	43
	Referências Bibliográficas	44

1. Introdução

Após o último ciclo de alta dos preços da *commodities* de minério de ferro ocorrida em 2011, empreendimentos mineiros que lavram minério de ferro passaram a ter que atender rígidos padrões de qualidade em função da grande oferta existente desse material no mercado mundial. Somente volume não é garantia de lucro e geração de caixa para as empresas. A perda no valor de venda por falta de qualidade, em alguns casos, reflete na redução do volume de produção.

Neste contexto, as minas que não atenderem aos requisitos de qualidade e volume deixarão de ser competitivas, com conseqüente aumento do custo operacional.

A busca por eficiência, produtividade e redução de custo são decisivos para a manutenção desses empreendimentos. Dessa forma, a melhoria contínua do processo produtivo deve ser sempre objeto de pesquisa.

Para que os parâmetros de qualidade e volume sejam atendidos, se faz necessário ter uma disciplina operacional onde o que determina o desenvolvimento da mina é a lavra de estéril, material sem valor comercial, e a capacidade de executar a blendagem de minérios de forma adequada para atendimento às metas de qualidade. Para que se tenha uma blendagem adequada é necessário considerar o desenvolvimento da mina, a produtividade das frentes que podem ser compactas ou friáveis, a disponibilidade de equipamentos de carga e transporte, a capacidade dos equipamentos de carga que possuem portes diferenciados e o Tempo de Ciclo (em minutos) (TpCiclo) dos caminhões nas frentes disponíveis. Todos esses indicadores devem ser considerados antes de realizar o planejamento operacional diário de lavra.

Esta dissertação tem como foco desenvolver um modelo de programação matemática para resolver o problema de planejamento de lavra diário, com vistas a minimizar os desvios da meta de produção e das metas estabelecidas para os parâmetros de qualidade do material produzido, assim como o número de caminhões necessários ao processo produtivo.

O Complexo minerador escolhido para o desenvolvimento deste modelo possui duas cavas em operação, Capão Xavier e Mar Azul, as quais fornecem minério para três pontos de descarga localizados em pontos distintos. O estéril das duas cavas são depositados em um único ponto de descarga, denominado Pilha de Deposição de Estéril (PDE).

1.1. Justificativa

O grande desafio no planejamento operacional de lavra é gerenciar quais devem ser as prioridades de alocação de recursos, equipamentos de carga e transporte diariamente, com o objetivo de dar sustentabilidade ao processo produtivo da lavra ao longo dos meses e anos, sem prejudicar os indicadores de qualidade e volume. Esse gerenciamento deve respeitar as capacidades dos equipamentos, produtividades, quantidade de caminhões e frentes disponíveis. Uma solução desse problema obtida de forma manual, como é o caso que ocorre em várias

empresas de mineração, pode não contemplar todas essas restrições e metas simultaneamente. Assim, faz-se necessário utilizar técnicas de otimização como apoio à tomada de decisão, como a aqui proposta.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma formulação de programação linear por metas para modelar o problema de planejamento operacional de lavra diário das minas de Capão Xavier e Mar Azul, pertencentes à Vale S.A.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Organizar uma revisão bibliográfica sobre técnicas de solução para problemas de planejamento de lavra em minas a céu aberto;
- Modelar o problema tendo por objetivo minimizar os desvios das metas de produção e qualidade, assim como o número de caminhões necessários à operação;
- Implementar o modelo no software LINGO;
- Testar o modelo desenvolvido;
- Determinar o número de caminhões necessários para atendimento do programa de produção com utilização máxima, visando à redução do número de equipamentos;
- Definir a alocação os equipamentos de carga nas frentes de lavra disponíveis e informar o número de viagens necessárias para atendimentos às metas;
- Dar suporte à equipe de planejamento em seu trabalho de executar o planejamento operacional de lavra diário;
- Contribuir para a divulgação do tema planejamento operacional na mineração.

1.3. Organização do Trabalho

Neste primeiro capítulo foram apresentados a introdução sobre o tema planejamento operacional de lavra, contextualização do problema e os objetivos a serem alcançados. O restante deste trabalho está estruturado como segue.

No Capítulo 2 são apresentadas e detalhadas as características do problema estudado e qual o impacto na atividade de mineração do complexo minerador em questão.

No Capítulo 3 é feita uma revisão de literatura de alguns trabalhos relacionadas ao presente tema, de forma a identificar as contribuições feitas pelos autores relacionadas ao tema de pesquisa operacional na mineração.

No Capítulo 4 é apresentada uma formulação de programação linear inteira mista por metas capaz de resolver o problema de planejamento operacional de lavra do complexo mine-rador objeto de estudo.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados computacionais alcançados com a implementação da formulação de programação desenvolvida.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas neste trabalho e sugere alguns possíveis trabalhos futuros.

2. Caracterização do Problema

Neste capítulo é apresentado o problema do planejamento operacional de lavra diário para uma indústria de minério de ferro. O complexo minerador foco do estudo apresenta duas minas de minério de ferro em operação, Capão Xavier e Mar Azul, com três pontos de descarga de minério e um ponto de descarga de estéril, sete equipamentos de carga e 45 caminhões de mesmo porte para transportar minério e estéril.

A Figura 2.1 ilustra algumas características do complexo minerador. Podemos observar, de forma simples, como ocorre a distribuição dos equipamentos nas minas com algumas frentes com características distintas. Fica evidente que a alocação dos caminhões não é estática e, sim, dinâmica. Cada mina apresenta diferentes tipos de materiais com características químicas e físicas diversificadas, as quais são divididas em frentes de lavra, que são locais para a alocação dos equipamentos de carga. Estas frentes são definidas a partir do plano de lavra mensal, trimestral e anual. Cada ponto de descarga de minério possui uma meta de produção e diferentes parâmetros de qualidade.

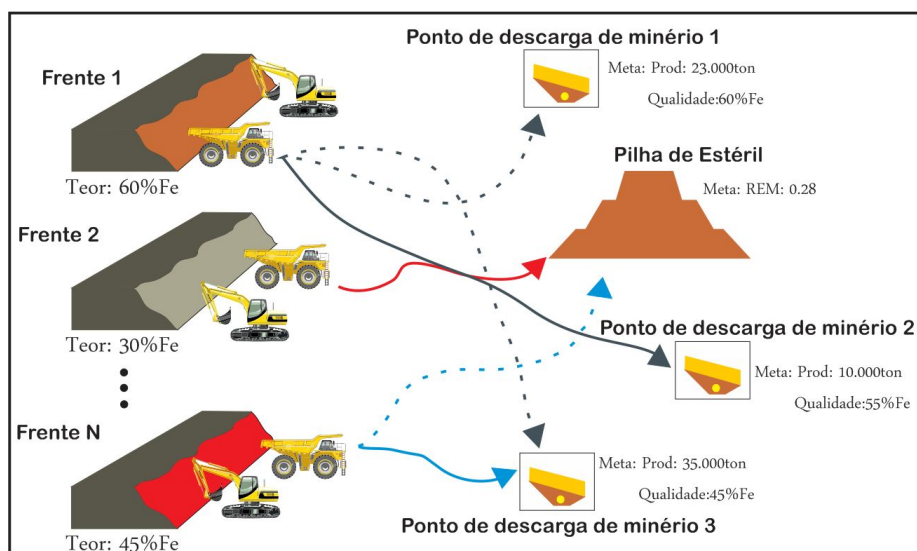


Figura 2.1: Ilustração do problema objeto de estudo

As características químicas são definidas pelo percentual dos elementos químicos presentes na mistura das frentes de lavra, como por exemplo o percentual de ferro (Fe), sílica (Si), fósforo (P), alumina (Al), manganês (Mn) e perda ao fogo (Pf). As características físicas são definidas pelo percentual de massa presente em um intervalo de tamanho de grãos.

A Mina de Capão Xavier, representada na Figura 2.2, está localizada no Estado de Minas Gerais, 5 km ao sul da capital Belo Horizonte. No ano de 2017, a mina foi responsável por aproximadamente 50% da produção de minério do Complexo Paraobeba. A maior parte da produção de minério é transportada pelas ferrovias até os portos localizados no Estado do Rio de Janeiro.

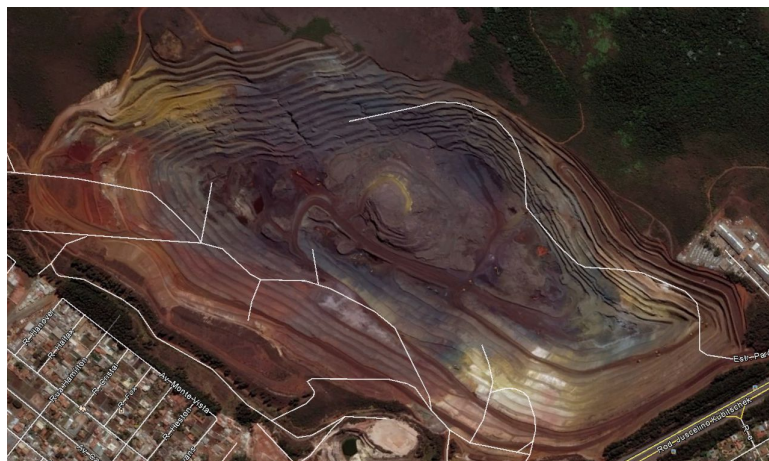


Figura 2.2: Imagem da mina de Capão Xavier

A Mina de Mar Azul está representada pela Figura 2.3 e, assim como Capão Xavier, também está localizada no Estado de Minas Gerais, 5 km ao sul da capital Belo Horizonte. No ano de 2017 a cava possuía uma produção próxima de 3% da produção de minério do Complexo Paraopeba. A cava é composta por litologias de Hematitas friáveis e compactas, Itabiritos friáveis e compactos, Argilas e Filitos. Atualmente possui somente um acesso a Norte da cava e possui um ponto de descarga de minério localizada a Nordeste.



Figura 2.3: Imagem da Mina de Mar Azul

Ao contrário da Mina de Mar Azul, tendo como referência a capital Belo Horizonte, Capão Xavier está localizada à esquerda da BR-040, enquanto as instalações de tratamento de minério e Mar Azul estão à direita. Esta condição reflete na distância média de transporte (DMT), e na forma de transpor a rodovia, que é feita por um viaduto que permite a passagem de somente um caminhão por vez.

O plano de lavra é elaborado pela equipe de planejamento de curto prazo para atender um programa de produção de trinta dias. O grande desafio é garantir que as metas de produção e qualidade sejam atendidas diariamente sem prejudicar o produto final que será destinado ao

cliente. Esta programação deve sempre levar em consideração a sequência e disponibilidade das frentes de lavra neste período.

A equipe de planejamento de curto prazo é composta pelas áreas de Engenharia, Geologia, Topografia e Controle de Qualidade. O plano de lavra mensal é elaborado a partir de um programa de produção mensal definido num plano anual de produção. Os indicadores de disponibilidade de carga, transporte, equipamentos de infra-estrutura e perfuratrizes são fornecidos pela área de Manutenção. As utilizações, produtividades e capacidade de desmonte são fornecidas pelo despacho de mina e a área de operação de lavra. Informações relativas ao modelo de blocos como massa, qualidade e compacidade das frentes de lavra são informadas pela equipe de Geologia.

Após a definição das premissas para elaboração do plano mensal, a equipe de engenharia apresenta a geometria mensal de lavra a partir de uma topografia base. Desta geometria são obtidas as massas de minério e estéril, além das qualidades químicas por área de lavra, a distância média de transporte, a Relação Estéril/Minério (REM) que é um importante indicador para o desenvolvimento de Mina e garantia da disponibilização do minério futuro e o volume de material compacto que necessita de desmonte. Após validação, o plano de lavra é entregue à equipe de topografia para identificação no campo, trabalho que é feito com marcação de estacas. A equipe de controle de qualidade operacionaliza semanalmente e diariamente juntamente com a operação de lavra.

Durante a execução do plano mensal, a equipe de controle de qualidade elabora diariamente programações de lavra com uma proposta de mistura de minério. Para esta programação são consideradas as massas diárias, a qualidade dos parâmetros de especificação químicos e granulométricos da mistura do blend e o número de máquinas de carga disponíveis. Semanalmente, a equipe de topografia tem o papel de realizar medições topográficas e orientar a área operacional com marcações topográficas.

Ao final do mês são feitas as medições topográficas de fechamento do plano para o cálculo dos indicadores de aderência, que é a comparação geométrica do programado com o realizado em relação ao plano mensal e o cálculo de reconciliação, que é o comparativo de massa e qualidade do programado do plano mensal com o realizado e analisado nos pontos de descarga de minério.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo de superfície topográfica de um plano de lavra da Mina de Capão Xavier. Nessa figura, as linhas na cor azul delimitam a geometria do plano mensal que deve ser identificado em campo. Os pontos destacados na cor azul representam a localização dos poços de captação de água para rebaixamento do lençol freático e fornecimento de água para a cidade de Belo Horizonte.

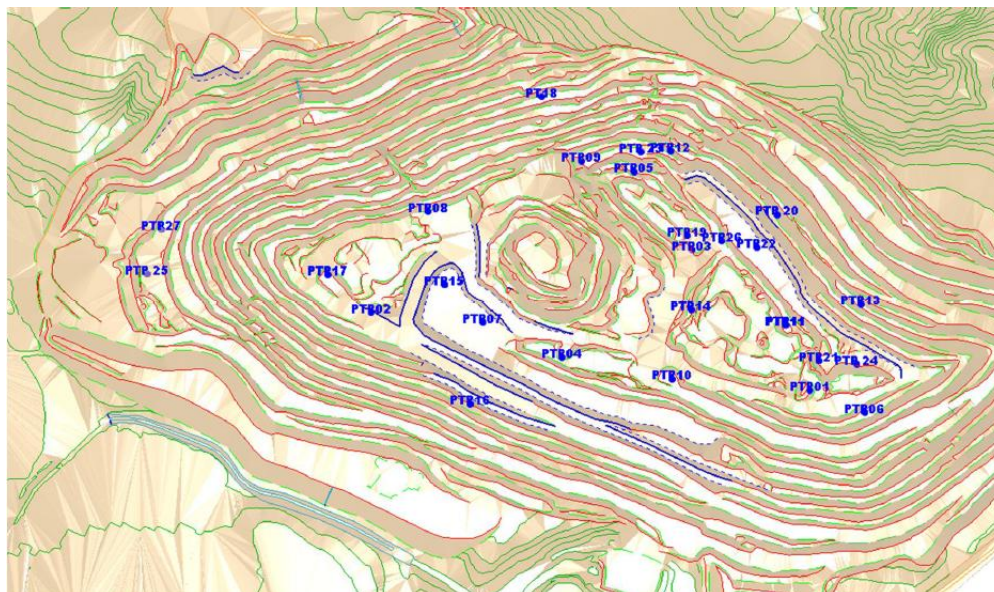


Figura 2.4: Exemplo de geometria do plano de Lavra da Mina de Capão Xavier.

Outro ponto que deve ser considerado é que diariamente a disponibilidade de equipamentos de carga e transporte pode não ser a mesma, equipamentos em manutenção, falta de operadores e diversos outros fatores impactam na capacidade de carga e transporte.

Os indicadores de desempenho operacionais das minas são armazenados em um sistema de despacho, com registro de eventos e movimentações para cálculos das produtividades e utilizações.

A produtividade dos equipamentos de carga e transporte pode variar de acordo com as frentes disponíveis e os seus respectivos tempos de ciclo. Cada frente de lavra possui um Tempo de Carregamento (em minutos) (T_{pCg}), Tempo de Manobra (em minutos) (T_{pMnb}) e uma Carga Média de Transporte dos Caminhões (em toneladas) (C_{gMd}) que resulta em um valor de Produtividade de Carga (em ton/h) ($ProdCg$). Para o transporte, tem-se a Velocidade Global (em km/h) ($VelGl$), a Distância Média de Transporte (em km) (DMT) e a Carga Média de Transporte dos Caminhões (em toneladas) (C_{gMd}) que são algumas variáveis que interferem na Produtividade de Transporte (em ton/h) ($ProdTr$) do mesmo.

Durante a execução do plano de lavra mensal, são armazenados dados de equipamentos, como por exemplo: Tempo de Carregamento (em minutos) (T_{pCg}), Tempo de Basculamento (em minutos) (T_{pBc}), Tempo de Fila (em minutos) (T_{pFl}), Tempo de Deslocamento Cheio (em minutos) (T_{pCh}), Tempo de Deslocamento Vazio (em minutos) (T_{pVz}), Distância Média de Transporte (em km) (DMT) cheio e vazio em função do trecho, massas transportadas por tipo, pontos de carga e descarga com localização geográfica, GPS, entre outras atividades operacionais.

Ao final do mês esses dados são utilizados para medir a eficiência operacional em função da massa movimentada de estéril e minério. É possível também tratar os dados para serem utilizados nas programações diárias de lavra elaboradas pela equipe de controle de qualidade

através da modelagem matemática.

A Figura 2.5 ilustra as possíveis rotas para transporte de minério e estéril aos três pontos de descarga de minério e ao ponto de descarga de estéril existentes no complexo minerador e que fazem parte da modelagem do problema de planejamento operacional de lavra diária.



Figura 2.5: Exemplo de rotas de minério e estéril possíveis para os caminhões. (Imagem Retirada do Google Earth - Coordenadas: Lat= -20.050535° , Lon= -43.976817°)

Para o problema tratado, os destinos são: as usinas de beneficiamento e a pilha de estéril. Tal fato exige que o executor da programação diária de lavra conheça a produtividade e capacidade necessária para atender a produção, além de avaliar se a REM pode ser alcançada. De forma geral o executor hoje elabora uma programação diária de lavra somente informando quais frentes devem ser lavradas com base na disponibilidade das mesmas e indicando qual massa total que deve ser extraída, sem realizar uma avaliação prévia de que esta programação irá de fato respeitar as metas de produção, parâmetros de especificação de qualidade, REM, capacidade

de transporte e produtividade dos equipamentos de carga, além de não informar o número de viagens que cada frente deve realizar para compor a mistura.

A dinâmica do processo produtivo de uma mina, aliada à ausência de uma ferramenta ágil capaz de auxiliar o executor nas decisões, faz com que ações diárias sejam tomadas de forma imediata sem avaliar os impactos em períodos maiores, por exemplo, o não cumprimento da REM. Para o empreendimento mineiro, este parâmetro é um dos principais indicadores de mina e tem como função garantir o desenvolvimento da mina e liberação de novas frentes de minério, a confecção de acessos e obras de infraestrutura. Os impactos dessas decisões tomadas diariamente podem refletir no plano mensal e, como consequência, o não atendimento às metas de produção, dos parâmetros de especificação e de qualidade, transtornos são inevitáveis ao cliente. Dessa forma, o problema de planejamento operacional de lavra diária é real e existe uma necessidade de desenvolvimento de um modelo capaz de propor uma programação diária que considere os diversos indicadores apresentados e quando não for possível atingir com exatidão informar quais são estes desvios, limites positivos ou negativos.

3. Revisão de Literatura

Neste capítulo é feita a revisão de trabalhos relacionados ao problema em estudo, assim como apresentados conceitos utilizados para a sua resolução.

3.1. Introdução

De acordo com Arenales *et al.* (2007), Pesquisa Operacional é a aplicação de métodos científicos a problemas complexos para auxiliar no processo de tomada de decisões em áreas como o planejamento, programação e operação que requerem alocações eficientes com recursos escassos. Se ciência é a observação de fenômenos naturais, sociais, econômicos, entre outros, a matemática tem papel essencial na descrição desses fenômenos. A partir da observação desses fenômenos buscam-se leis que os regem. Se estas leis são passíveis de serem descritas por relações matemáticas, dão origem aos modelos matemáticos. O termo modelo é a utilização de um objeto abstrato capaz de reunir as principais características de um objeto, processo ou cenário real.

A Figura 3.1 ilustra o processo simplificado de uma modelagem.

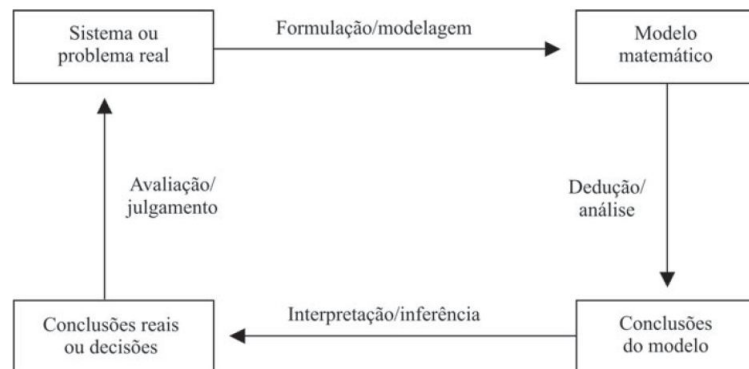


Figura 3.1: Processo de modelagem, adaptado de Arenales *et al.* (2007).

A primeira etapa define qual é o problema real, em seguida é definida a modelagem do problema e logo após são utilizados algoritmos para resolver o modelo desenvolvido. Para a etapa final as soluções do modelo são verificadas a fim de avaliar se estas representam o problema real adequadamente, quanto mais detalhado o modelo, mais adequada será a solução.

Os modelos matemáticos podem ser utilizados para solucionar problemas de mistura, transporte, planejamento de produção, programação de atividades (projetos), fluxo de caixa, meio ambiente, entre outros mais. São assumidas que as informações relevantes são conhecidas, sem incertezas, considerados modelos determinísticos.

A otimização é uma ferramenta que faz parte da pesquisa operacional, que tem como objetivo apoiar a tomada de decisão de projetistas e operadores de processos e sistemas na avaliação de cenários de forma mais ágil e que possam ser mais eficientes se comparada à

avaliação humana e utiliza como base a abordagem científica. Ao considerar seus objetivos e restrições de projeto, a execução da otimização busca qual deve ser a melhor combinação de valores para as variáveis do problema (solução ótima) com agilidade e eficiência (ARENALES *et al.*, 2015).

Na otimização, quando existe somente um objetivo a ser maximizado ou minimizado definido no problema, ele é chamado de otimização mono-objetivo. Desta forma, temos bem definido qual é a solução ótima esperada. A solução s^* é considerada ótima quando não existe outro resultado possível com função custo melhor que a encontrada em s^* .

Na formulação a seguir, extraída de Luenberger e Ye (2008), é apresentado um exemplo de problema de otimização mono-objetivo de minimização.

$$\min f(x) \tag{3.1}$$

Sujeito a :

$$g_i(x) \leq 0; \quad \forall i = 1, \dots, p \tag{3.2}$$

$$h_j(x) = 0; \quad \forall j = 1, \dots, q \tag{3.3}$$

$$x \in R^n \tag{3.4}$$

Nesta formulação, x é um vetor n -dimensional de incógnitas, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Tem-se que f , g_i (com $i=1, 2, \dots, p$) e h_j (com $j=1, 2, \dots, q$) são funções de valores reais das variáveis x_1, x_2, \dots, x_n . O problema possui um total de p funções do tipo g_i e um total de q funções do tipo h_j . A função objetivo do problema é representada por f e as inequações e equações são as restrições do problema.

3.2. Problemas relacionados

Para atender ao objetivo de assegurar uniformidade da alimentação no fornecimento de minério para o processo, é necessário misturar minérios de diferentes frentes de lavra ou de minas que possuem qualidades distintas, a ausência de uniformidade são usualmente acompanhadas de aumento do custo total da operação (ALARIE e GAMACHE, 2002). Chanda e Dagdelen (1995) apresentaram um modelo de programação linear por metas para resolver um problema de mistura de minérios no planejamento de curto prazo em uma mina de carvão. O objetivo foi maximizar um critério econômico e reduzir a soma dos desvios dos parâmetros individuais de qualidade e da tonelagem em relação aos valores desejados.

De acordo com Alarie e Gamache (2002), a operação de transporte de materiais é uma das principais atividades de mina devido ao seu elevado custo associado. Segundo Maran e Topuz (1988), é exigido um grande volume de capital e recursos para executar o transporte de carga nas minas. Assim, minimizar o custo do transporte de material da mina para a usina é

essencial, isto por que de acordo com Gershon (1982) o custo está relacionado à escolha do ponto de extração.

A vantagem da alocação dinâmica de caminhões é que com este método há uma maior produtividade da frota. Este aumento de produtividade pode contribuir para o aumento de produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter o mesmo nível de produção. Um algoritmo eficiente para a alocação dinâmica de caminhões é importante porque ele integra um sistema de despacho computadorizado. Um sistema de despacho reúne, ainda, um algoritmo de sequenciamento de viagens, um sistema de comunicação entre os equipamentos de carga e caminhões, além de uma central de comandos. Segundo White e Olson (1986), para que o sistema de despacho de caminhões seja completo é importante que o sistema de monitoramento dos equipamentos seja preciso e confiável, de modo que as operações da mina possam ser otimizadas em tempo real.

Ezawa e Silva (1995) desenvolveram um sistema de alocação dinâmica de caminhões às frentes de lavra com o objetivo de reduzir a variabilidade dos teores do minério e aumentar a produtividade do sistema de transporte. O sistema utilizava uma heurística para sequenciar os caminhões de forma a minimizar a variação dos teores. Para validar o modelo, os autores utilizaram simulação e para o modelamento matemático da mina, a teoria dos grafos. Com a implantação do sistema, foi obtido um aumento de 8% na produtividade do sistema de transporte e o gerenciamento passou a ter em mãos dados mais precisos e em tempo real.

Alvarenga (1997) desenvolveu um programa para o despacho ótimo de caminhões em uma mineração de ferro, a céu aberto, com o objetivo de minimizar o tempo de fila da frota de caminhões, aumentar a produtividade desta e melhorar a qualidade do minério lavrado. No trabalho desenvolvido, que é base do sistema SMART MINE, atualmente muito utilizado em várias minas brasileiras, foi aplicada uma técnica estocástica de otimização, o algoritmo genético com processamento paralelo. Basicamente, o problema consiste em indicar qual o ponto de basculamento ou carregamento ideal e a trajetória para o deslocamento, no momento em que há uma situação de escolha a ser realizada. O autor apontou ganhos de 5% a 15% de produtividade, comprovando a validade da proposta.

O sistema, denominado OTISIMIN (Otimizador e Simulador para Mineração), foi desenvolvido por Merschmann (2002) para realizar análise de cenário de produção em minas a céu aberto. Foram desenvolvidos dois módulos, o primeiro é um módulo de programação linear para otimizar a mistura de minérios para atender as especificações de qualidade, indicando as massas e locais que os equipamentos de carga devem ser alocados. O segundo módulo é utilizado para simular e validar a solução proposta pela otimização do primeiro módulo. Os modelos de otimização de Merschmann (2002) foram aperfeiçoados por Costa *et al.* (2004) e Costa *et al.* (2005). O aperfeiçoamento principal consistiu em incluir o atendimento às metas de produção e qualidade, por meio da minimização dos desvios de atendimento às restrições de meta. Posteriormente, o modelo de Costa *et al.* (2004) foi aperfeiçoado por Araújo e Souza (2011), com a inclusão de novas restrições com o objetivo de garantir o cumprimento das taxas

máximas de utilização dos caminhões envolvidos no processo produtivo.

O estudo de Costa (2005) resolveu problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto utilizando duas metodologias, uma baseada em programação matemática e outra em técnicas heurísticas. Foram apresentados e modelados problemas relativos à mistura de minérios provenientes de várias frentes de lavra, levando-se em consideração metas de produção, de qualidade, restrições operacionais, alocação dos equipamentos de carga e transporte necessários ao processo, com alocação dinâmica e estática de caminhões. Dada a NP-completude desses problemas, foi utilizada a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS). Para explorar o espaço de soluções, o autor utilizou seis tipos diferentes de movimentos. Pelos experimentos realizados, o modelo heurístico foi capaz de gerar soluções de melhor qualidade em um menor tempo de processamento que aquelas obtidas pelo modelo exato.

Guimarães *et al.* (2007) apresentaram um modelo de programação linear por metas e alocação dinâmica que acrescentava ao modelo de Costa *et al.* (2004) restrições que visavam ao cumprimento de taxas máximas de utilização por parte dos caminhões envolvidos no processo produtivo. Ainda, a formulação proposta considerava um terceiro objetivo, a minimização do número de veículos. Para validar os resultados, foi utilizado um modelo de simulação computacional.

Pantuza Jr. e Souza (2010b) apresentaram uma nova formulação para o problema de planejamento de lavra. Ela difere dos trabalhos anteriores por prever o método de lavra seletiva. Este método considera que cada frente pode ser constituída por minério, estéril ou por ambos. Dessa forma, também é necessário prever o sequenciamento da produção para cada frente de lavra para garantir que um bloco só será explotado se o bloco acima já foi lavrado.

Em Souza *et al.* (2010) os autores trataram um problema com as mesmas características deste trabalho, mas considerando apenas um único ponto de carga e descarga. Foram propostas uma formulação de programação matemática e um algoritmo heurístico baseado na metaheurística *General Variable Neighborhood Search*.

De acordo com Rodrigues e Pinto (2012) a alocação estática é o método mais utilizado nas minerações de pequeno e médio porte por não apresentar a obrigatoriedade de utilização de um sistema automático de alocação. Esse método, entretanto, proporciona menor produtividade em função da possibilidade de formação de filas de caminhões e a ociosidade dos equipamentos de carga. Os autores fazem uma análise comparativa de várias metodologias utilizadas para o despacho de caminhões em minas a céu aberto. As metodologias testadas, baseadas em Programação Linear, Programação Dinâmica e em Heurísticas, são aquelas consideradas as bases de algoritmos utilizados em sistemas de despacho comercializados no Brasil. As soluções finais geradas por essas metodologias foram simuladas usando-se o ambiente ARENA, com o objetivo de reproduzir o comportamento das operações de lavra. Os resultados obtidos mostraram o desempenho dos algoritmos utilizando as metodologias sob diferentes condições em minas a céu aberto. Os autores, porém, afirmam que não se pode, através dos resultados obtidos, concluir pela superioridade de uma delas.

Martins (2013) tratou um problema de planejamento de lavra de uma mina de ferro em que há a produção de diferentes tipos de frentes de minério, dois pontos de descarga de minério com características químicas distintas e um ponto de descarga de estéril. O autor apresentou dois modelos que se interagem. O primeiro é uma formulação de programação inteira mista que apresenta um resultado para ser validado pelo segundo modelo, o de simulação. A cada nova iteração do modelo de simulação, um novo cenário é utilizado no otimizador. São restrições do modelo matemático, a compatibilidade entre carga e transporte, massa mínima a ser lavrada e qualidade do material a ser extraído pelos diferentes portes de caminhões. As saídas são informações referentes à alocação dos equipamentos de carga e transporte e quantidade de massa a ser retirada por cada frente de lavra. Nesse modelo o autor considera um tempo médio de ciclo dos caminhões.

Silva *et al.* (2014) desenvolveram um algoritmo heurístico, denominado GLAHC, baseado na combinação das metaheurísticas GRASP e *Late Acceptance Hill-Climbing* para tratar o problema real de planejamento operacional de lavra de uma mineradora. O trabalho difere de outros da literatura ao considerar a possibilidade de extrair mais de um tipo de material de uma mesma frente de lavra. As frentes são divididas em blocos, e esses, por sua vez, em sub-blocos contendo um único tipo de material. Existem dependências entre os sub-blocos, restringindo a sequência de lavra na mina. O GLAHC explora o espaço das soluções do problema por meio de nove movimentos diferentes. Esses movimentos consideram os resultados anteriores para definir a próxima iteração.

Todos os trabalhos citados anteriormente adotaram uma abordagem mono-objetivo. Uma vez que os objetivos do problema são conflitantes entre si, Pantuza Jr. *et al.* (2009), Pantuza Jr. e Souza (2010c) e Pantuza Jr. e Souza (2010a) adotaram uma abordagem multiobjetivo. Pantuza Jr. *et al.* (2009) propuseram uma nova formulação multiobjetivo, adotando o método ϵ -restrito para obtenção de uma aproximação do conjunto Pareto-ótimo. Pantuza Jr. e Souza (2010c) adaptaram o algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II (DEB *et al.*, 2002). Pantuza Jr. e Souza (2010a) propuseram um Algoritmo Genético Híbrido Multiobjetivo – AGHM, que combina um algoritmo genético com um método de busca local, ambos baseados na relação de dominância de Pareto.

O modelo aqui apresentado difere dos trabalhos citados anteriormente por tratar de duas minas distintas com três pontos de descarga de minério e um ponto para descarga de estéril, o que torna a modelagem mais complexa. A solução adequada deste problema proporciona ganhos na efetividade de lavra, com o cumprimento e minimização dos desvios de produção em relação às metas para cada ponto de descarga de minério, bem como a minimização dos desvios em relação às metas dos parâmetros de qualidade do minério e redução do número de caminhões necessários ao processo produtivo. São considerados em sua construção, dados reais extraídos do sistema de despacho de um complexo minerador, de forma que são mantidas as características das minas.

4. Modelagem Matemática

Nesta seção é apresentado um modelo de programação linear inteira mista por metas para solucionar o problema de programação diária de lavra para o planejamento de lavra de curto prazo das minas de Capão Xavier e Mar Azul. O modelo considera a existência de três pontos de descarga de minério e um ponto de descarga de estéril. Ele considera, ainda, que o tempo de ciclo dos caminhões depende da origem onde o material foi carregado e o destino para o qual ele será descarregado, distância entre cada frente e o ponto de descarga. Além disso, faz-se diferenciação das capacidades de carga para minério e estéril e considera-se a alocação dinâmica dos caminhões.

Para a apresentação do modelo, segue os seguintes dados 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 dos parâmetros de qualidade analisados no minério;
C	: Conjunto de equipamentos de carga;
V	: Conjunto de equipamentos de transporte;
B	: Conjunto dos pontos de descarga de minério;
$pest$: Ponto de descarga de estéril;
$inicio$: Nó origem;
fim	: Nó destino;
D	: Conjunto formado pelo $B \cup pest$;
N	: Conjunto de nós formado pelo conjunto $F \cup B \cup pest \cup inicio \cup fim$;
pr_b	: Ritmo de produção recomendado para o britador b (ton/h);
pl_b	: Ritmo de produção mínimo para o britador b (ton/h);
pu_b	: Ritmo de produção máximo para o britador b (ton/h);
α^-	: Penalidade por desvio negativo de produção;
α^+	: Penalidade por desvio positivo de produção;
β_{jb}^-	: Penalidade por desvio negativo de meta do parâmetro j na mistura do britador b ;
β_{jb}^+	: Penalidade por desvio positivo de meta do parâmetro j na mistura do britador b ;
δ_{jb}^-	: Penalidade por desvio negativo de especificação do parâmetro j na mistura do britador b ;
δ_{jb}^+	: Penalidade por desvio positivo de especificação do parâmetro j na mistura do britador b ;
ω_l	: Penalidade pelo uso do caminhão l ;
t_{ij}	: Teor do parâmetro j (%) na frente i (%);
tr_{jb}	: Teor recomendado para o parâmetro j (%) no britador b (%);
tl_{jb}	: Teor mínimo admissível para o parâmetro j (%) no britador b (%);
tu_{jb}	: Teor máximo admissível para o parâmetro j (%) no britador b (%);
qu_i	: Ritmo de lavra máximo na frente i (ton/h);

- rem : Relação estéril/minério mínima requerida;
 clm_k : Produção mínima de minério do equipamento de carga k (ton/h);
 cum_k : Produção máxima de minério do equipamento de carga k (ton/h);
 cle_k : Produção mínima de estéril do equipamento de carga k (ton/h);
 cue_k : Produção máxima de estéril do equipamento de carga k (ton/h);
 tx : Taxa de utilização máxima dos caminhões;
 hp : Horizonte de planejamento (min);
 $capm_l$: Capacidade do caminhão l ao transportar minério (ton);
 $cape_l$: Capacidade do caminhão l ao transportar estéril (ton);
 $tv_{(l,o,d)}$: Tempo de viagem do caminhão l do nó de origem o até o nó de destino d somado ao tempo de carga e descarga (min);
 $tcMin_l$: Tempo de ciclo do caminhão l para frentes de minério (min);
 $tcEst_l$: Tempo de ciclo do caminhão l para frentes de estéril (min);
 $comp_{kl}$: $\begin{cases} 1 & \text{Se a escavadeira } k \text{ é compatível com o caminhão } l; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
 $disp_k$: $\begin{cases} 1 & \text{Se a escavadeira } k \text{ está disponível;} \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$

Definamos as seguintes variáveis de decisão para o problema de planejamento operacional de lavra diário:

- x_{ib} : Ritmo de lavra da frente i no britador b (ton/h);
 tc_l : Tempo de ciclo total do caminhão l (min);
 y_{ik} : $\begin{cases} 1 & \text{Se a escavadeira } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
 dm_{jb}^+ : Desvio positivo de meta do parâmetro j no britador b (ton/h);
 dm_{jb}^- : Desvio negativo de meta do parâmetro j no britador b (ton/h);
 de_{jb}^- : Desvio negativo de especificação do parâmetro j no britador b (ton/h);
 de_{jb}^+ : Desvio positivo de especificação do parâmetro j no britador b (ton/h);
 dp_b^- : Desvio negativo de meta do ritmo de produção no britador b (ton/h);
 dp_b^+ : Desvio positivo de meta do ritmo de produção no britador b (ton/h);
 u_l : $\begin{cases} 1 & \text{Se o caminhão } l \text{ for utilizado;} \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
 $z_{(l,o,d)}$: Número de vezes que o caminhão l percorre o arco (o,d) , com $o, d \in N$;
 n_{il} : Número de viagens do caminhão l até a frente i .

O modelo de programação matemática, apresentado pelas Equações (4.1) a (4.41), representa o problema em estudo.

1. Função Objetivo:

A Equação (4.1) representa a função objetivo, em que se deseja minimizar os desvios de produção e parâmetros de especificação em relação aos valores requeridos, bem como o número de veículos utilizados.

$$\min \sum_{b \in B} (\alpha^- dp_b^- + \alpha^+ dp_b^+) + \sum_{b \in B} \sum_{j \in Q} (\beta_{jb}^- dm_{jb}^- + \beta_{jb}^+ dm_{jb}^+) + \sum_{b \in B} \sum_{j \in Q} (\delta_{jb}^- de_{jb}^- + \delta_{jb}^+ de_{jb}^+) + \sum_{l \in V} \omega_l u_l \quad (4.1)$$

2. Restrições de Qualidade:

As restrições (4.2) e (4.3) avaliam, para os pontos de descarga de minério, a possibilidade de extrapolar os limites máximos e mínimos para os parâmetros de controle. As restrições (4.4) visam alcançar a meta de teor dos parâmetros de controle para os pontos de descarga de minério.

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_{jb})x_{ib} - de_{jb}^+ \leq 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_{jb})x_{ib} + de_{jb}^- \geq 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_{jb})x_{ib} + dm_{jb}^- - dm_{jb}^+ = 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (4.4)$$

3. Restrições de Produção:

Para que o ritmo de lavra não seja maior que o limite superior de produção para os pontos de descarga de minério temos as restrições (4.5). As restrições (4.6) impedem que o ritmo de lavra seja menor que o limite mínimo de produção para os pontos de descarga de minério. O atendimento das metas de ritmo de produção para os pontos de descarga de minério são determinado pelas restrições (4.7). Para assegurar que não seja solicitado mais minério que o disponível pelas frentes é utilizado o conjunto de restrições (4.8). As restrições (4.9) asseguram o atendimento mínimo a relação estéril/minério. As restrições (4.10) e (4.11) asseguram que o ritmo de lavra em cada frente de minério e de estéril, respectivamente, é dado pela soma do número de viagens àquela frente feita por todos os caminhões vezes sua respectiva capacidade. As restrições (4.12) e (4.13) garantem que o número de viagens de cada caminhão a cada frente de minério e de estéril seja igual ao número de visitas aos pontos de descarga de minério (4.12) e de estéril (4.13).

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pu_b \leq 0 \quad \forall b \in B \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pl_b \geq 0 \quad \forall b \in B \quad (4.6)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pr_b + dp_b^- - dp_b^+ = 0 \quad \forall b \in B \quad (4.7)$$

$$x_{ib} - qu_i \leq 0 \quad \forall i \in F, b \in B \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in E} x_{i,pest} - rem \sum_{b \in B} \sum_{i \in M} x_{ib} \geq 0 \quad (4.9)$$

$$\sum_{j \in B} x_{ij} - \sum_{l \in V} z_{(l,i,b)} capm_l = 0 \quad \forall i \in M, b \in B \quad (4.10)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{l \in V} z_{(l,i,pest)} cape_l = 0 \quad \forall i \in E \quad (4.11)$$

$$n_{il} - z_{(l,i,b)} = 0 \quad \forall i \in M, l \in V \quad (4.12)$$

$$n_{il} - z_{(l,i,pest)} = 0 \quad \forall i \in E, l \in V \quad (4.13)$$

4. Restrições de Alocação:

As restrições (4.15) e (4.14) garantem, respectivamente, que cada equipamento de carga opere somente em uma única frente e que cada frente de lavra só possua um único equipamento de carga. Para que a extração de minério ou estéril não seja maior que a capacidade máxima do equipamento de carga em operação, temos as restrições (4.16) para minério e (4.17) para estéril. Para garantir que os equipamentos de carga não fiquem ociosos, extraindo massa abaixo da quantidade mínima, foram utilizadas as restrições (4.18) e (4.19) para minério e estéril, respectivamente. Para assegurar que não serão alocadas viagens às carregadeiras k que estejam indisponíveis temos as restrições (4.20).

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in C \quad (4.15)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ib} - \sum_{k \in C} cum_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in M \quad (4.16)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{k \in C} cue_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in E \quad (4.17)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ib} - \sum_{k \in C} clm_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in M \quad (4.18)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{k \in C} cle_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in E \quad (4.19)$$

$$y_{ik} = 0 \quad \forall i \in F, k \in C \mid disp_k = 0 \quad (4.20)$$

5. Restrições de Transporte:

As restrições (4.21) e (4.22) definem que o caminhão obrigatoriamente deve realizar todas as viagens para ele alocadas primeiramente a um conjunto de frentes (somente minério ou somente estéril) e, depois, ao outro (estéril ou minério).

$$z_{(l,b,f)} \leq 1 \quad \forall l \in V, f \in M, b \in B \quad (4.21)$$

$$z_{(l,pest,e)} \leq 1 \quad \forall l \in V, e \in E \quad (4.22)$$

6. Restrições de Compatibilidade, Utilização e Quantidade de Caminhões:

Para as restrições (4.23), (4.24) e (4.25) foi considerado um horizonte de planejamento de uma hora, isto é, $hp=60$. As restrições (4.23) asseguram que somente caminhões compatíveis sejam carregados pelos equipamentos de carga. As restrições (4.24) determinam a taxa máxima de utilização de cada caminhão l para cada hora, hp . As restrições (4.25) retornam um valor unitário para a variável u_l sempre que um caminhão for utilizado.

$$tc_l - hp \sum_{k \in C, comp_{lk}=1} y_{ik} \leq 0 \quad \forall l \in V, i \in F \quad (4.23)$$

$$\frac{tc_l}{hp} \leq tx \quad \forall l \in V \quad (4.24)$$

$$\frac{tc_l}{hp} \leq u_l \quad \forall l \in V \quad (4.25)$$

O tempo de ciclo total do caminhão l para todas as viagens a ele alocadas (tc_l), em minutos, é calculado pela Eq. (4.26):

$$tc_l = tcMin_l + tcEst_l \quad \forall l \in V \quad (4.26)$$

sendo $tcMin_l$ e $tcEst_l$ calculados por:

$$tcMin_l = \sum_{b \in B} \sum_{f \in M} (z_{(l, inicio, f)} tV_{(l, inicio, f)} + z_{(l, b, f)} tV_{(l, b, f)} + z_{(l, f, b)} tV_{(l, inicio, f)} + z_{(l, pest, f)} tV_{(l, pest, f)}) \quad (4.27)$$

$$tcEst_l = \sum_{b \in B} \sum_{e \in E} (z_{(l, inicio, e)} tV_{(l, inicio, e)} + z_{(l, pest, e)} tV_{(l, pest, e)} + z_{(l, e, pest)} tV_{(l, e, pest)} + z_{(l, b, e)} tV_{(l, b, e)}) \quad (4.28)$$

7. Restrições de Fluxo de Materiais:

As restrições (4.29) asseguram que o fluxo de saída do nó origem (*inicio*) para a frente de minério seja igual ao fluxo para os pontos de descarga. As restrições (4.30) garantem que o fluxo a partir do nó origem (*inicio*) para a frente de estéril deve ser igual ao fluxo

das frentes de estéril até a pilha de estéril. As restrições (4.31) determinam que o fluxo dos pontos de descarga de minério para o nó destino (*fim*) deve ser igual ao somatório do fluxo das frentes de minério para os pontos de descarga de minério. Enquanto as restrições (4.32) garantem que o fluxo da pilha de estéril para o nó destino (*fim*) deve ser igual a soma das frentes de estéril para a pilha de estéril.

$$z_{(l, inicio, f)} - \sum_{b \in B} z_{(l, f, b)} = 0 \quad \forall l \in V, f \in M \quad (4.29)$$

$$z_{(l, inicio, e)} - z_{(l, e, pest)} = 0 \quad \forall l \in V, e \in E \quad (4.30)$$

$$z_{(l, b, fim)} - \sum_{f \in M} z_{(l, f, b)} = 0 \quad \forall l \in V, b \in B \quad (4.31)$$

$$z_{(l, pest, fim)} - \sum_{e \in E} z_{(l, e, pest)} = 0 \quad \forall l \in V \quad (4.32)$$

8. Restrições de Domínios das Variáveis de Decisão:

As restrições (4.33) e (4.34) estabelecem o domínio das variáveis de decisão relacionadas à utilização dos caminhões e alocação dos equipamentos de carga, respectivamente. Os demais domínios são definidos pelas restrições (4.35), (4.36), (4.37), (4.38), (4.39), (4.40) e (4.41).

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in V \quad (4.33)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad (4.34)$$

$$n_{il} \in Z^+ \quad \forall i \in F, l \in V \quad (4.35)$$

$$z_{(l, o, d)} \in Z^+ \quad \forall l \in V, o \in N, d \in N \quad (4.36)$$

$$x_{ib} \geq 0 \quad \forall i \in F, b \in B \quad (4.37)$$

$$x_{ipest} \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (4.38)$$

$$dm_{jb}^+, dm_{jb}^-, de_{jb}^+, de_{jb}^- \geq 0 \quad \forall j \in Q, d \in B \quad (4.39)$$

$$dp^+, dp^- \geq 0 \quad \forall b \in B \quad (4.40)$$

$$tc_l \geq 0 \quad \forall l \in V \quad (4.41)$$

5. Resultados e análises

5.1. Experimentos computacionais

O modelo apresentado na Seção 4 foi implementado no resolvidor LINGO, versão 10.0, da Lindo Systems Inc. (<http://www.lindo.com>), interfaceando com uma planilha eletrônica do Microsoft Excel. O computador utilizado nos experimentos computacionais foi um notebook Dell XPS, com processador Intel Core I5, clock de 2,5 GHz, 6 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 de 64 bits.

5.1.1. Descrição da instância e dos parâmetros de avaliação

A instância utilizada nos experimentos foi extraída de uma condição real de lavra das minas Capão Xavier e Mar Azul da Vale S.A. Nessa instância há treze parâmetros de controle, entre qualidade e granulometria. A Tabela 5.1 mostra a distribuição dos parâmetros de controle dos elementos químicos globais. Na primeira coluna são mostradas as 15 frentes de lavra disponíveis para lavra, enquanto nas colunas seguintes são mostrados os percentuais globais de Ferro (*Fe Gl*), Sílica (*Si Gl*), Alumina (*Al Gl*), Fósforo (*P Gl*), Manganês (*Mn Gl*) e Perda ao fogo (*Pf Gl*).

Tabela 5.1: Distribuição dos parâmetros de controle globais nas frentes de lavra.

# Frente	Fe Gl (%)	Si Gl (%)	Al Gl (%)	P Gl (%)	Mn Gl (%)	Pf Gl (%)
1	46,8	31,3	0,6	0,030	0,074	0,8
2	46,3	31,8	0,6	0,028	0,031	1,1
3	63,8	2,3	1,3	0,072	0,042	4,6
4	46,0	32,6	0,4	0,023	0,011	1,0
5	47,5	28,5	0,5	0,063	0,024	2,6
6	66,8	1,7	0,7	0,040	0,032	1,9
7	43,5	36,2	0,8	0,018	0,018	0,9
8	65,7	3,0	0,7	0,042	0,014	2,1
9	65,2	1,3	1,1	0,079	0,055	4,0
10	42,5	37,6	0,8	0,018	0,017	0,9
11	66,1	2,7	0,7	0,036	0,019	2,0
12	63,8	3,4	1,9	0,020	0,101	3,4
13	59,6	9,5	2,1	0,020	0,179	2,4
14	67,0	1,6	0,6	0,046	0,052	1,9
15	64,3	2,1	1,5	0,083	0,131	3,8

De acordo com a Tabela 5.1, é possível observar a distribuição dos teores globais nas diferentes frentes de lavra. Existem frentes de minério com alto teor global de ferro que chegam a um máximo de 67,0% e sílica global de 1,6% até minérios de baixo teor com 42,5% de ferro global e sílica global de 37,6%.

A Tabela 5.2 mostra a distribuição dos parâmetros de especificação de qualidade e granulométrico da fração acima de 8 mm. Na primeira coluna são mostradas as 15 frentes de lavra, enquanto nas colunas seguintes são mostrados os percentuais de granulometria acima 8 mm e os elementos Ferro (*Fe +8mm*), Sílica (*Si +8mm*), Alumina (*Al +8mm*), Fósforo (*P +8mm*), Manganês (*Mn +8mm*) e Perda ao fogo (*Pf +8mm*).

Tabela 5.2: Distribuição dos parâmetros de controle na fração granulométrica +8mm nas frentes de lavra.

# Frente	+8mm (%)	Fe +8mm (%)	Si +8mm (%)	Al +8mm (%)	P +8mm (%)	Mn +8mm (%)	Pf +8mm (%)
1	14,3	52,3	23,2	0,3	0,042	0,059	1,0
2	11,4	55,2	18,2	0,5	0,053	0,036	2,3
3	38,0	63,9	1,7	0,8	0,091	0,036	5,6
4	12,1	54,0	20,6	0,3	0,041	0,012	2,1
5	62,6	51,3	22,8	0,3	0,077	0,021	3,2
6	31,2	66,2	1,2	0,5	0,067	0,034	3,4
7	8,2	55,8	16,9	1,0	0,033	0,024	1,9
8	27,9	65,4	1,9	0,5	0,079	0,016	3,7
9	75,2	65,5	0,9	0,8	0,084	0,036	4,2
10	10,1	54,1	19,9	0,7	0,031	0,022	1,8
11	25,6	66,2	1,5	0,7	0,048	0,023	3,1
12	21,5	64,9	1,3	2,1	0,021	0,071	4,0
13	18,0	65,6	2,1	1,6	0,020	0,059	2,4
14	28,3	66,4	1,1	0,5	0,075	0,043	3,3
15	32,7	64,6	1,0	0,9	0,108	0,097	5,1

De acordo com a Tabela 5.2, é possível identificar a existência de frentes de lavra de minério com maior ou menor compacidade, mínimo de 8,2% (menor compacidade) a um máximo de 75,2% (maior compacidade). Os demais parâmetros de qualidade possuem distribuições variadas, como por exemplo, os teores de perda ao fogo (*pf + 8mm*), que variam de um mínimo de 1,0% até um máximo de 5,6%.

5.2. Cenários de teste

Dois cenários de teste, com relação à variação dos pesos das componentes da função objetivo, foram analisados. Em ambos os cenários a primeira prioridade é a produção. No cenário 1 a qualidade tem a segunda prioridade, enquanto no cenário 2 a segunda prioridade é o número de caminhões utilizados.

A Tabela 5.3 mostra os pesos de produção, especificação e uso de caminhões em cada um dos cenários.

Tabela 5.3: Pesos das componentes da função objetivo.

Componente	Descrição	Valor
α^-, α^+	Atendimento ao ritmo de produção	100
$\beta_{jb}^-, \beta_{jb}^+$	Atendimento aos parâmetros em relação as metas de qualidade	$1 \times Norm_{jb} \times pc_j$
$\delta_{jb}^-, \delta_{jb}^+$	Atendimento aos parâmetros de especificação	$10 \times Norm_{jb} \times pc_j$
ω_l (cenário 1)	Uso dos caminhões	6,4
ω_l (cenário 2)	Uso dos caminhões	4800

Os pesos das componentes para os dois cenários da função objetivo, dada pela Eq. (4.1), estão descritos na Tabela 5.3. Nessa tabela, pc_j é o peso com que cada parâmetro de especificação é avaliado com relação à criticidade, e é dado pela Tabela 5.5; enquanto $Norm_{jb}$ indica o valor normalizado do parâmetro j no britador b . Os valores dos parâmetros de especificação normalizados, $Norm_{jb}$, estão indicados na Tabela 5.4. O processo de normalização é importante devido a diferença entre as grandezas dos parâmetros de especificação.

Tabela 5.4: Parâmetros normalizados.

Parâmetro	$Norm_{jb}$
<i>Fe Global (%)</i>	1
<i>Si Global (%)</i>	1
<i>Al Global (%)</i>	1
<i>P Global (%)</i>	100
<i>Mn Global (%)</i>	20
<i>Pf Global (%)</i>	1
<i>+8mm(%)</i>	0,5
<i>Fe +8mm (%)</i>	1
<i>Si +8mm (%)</i>	1
<i>Al +8mm (%)</i>	10
<i>P +8mm (%)</i>	100
<i>Mn +8mm (%)</i>	10
<i>Pf +8mm (%)</i>	1

Em ambos os cenários, os pesos dos parâmetros de especificação utilizados foram os mesmos e estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Pesos dos parâmetros de controle.

Parâmetro	pc_j	Critério
P (Global) - P (+8mm)	0	Irrelevante
Fe - Si - Al (Global)	1	Importante
Fe - Si - Al (+8mm) +8mm		
Pf (Global) - Pf (+8mm)	5	Muito importante
Mn (Global) - Mn (+8mm)	10	Crítico

Com relação às prioridades nos cenários 1 e 2, observa-se que, no cenário 2, a produção também tem a maior prioridade. Isso acontece porque a variação da produção ocorre em

múltiplos da capacidade do caminhão, tipicamente de 64 toneladas (considerando minério). Assim, como o peso para o desvio de produção é 100, então cada unidade de desvio impacta em 6400 toneladas ($= 100 \times 64$ toneladas) na função objetivo. Com o peso do caminhão fixado em 4800, então o critério “Uso de caminhões” passa para a segunda prioridade. A sequência de prioridade do cenário 1 é a seguinte: a prioridade é a minimização do desvio de produção, em seguida a minimização dos desvios de especificação e, por último, a minimização do número de caminhões.

Para os dois cenários são apresentados os resultados com tempo limite de uma hora de processamento, já que não houve redução do *gap* de otimalidade aumentando-se o tempo até 10 horas.

5.2.1. Análise do Uso de Caminhões e Relação Estéril/Minério

A Tabela 5.6 apresenta as soluções encontradas dos cenários 1 e 2 referente a redução do número de caminhões utilizados e atendimento ao mínimo da REM. Na primeira coluna é informado o indicador; na segunda, o mínimo requerido para a REM, na terceira temos o número de caminhões disponíveis. Nas duas últimas colunas são reportados os resultados encontrados para a REM e número de caminhões utilizados em cada cenário.

Tabela 5.6: Resultados da REM e números de caminhões.

Indicador	Meta REM	Num. Caminhões	Result. (Cenário 1)	Result. (Cenário 2)
REM	$\geq 0,25$	-	0,25	0,26
#Caminhões	-	45	45	40

Como pode ser observado na Tabela 5.6, e como era esperado em vista dos pesos estabelecidos na função objetivo, o cenário 2 apresentou uma redução de cinco caminhões em relação ao cenário 1. O mínimo estabelecido para a REM foi atendido pelos dois cenários, o cenário 2 ficou um pouco acima.

5.2.2. Análise do ritmo de produção obtido para os três pontos de descarga de minério

A Figura 5.1 apresenta os resultados referentes aos ritmos de produção dos três pontos de descarga de minério. As barras de cor vermelha e azul representam para cada ponto de descarga os ritmos de produção mínimo (pl_b) e máximo (pu_b), respectivamente. Os cenários 1 e 2 são representados pelas barras de cor amarela e verde, respectivamente.

A solução encontrada na Figura 5.1 indica redução do ritmo de produção no cenário 2 para os pontos de descarga *Brit1* e *Brit2*. Esta solução tem relação com a redução do número de caminhões utilizados apresentada na Tabela 5.6, onde o cenário 2 reduziu para 40 caminhões

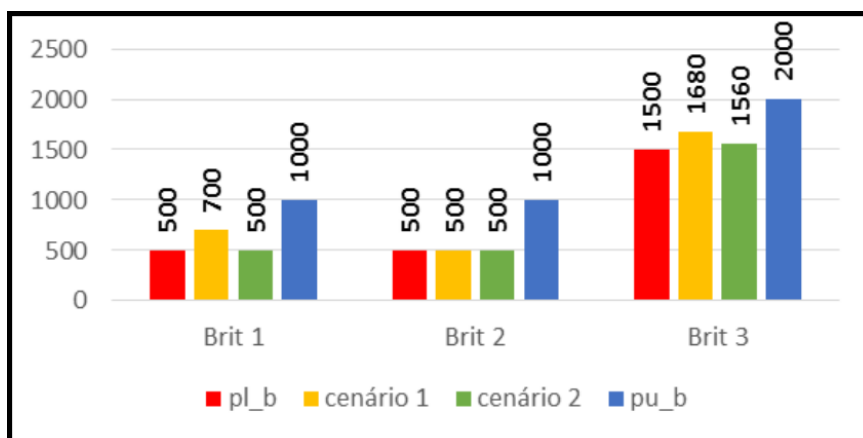


Figura 5.1: Ritmo de produção dos pontos de descarga de minério em relação aos ritmos de produção mínimo pl_b e máximo pu_b .

utilizados e consequente diminuição da capacidade de transporte. Todos os resultados estão dentro dos ritmos de produção mínimo (pl_b) e máximo (pu_b), definidos previamente.

5.2.3. Análise dos parâmetros de especificação

A seguir são apresentados, pelas tabelas 5.7 e 5.8, os resultados dos parâmetros de especificação referentes aos cenários 1 e 2 obtidos considerando as frentes de lavra apresentadas nas tabelas 5.1 e 5.2. As tabelas foram organizadas da seguinte forma: na primeira coluna mostra-se o parâmetro de especificação; na segunda, os teores recomendados dos respectivos parâmetros tr_{jb} e nas demais colunas, os resultados obtidos para cada ponto de descarga de minério.

Tabela 5.7: Resultados do Cenário 1.

Parâmetro	tr_{jb}	Brit 1	Brit 2	Brit 3
Fe Global (%)	58,00	58,00	58,00	58,00
Si Global (%)	13,00	13,20	13,00	13,00
Al Global (%)	1,00	1,06	1,09	1,14
P Global (%)	0,030	0,045	0,049	0,044
Mn Global (%)	0,150	0,081	0,083	0,082
Pf Global (%)	2,00	2,47	2,61	2,59
+8mm(%)	31,00	29,00	30,79	31,00
Fe +8mm (%)	60,00	60,09	60,03	60,26
Si +8mm (%)	9,00	9,59	9,48	9,32
Al +8mm (%)	0,90	0,90	0,90	1,00
P +8mm (%)	0,030	0,061	0,065	0,056
Mn +8mm (%)	0,300	0,061	0,063	0,061
Pf +8mm (%)	3,00	3,23	3,39	3,17

Tabela 5.8: Resultados do Cenário 2.

Parâmetro	tr_{jb}	Brit 1	Brit 2	Brit 3
Fe Global (%)	58,00	57,95	57,78	57,84
Si Global (%)	13,00	13,45	13,00	13,00
Al Global (%)	1,00	1,02	1,18	1,18
P Global (%)	0,030	0,040	0,054	0,050
Mn Global (%)	0,150	0,064	0,094	0,090
Pf Global (%)	2,00	2,36	2,76	2,71
+8mm(%)	31,00	31,00	31,00	30,87
Fe +8mm (%)	60,00	60,19	60,00	60,11
Si +8mm (%)	9,00	9,69	9,35	9,31
Al +8mm (%)	0,90	0,90	0,90	0,96
P +8mm (%)	0,030	0,054	0,069	0,063
Mn +8mm (%)	0,300	0,048	0,070	0,067
Pf +8mm (%)	3,00	3,00	3,47	3,34

Como pode ser observado, os resultados do cenário 1 apresentam um menor desvio em relação ao teor recomendado tr_{jb} quando comparado ao cenário 2. A seguir são detalhados alguns parâmetros de especificação e apresentados de acordo com a ordem de criticidade apresentado na Tabela 5.5. Os parâmetros de especificação escolhidos são: Mn_{gl} , $Pf + 8mm$, $Fegl$, $Algl$ e Pgl .

Para os parâmetros de controle críticos, peso igual a dez, são apresentadas duas figuras para comparar os resultados obtidos nos dois cenários. O parâmetro de especificação crítico escolhido para análise foi o elemento manganês global. A Figura 5.2 apresenta os dados dos três pontos de descarga de minério individualizados, enquanto a Figura 5.3 ilustra os resultados em função de cada cenário ponderando o percentual de manganês global com os respectivos ritmos de produção de cada ponto de descarga de minério apresentados na Tabela 5.6. Para avaliação é utilizado como referência nas figuras o valor do teor recomendado do parâmetro j no britador b (tr_{jb}).

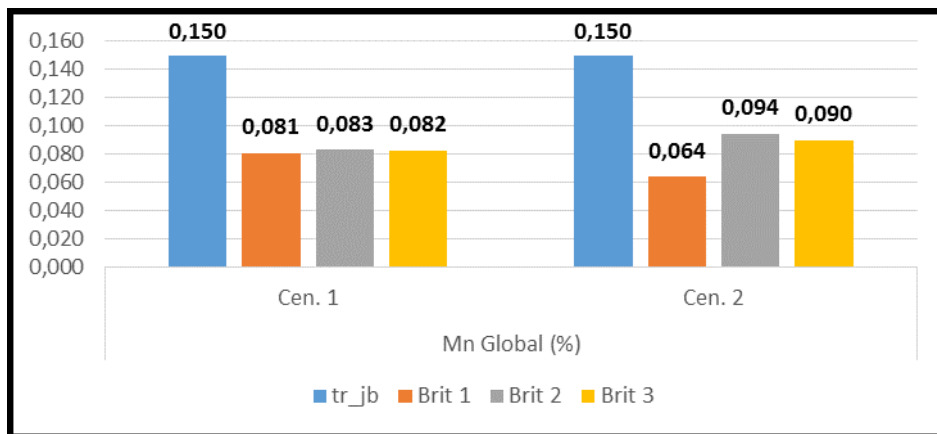


Figura 5.2: Percentual dos parâmetros de Mn Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.

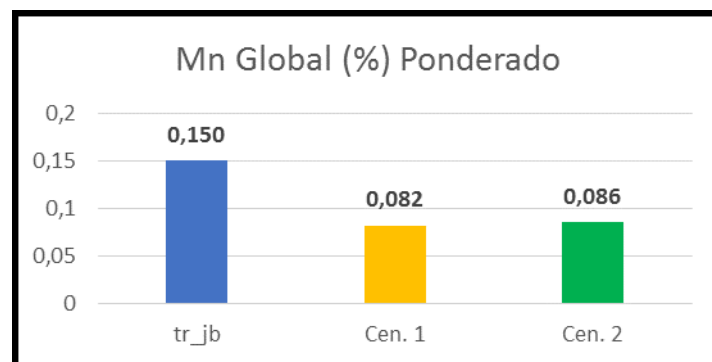


Figura 5.3: Percentual dos parâmetros de Mn Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.

As Figuras 5.2 e 5.3 indicam que, apesar de crítico, o resultado esperado para o manganês global é impossível de ser atendido em função da composição das frentes de lavra disponíveis e utilizadas na instância. Isto porque, conforme mostra a Tabela 5.1, praticamente todas as frentes possuem percentual de manganês global abaixo do teor recomendado do parâmetro j no britador b (tr_{jb}) e os resultados das soluções encontradas para os cenários 1 e 2 ficaram abaixo do limite mínimo do parâmetro de especificação para os pontos de descarga de minério

(tl_{jb}), o qual possui valor igual a 0,100%.

Para a análise e apresentação dos resultados dos parâmetros de controle considerados muito importantes, peso igual a cinco, o parâmetro de especificação perda ao fogo da fração acima de +8mm foi o escolhido. Abaixo são apresentadas duas figuras, a primeira apresenta os resultados de cada britador de forma independente, Figura 5.4, a segunda apresenta os resultados ponderados pelo ritmo de produção dos pontos de descarga de minério, Figura 5.5. Ambas as figuras possuem o teor recomendado do parâmetro perda ao fogo (tr_{jb}) para comparação.

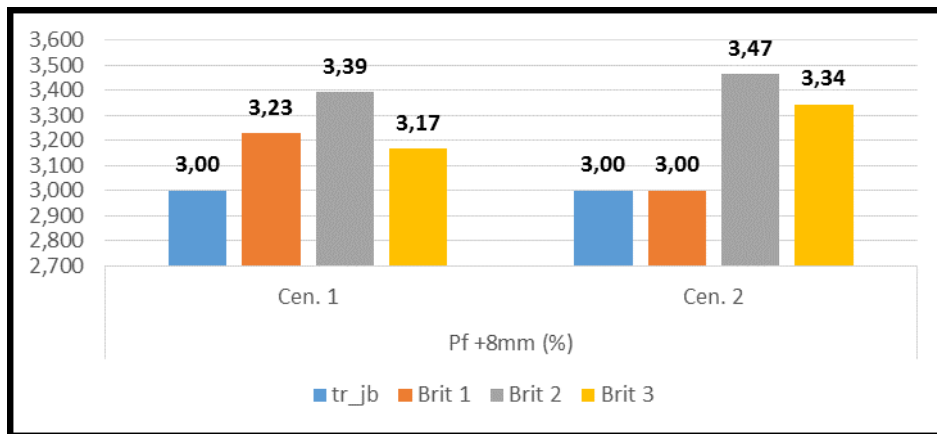


Figura 5.4: Percentual dos parâmetros de Pf com granulometria acima de 8 mm dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.

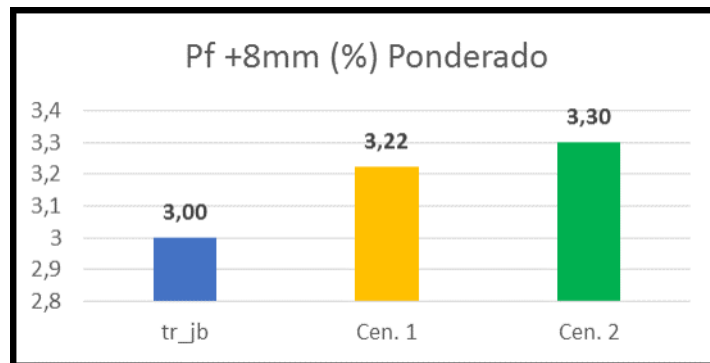


Figura 5.5: Percentual dos parâmetros de Pf com granulometria acima de 8 mm dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.

Como pode ser observado nas figuras 5.4 e 5.5 os percentuais de perda ao fogo para o cenário 1 apresentaram um resultado melhor que o cenário 2. Apesar de estarem acima do teor recomendado para o parâmetro (tr_{jb}) não extrapolaram o limite máximo do parâmetro (tu_{jb}), que possui valor igual a 4,0%.

As figuras 5.6 e 5.7 apresentam as soluções encontradas dos dois cenários referente ao parâmetro de especificação Fe Global, classificado como importante, com peso igual a 1. Para comparação, foi incluído o valor do teor recomendado do parâmetro (tr_{jb}).

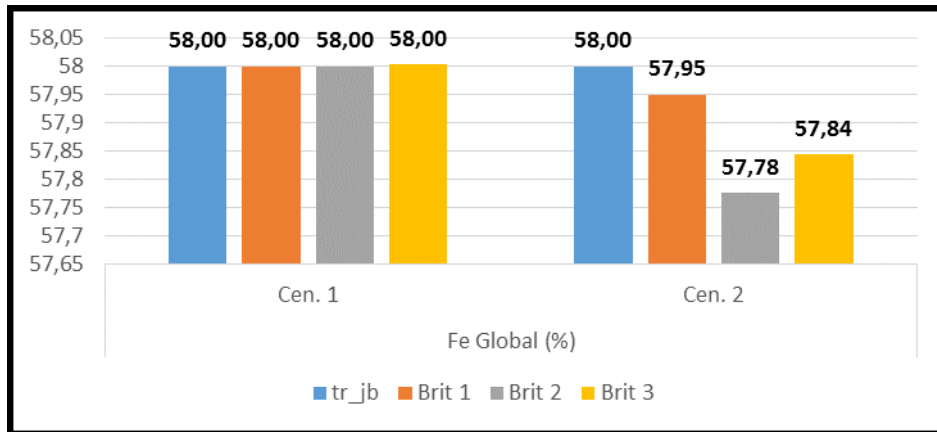


Figura 5.6: Percentual dos parâmetros de Fe Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.

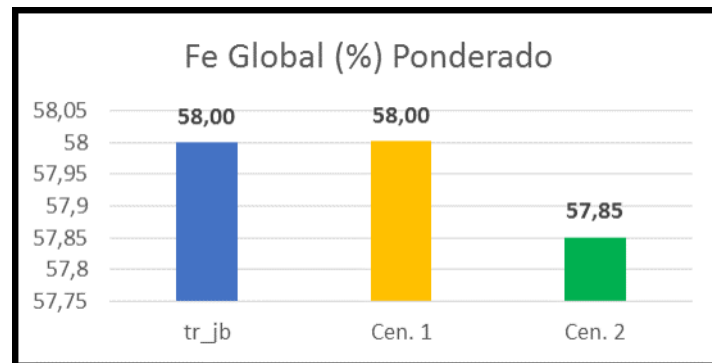


Figura 5.7: Percentual dos parâmetros de Fe Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.

O resultado do cenário 1 foi exatamente o teor recomendado (tr_{jb}) para os três pontos de descarga de minério, como é possível observar nas figuras 5.6 e 5.7, enquanto o cenário 2 apresentou resultados abaixo do teor recomendado (tr_{jb}), mas acima do limite mínimo do parâmetro de especificação (tl_{jb}) que é de 57,00%.

Assim como o parâmetro de especificação Fe Global, o parâmetro Al Global foi classificado como importante. É possível observar nas figuras 5.8 e 5.9 as soluções obtidas para este parâmetro nos dois cenários que assim como as análises anteriores mantém como referência o teor recomendado (tr_{jb}) para comparação.

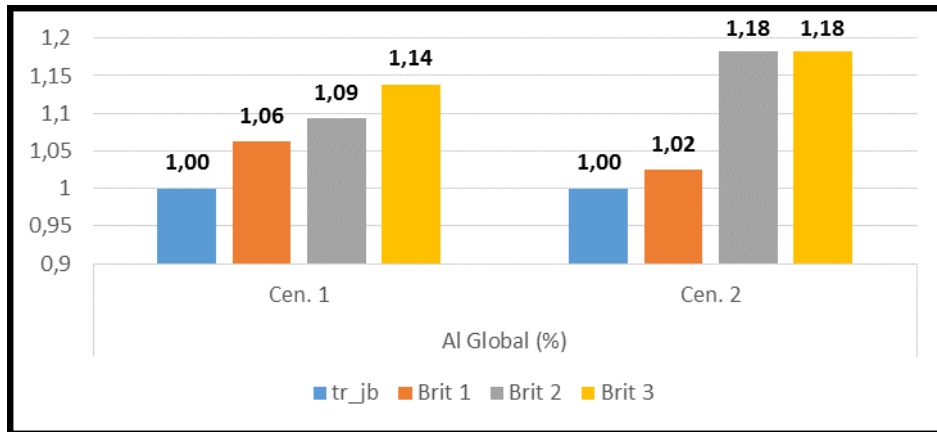


Figura 5.8: Percentual dos parâmetros de AI Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.

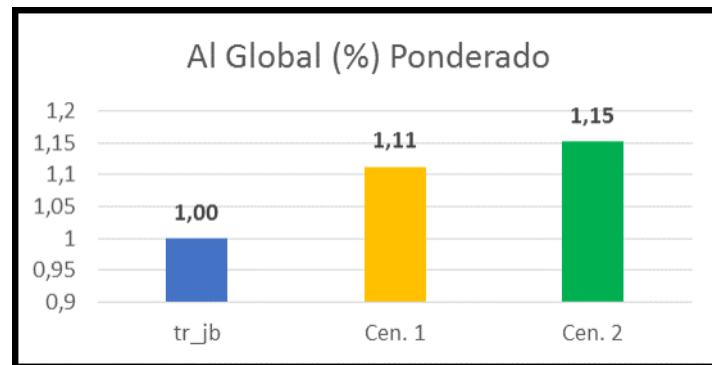


Figura 5.9: Percentual dos parâmetros de AI Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.

Os resultados dos cenários 1 e 2 para o parâmetro de especificação AI Global ficaram um pouco acima do teor recomendado (tr_{jb}) e abaixo do limite máximo para o parâmetro de especificação (tu_{jb}). Mas novamente as soluções do cenário 1 foram melhores e se aproximaram mais do teor recomendado.

Por fim a análise do parâmetro de especificação P Global considerado com peso irrelevante, isto é, peso igual a zero, é representado pelas figuras 5.10 e 5.11. Para comparação foi incluído como referência o teor recomendado (tr_{jb}) do parâmetro.

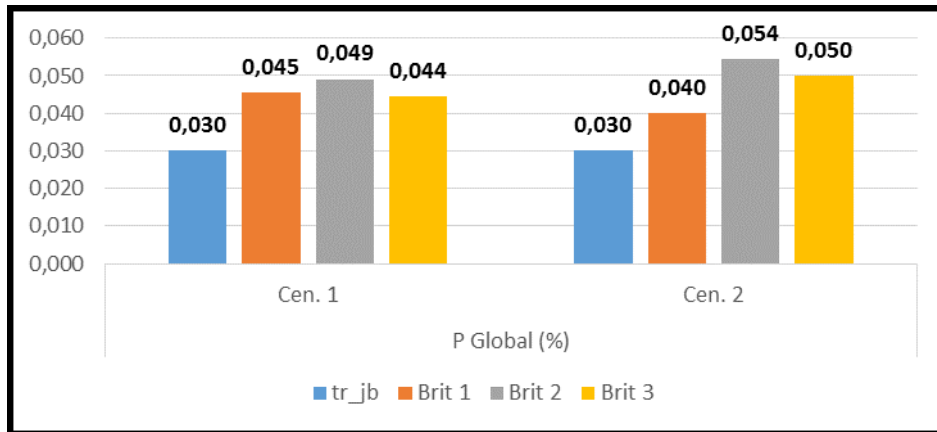


Figura 5.10: Percentual dos parâmetros de P Global dos três pontos de descarga de minério para os cenários 1 e 2.

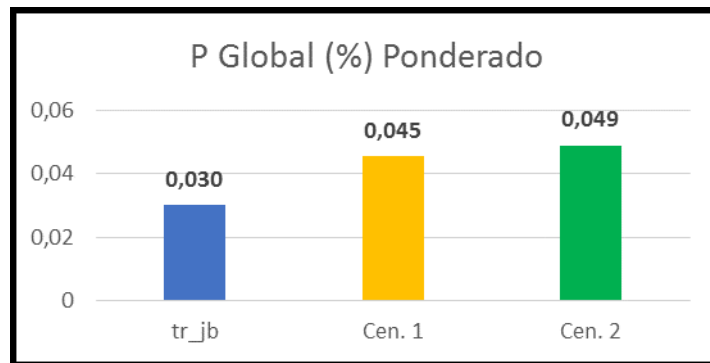


Figura 5.11: Percentual dos parâmetros de P Global dos três pontos de descarga de minério ponderados pelo ritmo de produção para os cenários 1 e 2.

Como esperado, os resultados para o parâmetro P Global, apresentado nas figuras 5.10 e 5.11, não foram priorizados em função do peso atribuído, isto é, igual a zero. Assim, ficaram acima do teor recomendado (tr_{jb}) e acima do limite máximo para o parâmetro (tu_{jb}), 0,030% e 0,040%, respectivamente.

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

Este trabalho tratou um problema de planejamento operacional de lavra diário de uma indústria brasileira de mineração de ferro. O objetivo deste problema é determinar o ritmo de produção horária de três pontos de descarga de minério e um de estéril, respeitando a relação estéril/minério e os requisitos mínimos e máximos dos parâmetros de especificação relativos à qualidade e granulometria dos três pontos de descarga de minério, tendo por objetivo reduzir os desvios das metas de produção e qualidade, assim como o número de caminhões necessários ao processo produtivo.

Para resolvê-lo, foi desenvolvida uma formulação de programação linear inteira mista por metas com otimização mono-objetivo, representada pela soma ponderada dos três objetivos estabelecidos.

O modelo desenvolvido difere de outros trabalhos encontrados na literatura por considerar mais de um ponto de descarga; no caso, quatro pontos de descarga, sendo três de minério e um de estéril. A construção do modelo busca representar as principais características do complexo minerador. O tempo de ciclo dos caminhões é uma variável que é influenciada diretamente pela distância das frentes de lavra até os pontos de descarga, visto que são duas minas localizadas em pontos distintos com quatro pontos de descarga distantes entre si, o tipo de material transportado também influencia no tempo percorrido por trecho. Outras variáveis consideradas são as produtividades horárias dos equipamentos de carga e limite de utilização para uso dos caminhões. Essas informações levam em consideração dados históricos do despacho que são essenciais para retratar a realidade do complexo.

Para validar o modelo desenvolvido foram analisados dois cenários que diferem entre si com relação aos pesos dados às componentes da função objetivo. No cenário 1, a produção tinha a maior prioridade e como menor prioridade a redução do número de caminhões; enquanto no cenário 2 a produção foi mantida como a maior prioridade e a redução do número de caminhões passa ser a segunda prioridade.

Como esperado, os resultados apresentados no cenário 1 para ritmo de produção ficaram mais próximas das metas estabelecidas e não houve redução no número de caminhões. Por outro lado, no cenário 2 houve uma redução de caminhões no processo produtivo de 45 para 40 unidades. Para os parâmetros de especificação observa-se que o cenário 1 apresenta melhores resultados com um menor desvio em relação ao teor recomendado tr_{jb} quando comparado aos do cenário 2.

Este trabalho contribuiu, assim, com o desenvolvimento de um novo modelo de programação matemática como ferramenta de apoio à tomada de decisão para o planejamento operacional de lavra diária. Com isso, o operador da programação de lavra pode, por meio da formulação, definir com base no cenário diário (disponibilidade frentes de lavra, necessidade

de aumento de produção, flexibilização de prâmetros de esepficação, baixa disponibilidade de equipamentos, etc.) escolher qual objetivo é o mais adequado. O processo decisório se torna mais flexível, pois é possível realizar a escolha dentre várias soluções geradas.

6.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros são apontadas as seguintes atividades:

- Adaptar o modelo para aplicação em outros complexos mineradores da empresa;
- Implementar o modelo desenvolvido em outro resolvidor de mercado, mais poderoso, tal como o GUROBI;
- Desenvolver um modelo de simulação para validar os resultados obtidos pelo modelo de otimização;
- Incluir esta ferramenta na rotina de trabalho da equipe de planejamento de curto prazo e treinar a equipe local para sua utilização;
- Tratar o problema como sendo de otimização multiobjetivo.

6.3. Publicações geradas

Como fruto deste trabalho, os seguintes artigos foram publicados:

Título: Uma Nova Formulação de Programação Matemática para o planejamento de lavra das Minas de Capão Xavier e Mar Azul

Autores: Ademar Lopes da Silva Júnior, Guido Pantuza Júnior, Luciano Perdigão Cota e Marcone Jamilson Freitas Souza

Evento: LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2019)

Local: Limeira, São Paulo

Data: 2 a 6 de Setembro de 2019

Título: Planejamento de lavra: Um estudo de caso

Autores: Ademar Lopes da Silva Júnior, Guido Pantuza Júnior, Luciano Perdigão Cota e Marcone Jamilson Freitas Souza

Evento: XIV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2019)

Local: Ouro Preto, Minas Gerais

Data: 27 a 30 de Outubro de 2019

Referências Bibliográficas

- ALARIE, S., GAMACHE, M. “Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines”, *Int. Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 16, n. 1, pp. 59–76, 2002.
- ALVARENGA, G. B. *Despacho ótimo de caminhões numa mineração de ferro utilizando algoritmo genético com processamento paralelo*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1997.
- ARAÚJO, F. C. R., SOUZA, M. J. F. “Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 64, pp. 69–76, 2011.
- ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., et al.. *Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia*. Rio de Janeiro, Editora Campus, 2007.
- ARENALES, M., MORABITO, R., ARMENTANO, V., et al.. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. Editora Campus, 2015.
- CHANDA, E. K. C., DAGDELEN, K. “Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems”, *Int. Journal of Surface Mining and Reclamation*, v. 9, n. 4, pp. 203–208, 1995.
- COSTA, F. P., SOUZA, M. J. F., PINTO, L. R. “Um modelo de alocação dinâmica de caminhões”, *Revista Brasil Mineral*, v. 231, pp. 26–31, 2004.
- COSTA, F. P. *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.
- COSTA, F. P., SOUZA, M. J. F., PINTO, L. R. “Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 1, pp. 77–81, 2005.

- DEB, K., THIELE, L., LAUMANN, M., et al.. “Scalable Multi-Objective Optimization Test Problems”. Em: *Proceedings of the 2002 IEEE Congress on Evolutionary Computation – CEC’02*, pp. 825–830, Honolulu, HI, EUA, 2002.
- EZAWA, L., SILVA, K. “Alocação dinâmica de caminhões visando qualidade”. Em: *VI Congresso Brasileiro de Mineração*, pp. 15–19, Salvador, 1995.
- GERSHON, M. “A linear programming approach to mine scheduling optimization”. Em: *Proceedings of the 17th Application of computers and operations research in the mineral industry*, pp. 483–493, New York, 1982.
- GUIMARÃES, I. F., PANTUZA JR., G., SOUZA, M. J. F. “Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto”. Em: *Anais do XIV Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP*, Bauru, SP, 2007.
- LUENBERGER, D. G., YE, Y. *Linear and Nonlinear programming, 3-rd edition*. Springer, US, 2008.
- MARAN, J., TOPUZ, E. “Simulation of truck haulage systems in surface mines”, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 2, n. 1, pp. 43–49, 1988.
- MARTINS, A. G. *Simulação das operações de lavra da mina de Brucutu utilizando um modelo de programação linear para alocar os equipamentos de carga*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2013.
- MERSCHMANN, L. H. C. *Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto*. Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- PANTUZA JR., G., SOUZA, M. J. F. “Um algoritmo genético híbrido multiobjetivo aplicado ao problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto”. Em: *Anais do 5º Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas – CBMINA 2010*, Belo Horizonte, MG, 2010a.
- PANTUZA JR., G., SOUZA, M. J. F. “Um modelo de programação matemática para o problema de planejamento de lavra considerando o método de lavra seletiva.” Em: *Anais do XVII Simpósio de Engenharia de Produção–SIMPEP*, Bauru, SP, 2010b.
- PANTUZA JR., G., SOUZA, M. J. F. “Um algoritmo genético híbrido multiobjetivo aplicado ao problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto”. Em: *Anais do*

XIV Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha – SPOLM, Rio de Janeiro, RJ, 2010c.

PANTUZA JR., G., SOUZA, M. J. F., CABRAL, I. E. “Uma nova formulação de programação matemática para o problema de planejamento de lavra”, *Revista GEPROS*, v. 4, n. 4, pp. 125–137, 2009.

RODRIGUES, L. F., PINTO, L. R. “Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 65, n. 3, pp. 377–384, 2012.

SILVA, A. A., SOUZA, M. J. F., GUIMARÃES, V. L., et al.. “Planejamento Operacional de Lavra: Um Estudo de Caso”. Em: *Anais do XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, v. 46, pp. 2030–2041, Salvador, 2014.

SOUZA, M. J. F., COELHO, I. M., RIBAS, S., et al.. “A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 207, n. 2, pp. 1041–1051, 2010.

WHITE, J. W., OLSON, J. P. “Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives”, *Mining Engineering*, v. 38, n. 11, pp. 1045–1054, 1986.