



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

**UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA A
BLENDAGEM DE MINÉRIO E ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CARGA EM
UMA MINA DE COBRE**

Natanael Salgado Coutinho

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2022**

Natanael Salgado Coutinho

**UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA A
BLENDAGEM DE MINÉRIO E ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CARGA EM
UMA MINA DE COBRE**

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. Luciano Perdigão Cota,
D.Sc.

Coorientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio,
D.Sc.

Ouro Preto-MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C871m Coutinho, Natanael Salgado.
um modelo de programação linear inteira mista para a blendagem de
minério e alocação de equipamentos de carga em uma mina de cobre.
[manuscrito] / Natanael Salgado Coutinho. - 2022.
46 f.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Perdigão Cota.
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro
Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em
Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de
Processos Mineraiis.

1. Gestão integrada de resíduos sólidos - Blendagem. 2. Sistema de
suporte de decisão. 3. Armazenamento e transporte de carga. I. Cota,
Luciano Perdigão. II. Euzébio, Thiago Antonio Melo. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Natanael Salgado Coutinho

Um modelo de programação linear inteira mista para a blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga em uma mina de cobre

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 04 de maio de 2022

Membros da banca

Doutor - Luciano Perdigão Cota - Orientador - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Instituto Tecnológico Vale
Doutora - Iranildes Daniel dos Santos - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Fernando Bernardes de Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Igor Machado Coelho - Universidade Federal Fluminense

Luciano Perdigão Cota, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 06/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho**, **COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 26/07/2022, às 10:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0366485** e o código CRC **26C01083**.

*A minha família por todo o suporte
durante toda essa jornada.*

Agradecimentos

Agradeço à minha família por todo o suporte que me deram durante essa jornada, à minha mãe Sandra e ao meu pai Marcio. Agradeço também à Débora pelo estímulo ao aprendizado e à minha filha Maria Ísis, que apesar de estar presente na minha vida há tão pouco tempo, já me deu felicidades que não sabia que era possível alcançar. Você é meu combustível que não tem fim e que me levará a muito mais jornadas desafiadoras como esta, filha. Minha gratidão aos meus avôs, tios, primos e amigos que sempre estiveram presente na minha vida e nunca deixaram de torcer por mim.

Agradeço à UFOP e ao ITV pelo ensino de qualidade e por toda a estrutura disponibilizada. Sou grato aos professores Alan e Marcone pela ajuda durante este período e agradeço em especial aos professores Luciano e Thiago por todo o conhecimento compartilhado, pelo empenho, pela inspiração e por toda a dedicação técnica e pessoal.

A todos vocês, meu sincero muito obrigado!

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.

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.)

UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA A BLENDAGEM DE MINÉRIO E ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CARGA EM UMA MINA DE COBRE

Natanael Salgado Coutinho

Maio/2022

Orientadores: Luciano Perdigão Cota
Thiago Antonio Melo Euzébio

Este trabalho trata um problema de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga em uma mina de cobre a céu aberto. Neste problema, o minério disponível para a alimentação da usina está localizado em frentes de lavra e pilhas. Escavadeiras e pás mecânicas são utilizadas para a retomada de minério, que é encaminhado para usina por meio de caminhões. O objetivo neste problema é gerar um planejamento de blendagem e alocação dos equipamentos de carga que minimize os desvios das metas de produção e qualidade no atendimento da usina. Para resolver o problema foi proposto um sistema de suporte à decisão por meio de uma formulação de programação linear inteira mista. Dados reais de uma mina de cobre da empresa Vale S.A. foram utilizados para validar o modelo matemático. Anteriormente ao sistema proposto, as decisões eram tomadas pela equipe de planejamento por meio de planilhas digitais e um tempo considerável era dispendido para se encontrar uma solução viável. Nos experimentos computacionais, o modelo foi avaliado em dois cenários reais da mina em estudo, o primeiro com todos os equipamentos de carga disponíveis e o segundo com parada para manutenção de metade desses equipamentos. O sistema de suporte à decisão foi capaz de encontrar a solução ótima de maneira instantânea nos cenários avaliados, validando-o como ferramenta de suporte à decisão para os cenários descritos.

Palavras-chave: Blendagem, Alocação de equipamentos de carga, Sistema de suporte à decisão.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; **Área Relacionada da Vale:** Mina de Sossego.

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.)

A MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING FOR ORE BLENDING AND SHOVEL ALLOCATION IN A COPPER MINE

Natanael Salgado Coutinho

May/2022

Advisors: Luciano Perdigão Cota

Thiago Antonio Melo Euzébio

This work deals with an ore blending problem and the shovel allocation in an open-pit copper mine. In this problem, the ore available to feed the plant is located in ore fronts and stockpiles. Excavators and shovels are used to extract ore, which is sent to the plant by trucks. The goal is to create a blending plan and loading equipment allocation that minimizes deviations from production and quality goals from the plant. We propose a decision support system based on mixed-integer linear programming to solve the problem. We use real data from a copper mine from the Vale S.A. to validate the formulation. In the study mine, people responsible for planning used digital spreadsheets and spend a considerable time finding a feasible solution. The formulate was evaluated in two real scenarios in the computational experiments. In the first scenario, there are all loading equipments available, and in the second, there are 50% of the load equipment available, of which 50% is stopped for maintenance. The decision support system was able to instantly find the optimal solution in the evaluated scenarios, validating it as a decision support tool for the described scenarios.

Keywords: Blending, Shovel allocation, Decision support system.

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Reduction of Variability and Control Improvement; **Related Area of Vale:** Sossego mine.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Mina de Sossego	13
Figura 3.1	Interface entre frentes de lavra, pilhas e usina	19
Figura 3.2	Solução do problema exemplificado	22
Figura 5.1	Entrada dos dados dos parâmetros de controle de qualidade	28
Figura 5.2	Entrada dos dados de produção	29
Figura 5.3	Entrada dos dados de equipamentos de carga	29
Figura 5.4	Entrada dos dados pilhas e frentes de lavra	30
Figura 5.5	Entrada dos dados de uma frente de lavra	30
Figura 5.6	Entrada dos dados de compatibilidade entre equipamentos de carga e pilhas/frentes	31
Figura 5.7	Entrada dos dados dos teores de uma frente de lavra	31
Figura 5.8	Localização do botão utilizado para solucionar o problema	32
Figura 5.9	Solução ótima	32
Figura 5.10	Resposta do modelo para a alocação dos equipamento de carga	33
Figura 5.11	Ociosidade e taxa de produção dos equipamentos de carga	33
Figura 6.1	Limites dos teores.	38
Figura 6.2	Teores obtidos.	39
Figura 6.3	Alocação dos equipamentos de carga nas pilhas e frentes.	40

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Comparação com trabalhos recentes da literatura.	18
Tabela 3.1	Características das pilhas e frentes de lavra.	20
Tabela 3.2	Características dos equipamentos de carga.	21
Tabela 3.3	Limites de produção e qualidade.	21
Tabela 6.1	Características das pilhas e frentes de lavra.	36
Tabela 6.2	Características dos equipamentos de carga.	36
Tabela 6.3	Compatibilidade dos equipamentos de carga com as frentes e pilhas.	37
Tabela 6.4	Características de Criticidade	37
Tabela 6.5	Valores de Metas e Resultados	38
Tabela 6.6	Valores de Ritmo de Pilhas e Equipamentos	39

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Motivação	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivos específicos	14
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	Revisão bibliográfica	15
2.1	Blendagem e alocação de equipamentos de carga	15
2.2	Considerações finais	18
3	Caracterização do problema	19
3.1	Planejamento da blendagem de minério e alocação de equipamento de carga	19
3.2	Considerações finais	22
4	Formulação matemática proposta	23
4.1	Conjuntos, parâmetros e variáveis	23
4.2	A formulação matemática	24
4.3	Considerações finais	27
5	Implementação do sistema de suporte à decisão	28
5.1	Interação do usuário com o sistema proposto	28
5.2	Considerações finais	34
6	Experimentos computacionais	35
6.1	Definição de cenários	35
6.2	Análise dos resultados	38
6.3	Considerações finais	40
7	Conclusões	41
7.1	Trabalhos futuros	41

Referências Bibliográficas	43
Apêndices	45

1. Introdução

1.1. Contextualização

O Brasil é um imenso território com uma formação rochosa antiga, possuindo grande quantidade de minerais. Em 2019, onze substâncias metálicas, dentre elas o cobre, ganharam notoriedade por representar cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira (ANM, 2020). O cobre é o terceiro tipo de metal mais utilizado no mundo (BOUTOURIA e ABID, 2012), sendo largamente empregado na geração e na transmissão de energia, em fiações e em praticamente todos os equipamentos eletrônicos, como a televisão e o telefone celular. Apresenta coloração laranja-avermelhada, é maleável, reciclável, resistente à corrosão e às altas temperaturas.

Em uma mina de cobre tem-se como partida o desmonte de minérios em frentes de lavra. Cada frente possui um minério sulfetado com características de qualidade específicas, como teor de cobre e de níquel, além de características físicas, como grau de liberação e densidade. O minério extraído da frente pode ser transportado para um armazenamento intermediário na forma de pilhas ou ser transportado diretamente para a britagem primária na usina.

O minério demandado pela usina para ser beneficiado deve atender às metas de produção e qualidade. Na meta de produção define-se uma quantidade de minério que deve ser alimentado na britagem primária. Na meta de qualidade busca-se cumprir os parâmetros de controle de qualidade solicitados pela usina para atender os clientes. Para isso, é necessário realizar a blendagem do minério. O termo blendagem diz respeito a uma mistura, em proporções definidas, de minérios com características diferentes, com o objetivo de se obter uma massa que atenda os controle de qualidade pré-estabelecidos (MORAES *et al.*, 2006). Na etapa de blendagem busca-se determinar a quantidade de minério que deve ser retomado em pilhas e frentes para atender a solicitação da usina. Nas pilhas e frentes são utilizados equipamentos de carga para retomar o minério. Um outro subproblema de otimização existente é a alocação destes equipamentos para atender as metas de produção e qualidade.

Neste trabalho busca-se propor um sistema de suporte à decisão para a blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga na mina de Sossego da Vale S.A, localizada em Canaã dos Carajás, PA. Essa mina foi descoberta em 1997 e teve sua operação iniciada em 2004, sendo um marco para a entrada da empresa Vale S.A no mercado mundial de cobre (VALE, 2021). O processo de extração de cobre na mina do Sossego é realizado a céu aberto, como ilustrado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Mina de Sossego

1.2. Motivação

Até o presente momento, na mina objeto de estudo deste trabalho, o planejamento de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga é realizado de maneira manual por meio de planilhas digitais. O planejamento manual demanda muito tempo para a geração de uma solução viável, da qual não se tem garantia da qualidade. Devido à natureza combinatória do problema, sabe-se que a resolução de maneira manual não é a mais adequada em versões de grande porte.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que tratam problemas de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga em complexos mineradores a céu aberto de ferro, de níquel e de carvão (BENNDORF, 2013; SILVA *et al.*, 2019; ZHANG e XIA, 2015). Até então, do nosso conhecimento, o problema de blendagem de minério de cobre em pilhas e frentes de lavra, e alocação de equipamentos de carga, ainda não foi tratado na literatura. Para preencher esta lacuna, propõem-se neste trabalho um sistema de suporte à decisão baseado em uma formulação de programação linear inteira mista (PLIM). Nesta formulação tem-se como função objetivo minimizar os desvios de produção e qualidade. Além disso, trata-se também da alocação de equipamentos de carga para a retomada de minério nas frentes e pilhas.

1.3. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são apresentados nesta seção.

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral é desenvolver e implantar um sistema de suporte à decisão para resolver o problema de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga na mina de Sossego. Neste problema busca-se atender às metas de produção e de qualidade, além de alocar os equipamentos de carga nas frente de lavra e pilhas de estoque.

1.3.2. Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Promover reuniões com a equipe de Sossego para compreender as características do problema;
- Realizar a caracterização do problema;
- Propor uma formulação linear inteira mista para resolver o problema;
- Realizar experimentos computacionais com dados reais extraídos da Mina de Sossego para a validação do modelo matemático proposto;
- Desenvolver um sistema de suporte à decisão baseado no modelo matemático;
- Implantar o sistema de suporte à decisão na mina estudada.

1.4. Estrutura do trabalho

Neste capítulo foi contextualizado o cenário da mineração de cobre e a importância da blendagem e alocação de equipamentos nas empresas de mineração com foco na produtividade. A motivação de escolher esse tema para ser abordado e os objetivos do trabalho também foram apresentados. Os demais capítulos seguem organizados como a seguir. A revisão bibliográfica encontra-se no Capítulo 2. No Capítulo 3 é apresentada a caracterização do problema. No Capítulo 4 é apresentada a formulação matemática proposta. A implementação do sistema de suporte à decisão é reportada no Capítulo 5. Os experimentos computacionais são mostrados no Capítulo 6. Por fim, as conclusões e propostas de trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 7.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica de trabalhos da literatura que tratam problemas de blendagem e de alocação de equipamentos de carga na mineração. Na Seção 2.1 os trabalhos da literatura são apresentados e na Seção 2.2 são reportadas as considerações finais.

2.1. Blendagem e alocação de equipamentos de carga

O problema de blendagem de minério é tratado com grande interesse na literatura desde a década de 1980, com o objetivo de minimizar os custos operacionais do processo mineratório. O primeiro trabalho de blendagem aplicado à mineração foi de Williams e Haley (1959), mas o que trouxe foco para o tema sobre blendagem foram trabalhos como de Ravindran e Hanline (1980) que utiliza programação inteira mista para minimizar os custos operacionais de uma mina de carvão. Alguns anos mais tarde, Chanda e Dagdelen (1995) propuseram um modelo de programação linear por metas para resolver um problema de blendagem de carvão. Este modelo é clássico e amplamente citado na literatura e utilizado em diversos sistemas de otimização.

De maneira semelhante, a alocação de recursos também é um problema comum na literatura desde a década de 1980 e tem como objetivo minimizar os custos operacionais de um processo mineratório (MARAN e TOPUZ, 1988). Aproximadamente 50% dos custos operacionais em minas a céu aberto estão relacionados ao transporte e manuseio de minério (ALARIE e GAMACHE, 2002). A otimização dos processos operacionais de uma mina e a gestão da frota têm um impacto significativo na eficiência da operação (MORADI AFRAPOLI e ASKARI-NASAB, 2019).

A seguir, são descritos alguns estudos recentes que tratam de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga.

Xi-jin *et al.* (2009) propõem dois métodos heurísticos, um baseado no Algoritmo Genético e o outro no *Simulated Annealing*. O problema tratado é de otimização da blendagem de minério de carvão com os objetivos de gerar ganhos econômicos, garantindo parâmetros de qualidades como limites mínimo e máximo de cinza. Souza *et al.* (2010) tratam um problema de blendagem de minério de ferro e alocação de equipamentos de carga e transporte. Os objetivos são minimizar os desvios nas metas de produção e de qualidade. No mesmo ano, Qinghua *et al.* (2010) propõe a utilização de GPS para a alocação dinâmica e em tempo real de equipamentos de carga e de transporte em um problema de mistura de minério em mina a céu aberto. Experimentos na mina de Sandaozhuang, na China, mostram que o desempenho do sistema é estável e atende às expectativas dos autores.

Zhang e Xia (2015) tratam um problema de despacho de caminhões e alocação de escavadeiras em uma mina de minério de ferro. O objetivo é minimizar o custo operacional com os equipamentos de carga e transporte. Os autores propuseram um modelo matemático de programação inteira para resolvê-lo.

Kumar e Chatterjee (2017) trabalha com um estudo de caso em uma mina indiana de carvão para tratar um problema de sequenciamento de produção considerando a blendagem de minério e a existência de pilhas de estoque. Uma programação linear inteira mista é utilizada para maximizar o valor presente líquido (VPL) e suas restrições tratam de limites superiores e inferiores nas características de produção e qualidade. Os autores diferenciam o próprio trabalho dos outros encontrados na literatura por utilizar pilhas de estoque para material propenso à combustão espontânea, o que obriga certos cuidados como restringir o uso das pilhas dentro de um período de incubação e assegurar que todo carvão em uma pilha seja usado antes de adicionar nova quantidade de minério de carvão.

Em Koryagin e Voronov (2017), os autores desenvolveram um algoritmo heurístico para tomada de decisão em um problema de alocação dinâmica de caminhões e equipamentos de carga em uma mina de carvão. Nos resultados apresentados os autores mostraram uma redução no tempo ocioso dos equipamentos de carga e transporte.

Semelhante ao estudo Zhang e Xia (2015), os trabalhos de Pérez *et al.* (2018) e de Ozdemir e Kumral (2019), também tratam da alocação de equipamentos de transporte e de carga. Em Pérez *et al.* (2018), é tratado um problema de alocação de equipamentos de transporte de materiais perigosos, como explosivos. Para resolver o problema é proposto um modelo matemático que busca minimizar os custos com o transporte. O modelo foi validado utilizando dados de uma mina de cobre. Já em Ozdemir e Kumral (2019), os autores tratam um problema de despachos de caminhões e alocação de escavadeiras, no qual a compatibilidade entre caminhões e escavadeiras é considerada. Para resolver o problema é proposto um método de otimização baseado em simulação e programação linear. Nos experimentos computacionais o método proposto obteve um ganho de 9,4% na quantidade de minério transportado.

Em Silva-Júnior *et al.* (2019), um modelo de programação matemática por metas é apresentado para resolver um problema de planejamento operacional de lavra de curto prazo, que envolve a blendagem de minério de ferro e a alocação de equipamentos de carga e transporte. Os objetivos são minimizar os desvios das metas de produção e de qualidade, da especificação de qualidade, além do número de caminhões utilizados. O modelo foi validado utilizando dados reais de uma mina.

Em Silva *et al.* (2019), os autores desenvolveram um modelo matemático para a blendagem de pilhas em uma mina de níquel. Os objetivos são minimizar os desvios nas metas de qualidade e de produção, além de minimizar o número de pilhas utilizadas. O processo de blendagem de minério também aparece em terminais portuários.

Upadhyay e Askari-Nasab (2019) apresentam um modelo de programação linear inteira mista como suporte à tomada de decisão para alocação dinâmica de equipamentos de carga. O sistema proposto foi aplicado em um modelo de simulação de eventos discretos. Bakhtavar e Mahmoudi (2020) desenvolveram um modelo de *Scenario-Based Robust Optimization* (SBRO) para resolver um problema de alocação de caminhões e equipamentos de carga, ambos de frota heterogênea. Os autores validaram o método proposto utilizando dados de uma mina

de cobre.

Benlaajili *et al.* (2020) propõe um modelo desenvolvido em duas etapas para otimizar um sistema de despacho de transporte de carga. A primeira etapa aborda o problema de alocação de equipamentos de carga como um problema de roteamento de veículo. A segunda etapa utiliza um modelo de programação linear inteira mista para determinar o número ótimo de viagens de caminhões. Este trabalho se diferencia por considerar frotas heterogêneas de equipamentos de carga e transporte com diferentes capacidades.

Em Haonan *et al.* (2021), os autores tratam um problema de blendagem de minério em um terminal portuário com o objetivo de atender as metas de qualidade requisitadas pelos clientes. O minério a ser blendado é proveniente de diversas minas e portos. Os autores propõem um método heurístico híbrido para tratar o problema.

Flores-Fonseca *et al.* (2021) propuseram dois modelos matemáticos de programação linear inteira mista para tratar um problema de planejamento de uma mina de cobre. O primeiro modelo determina o instante que cada frente de mina terá material retomado e qual o destino (pilhas ou usinas). O segundo modelo realiza a alocação dos equipamentos de carga. Os solucionadores CPLEX e Gurobi foram usados para solucionar os problemas.

Martins e Souza (2021) propuseram um modelo matemático com quatro objetivos resolvidos hierarquicamente para o planejamento de curto prazo de uma mina de ferro. Foram gerados 24 cenários, alterando tanto o número de equipamentos de carga alocados, quanto a tolerância das metas da usina. Cenários com poucos equipamentos de carga geraram desvios maiores nas metas.

Mohtasham *et al.* (2021) utilizam uma mina de cobre no Irã para realizar um estudo de caso. Os autores apresentaram um modelo baseado em programação de metas restritas aleatórias para resolver o problema que possui natureza estocástica. O modelo trata um problema de alocação de equipamentos de carga e transporte e blendagem de minério. A formulação matemática possui função multi-objetiva e procura minimizar os desvios da meta de produção negativa, os custos de operação dos caminhões e os desvios das metas de qualidade, além de maximizar a utilização dos equipamentos de carga.

Manríquez *et al.* (2022) trabalham com problemas de blendagem e alocação de equipamentos de carga, incluindo pilhas de estoque. O modelo de otimização proposto considera também o tempo de deslocamento dos equipamentos de carga em suas restrições e tem como base metodológica programação matemática multi-objetiva e um método hierárquico para gerar soluções de curto prazo em uma mina de ferro a céu aberto.

Este trabalho se difere dos encontrados na literatura recente por tratar simultaneamente as seguintes características: *i*) existe o controle de blendagem de minério; *ii*) o *blend* é formado por minério proveniente de pilhas de estoque e de frentes de lavra; *iii*) trata-se de uma mina de cobre a céu aberto. Portanto, possui algumas características distintas de minas de outros tipos de minério; *iv*) trata a compatibilidade entre os equipamentos de carga e os locais de operação; *v*) existe um conjunto de pilhas e frentes de lavras obrigatórias a serem utilizadas

no planejamento. A obrigatoriedade pode ser por diversos motivos, como localização estratégica, liberação de espaço, quantidade de material armazenado, entre outros; *vi*) existe uma taxa mínima de operação para cada equipamento de carga utilizado. Esta taxa mínima tem a finalidade de evitar a ociosidade do equipamento de carga no turno. ; *vii*) há um número máximo de pilhas/frentes que cada equipamento pode operar em um horizonte de planejamento, devido à capacidade de locomoção destes equipamentos; *viii*) considera-se que cada equipamento de carga pode estar disponível ou não para o planejamento do próximo turno. A indisponibilidade pode ocorrer por diversos motivos, como parada para manutenções; *ix*) a função objetivo busca minimizar o desvio das metas de qualidade e os desvios das metas de produção.

A Tabela 2.1 sumariza esta comparação.

Tabela 2.1: Comparação com trabalhos recentes da literatura.

Referências	Características								
	<i>i</i>	<i>ii</i>	<i>iii</i>	<i>iv</i>	<i>v</i>	<i>vi</i>	<i>vii</i>	<i>viii</i>	<i>ix</i>
Xi-jin <i>et al.</i> (2009)	✓								
Souza <i>et al.</i> (2010)	✓					✓			✓
Qinghua <i>et al.</i> (2010)	✓							✓	
Kumar e Chatterjee (2017)	✓	✓			✓				
Koryagin e Voronov (2017)				✓		✓		✓	
Pérez <i>et al.</i> (2018)			✓						
Ozdemir e Kumral (2019)				✓		✓			
Silva-Júnior <i>et al.</i> (2019)	✓								✓
Silva <i>et al.</i> (2019)	✓								✓
Upadhyay e Askari-Nasab (2019)						✓	✓	✓	✓
Bakhtavar e Mahmoudi (2020)			✓			✓			
Benlaajili <i>et al.</i> (2020)				✓				✓	
Haonan <i>et al.</i> (2021)	✓								
Flores-Fonseca <i>et al.</i> (2021)		✓	✓			✓			
Martins e Souza (2021)									✓
Mohtasham <i>et al.</i> (2021)	✓	✓	✓						✓
Manríquez <i>et al.</i> (2022)	✓	✓							
Proposta desta dissertação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.2. Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados trabalhos da literatura que tratam de blendagem de minério e de alocação de equipamentos de carga na mineração. Ao final, também é realizada uma comparação do estudo proposto nesta dissertação com estes trabalhos da literatura.

3. Caracterização do problema

Neste capítulo é realizada a caracterização do problema em estudo. Na Seção 3.1 apresenta-se a descrição do problema de planejamento estudado e, na Seção 3.2, as considerações finais.

3.1. Planejamento da blendagem de minério e alocação de equipamento de carga

O problema de planejamento de blendagem e alocação de equipamentos de carga acontece na interface entre a mina de cobre e a usina de beneficiamento, que realiza a geração do produto final a ser entregue para os clientes.

A seguir, apresenta-se a interface entre extração do minério na mina e alimentação na Figura 3.1.

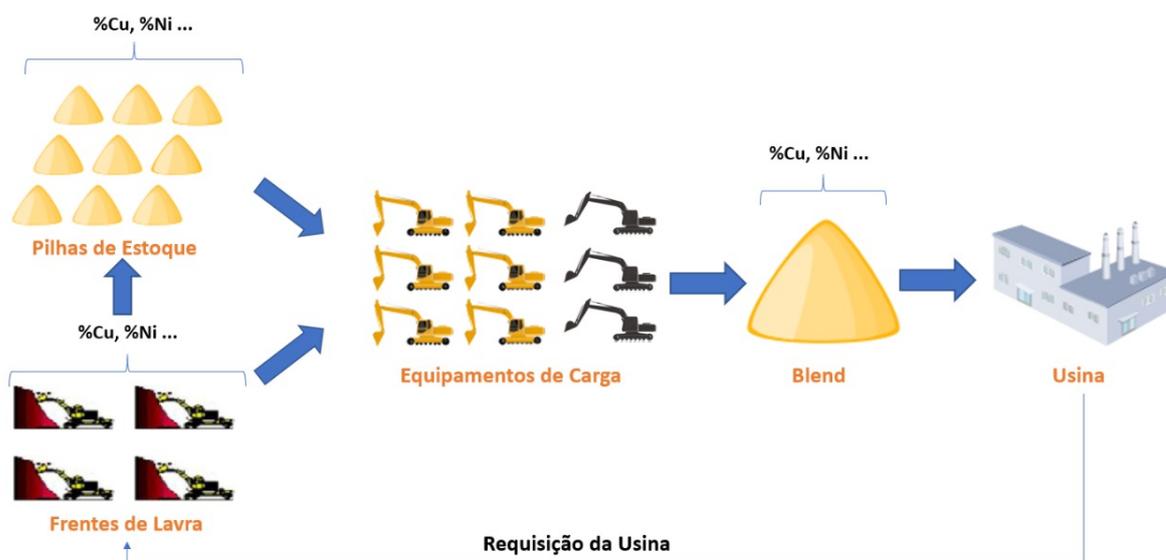


Figura 3.1: Interface entre frentes de lavra, pilhas e usina

A usina de beneficiamento pode receber minério oriundo de dois setores distintos, direto das frentes de lavra ou das pilhas de estoques, que são formadas por minério proveniente das frentes de lavra e que não foram destinados de maneira direta para a usina. Para cada frente de lavra e cada pilha existe uma medição, realizada em laboratórios físicos-químicos, dos parâmetros de controle de qualidade, por exemplo, teores de ferro, de cobre, de flúor, entre outros. Além disso, cada um dos alimentáveis (frentes e pilhas) possui uma taxa de retomada de minério a ser considerada no planejamento, em toneladas por hora. A grande variedade na qualidade do minério viabiliza a entrega de um produto com maior valor agregado e que atenda às necessidades dos clientes, se houver uma blendagem otimizada.

O material utilizado na blendagem das frentes e pilhas é retomado por meio de uma frota de equipamentos de carga (pás mecânicas ou escavadeiras). Cada equipamento de carga possui uma capacidade de produção e uma compatibilidade com pilhas e frentes específicas. A compatibilidade é devido à localização dos equipamentos em relação às pilhas e frentes, à capacidade de deslocamento dos equipamentos e ao porte de cada um deles.

Neste problema de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga, o horizonte de planejamento é de um turno de trabalho. Assim, para cada turno, a usina requisita a formação do planejamento do *blend* com uma meta de produção e seus limites, mínimo e máximo. A meta de produção corresponde ao ritmo requisitado pela usina para alimentação do britador, sendo penalizado, assim, tanto os desvios negativos quanto os positivos. Além disso, também é requisitada a meta de cada parâmetro de controle de qualidade e seus limites, mínimo e máximo. Por fim, algumas características adicionais também são apontadas na requisição, como a utilização obrigatória de algumas pilhas e frentes, respeitar as taxas de operação dos equipamentos de carga e as capacidades das frentes e pilhas disponíveis.

Diante da requisição da usina, a equipe de planejamento da mina deve fornecer o plano para o próximo turno com as seguintes informações: *i*) Pilhas e frentes selecionadas que serão utilizadas na formação do plano de blendagem; *ii*) A quantidade de minério a ser retomado nas pilhas e frentes selecionadas; *iii*) Os equipamentos de carga que serão utilizados; *iv*) As pilhas e frentes onde os equipamentos selecionados serão direcionados; *v*) A quantidade minério a ser retomado por cada equipamento em cada pilha/frente. Por fim, o planejamento construído é encaminhado para as equipes de operação que irão colocá-lo em prática no próximo turno.

Para facilitar o entendimento, apresenta-se a seguir um exemplo fictício de pequeno porte do problema em estudo. Neste exemplo tem-se um planejamento com duas pilhas e duas frentes de lavra disponíveis, quatro equipamentos de carga disponíveis e apenas dois parâmetros de controle de qualidade a serem analisados.

Na Tabela 3.1 apresenta-se as características de produção e qualidade das pilhas e frentes de lavra disponíveis. Na Tabela 3.2 mostra-se as especificações dos equipamentos de carga e, por fim, na Tabela 3.3, reporta-se as metas e limites de produção e qualidade requisitados pela usina de beneficiamento.

Tabela 3.1: Características das pilhas e frentes de lavra.

ID Pilha/Frente	Quantidade (t)	Teor dos parâmetros (%)	
		Cobre	Níquel
Pilha 1	15.000	0,5	0,05
Pilha 2	10.000	1,0	0,08
Frente 1	12.000	0,8	0,10
Frente 2	8.000	0,9	0,07

Tabela 3.2: Características dos equipamentos de carga.

	Equipamentos de carga			
	Escavadeira 1	Escavadeira 2	Pá Mecânica 1	Pá Mecânica 2
Capacidade (t)	10.000	8.000	6.000	12.000
Compatibilidade	Frentes	Frentes	Pilhas	Pilhas

Tabela 3.3: Limites de produção e qualidade.

	Limite Inferior	Limite superior	Meta
Produção (t)	25.000	35.000	30.000
Qualidade Cobre (%)	0,5	1,0	0,75
Qualidade Níquel (%)	0,05	0,1	0,075

Por ser um problema reduzido em comparação aos problemas reais encontrados na mina de cobre utilizada para o estudo, a solução ótima pode ser encontrada de maneira rápida por meio da estratégia de tentativa e erros, em uma planilha eletrônica.

A solução ótima para este exemplo é dada a seguir:

1. Deve-se retomar 10.000 toneladas de minério da Pilha 1 utilizando a Pá Mecânica 2;
2. Deve-se retomar 5.000 toneladas da Pilha 2 utilizando a Pá Mecânica 1;
3. Deve-se retomar 10.000 toneladas da Frente 1 utilizando a Escavadeira 1;
4. Deve-se retomar 5.000 toneladas da Frente 2 utilizando a Escavadeira 2.

A Figura 3.2 ilustra o resultado deste planejamento.

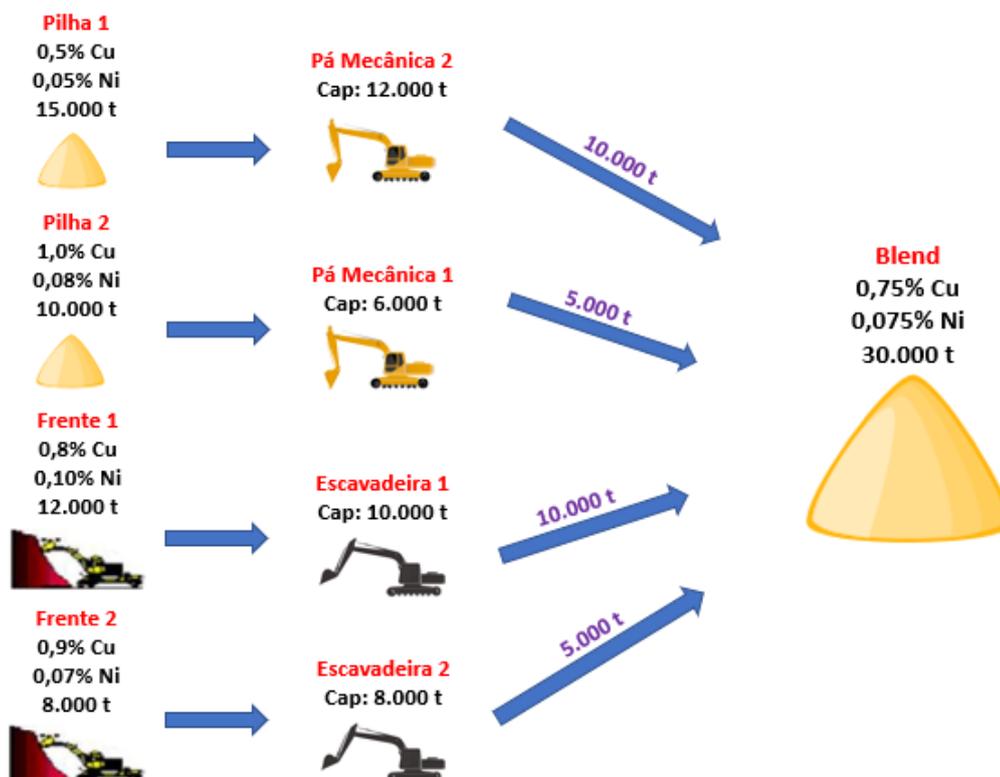


Figura 3.2: Solução do problema exemplificado

Atualmente, a atividade de planejamento da blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga, descrita neste capítulo, é realizada de maneira manual pela equipe de planejamento. A equipe utiliza a estratégia de tentativa e erro para realizá-lo, demandando muito tempo de trabalho (30 minutos a 1 hora) para cada planejamento. Além disso, devido a natureza do problema, sabe-se que em versões grande porte, como as existentes em aplicações reais, não é possível encontrar a solução ótima por meio da estratégia tentativa e erro.

3.2. Considerações finais

O problema tratado neste trabalho foi descrito em detalhes neste capítulo, elucidando o processo produtivo da mina desde as frentes de lavra até a usina de beneficiamento. Além disso, foram apresentadas decisões que devem ser tomadas no processo de planejamento. Um exemplo fictício, de pequeno porte, foi utilizado para facilitar a compreensão do problema em estudo e a elaboração de um planejamento ótimo.

4. Formulação matemática proposta

Neste capítulo é apresentada a formulação linear inteira mista para resolver o problema estudado. Esta formulação é baseada nos trabalhos de Souza *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2019).

Este capítulo é organizado como segue. Na Seção 4.1 são apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis utilizadas na formulação proposta. Na Seção 4.2 descreve-se a formulação matemática. Por fim, na Seção 4.3, são reportadas as considerações finais deste capítulo.

4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis

Os conjuntos, parâmetros e variáveis usadas na formulação são descritos a seguir.

- Conjuntos:

\mathcal{P} : Conjunto de pilhas;

\mathcal{F} : Conjunto de frentes de lavra;

\mathcal{M} : Conjunto formado por $P \cup F$;

\mathcal{Q} : Conjunto dos parâmetros de qualidade;

\mathcal{C} : Conjunto do equipamento de carga;

$\mathcal{P}' \subseteq \mathcal{P}$: Conjunto de pilhas obrigatórias;

$\mathcal{F}' \subseteq \mathcal{F}$: Conjunto de frentes de lavra obrigatórias;

- Parâmetros:

PP'_i : Ritmo de massa mínimo a ser retirado da pilha $i \in \mathcal{P}'$ (ton/h);

PF'_i : Ritmo de lavra mínimo a ser retirado da frente $i \in \mathcal{F}'$ (ton/h);

$TPMIN_i$: Ritmo mínimo de massa a ser retirado de cada pilha/frente $i \in \mathcal{M}$ (ton/h);

QU_i : Ritmo máximo de massa em cada pilha/frente $i \in \mathcal{M}$ (ton/h);

PR : Ritmo de produção recomendado (ton/h);

PL : Ritmo de produção mínimo (ton/h);

PU : Ritmo de produção máximo (ton/h);

α^- : Penalidade por desvio negativo da produção;

α^+ : Penalidade por desvio positivo da produção;

$\bar{\alpha}$: Penalidade de normalização do desvio da produção;

T_{ij} : Teor do parâmetro de qualidade j na pilha/frente $i \in \mathcal{M}$ (%);

TR_j : Teor recomendado do parâmetro de qualidade j ;

- TL_j : Teor mínimo admissível do parâmetro de qualidade j ;
 TU_j : Teor máximo admissível do parâmetro de qualidade j ;
 β_j^- : Penalidade por desvio negativo em relação ao valor meta para o parâmetro j ;
 β_j^+ : Penalidade por desvio positivo em relação ao valor meta para o parâmetro j ;
 $\bar{\beta}$: Penalidade de normalização do desvio da qualidade;
 CA_k : Estimativa de capacidade produtiva do equipamento de carga k (ton/h);
 $TPMINEQ_k$: Ritmo mínimo de massa a ser retirado por cada equipamento $k \in \mathcal{C}$ (ton/h);
 $TAXMINEQ_k$: Taxa mínima de operação do equipamento $k \in \mathcal{C}$ (%);
 $MAXOP_k$: Número máximo de pilhas/frentes que o equipamento $k \in \mathcal{C}$ pode operar;
 $COMP_{ki}$: $\begin{cases} 1 & \text{Se o equipamento de carga } k \text{ é compatível com a pilha/frente } i \in \mathcal{M}; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
 $DISP_k$: $\begin{cases} 1 & \text{Se o equipamento de carga } k \text{ está disponível;} \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$

- Variáveis auxiliares e de decisão:

- x_i : Ritmo de massa a ser retirada da pilha/frente $i \in \mathcal{M}$ (ton/h);
 dm_j^+ : Desvio positivo em relação ao recomendado do parâmetro j na mistura (ton/h);
 dm_j^- : Desvio negativo em relação ao recomendado do parâmetro j na mistura (ton/h);
 dp^- : Desvio negativo da massa total a ser retirada em relação ao recomendado (ton/h);
 dp^+ : Desvio positivo da massa total a ser retirada em relação ao recomendado (ton/h);
 rm_{ik} : Ritmo de material retomado pelo equipamento k na pilha/frente $i \in \mathcal{M}$;
 $toteq_k$: Ritmo total de material retomado pelo equipamento $k \in \mathcal{C}$;
 y_i : $\begin{cases} 1 & \text{Se a pilha/frente } i \in \mathcal{M} \text{ é utilizada;} \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
 z_{ik} : $\begin{cases} 1 & \text{Se o equipamento de carga } k \text{ opera na pilha/frente } i \in \mathcal{M}; \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$

4.2. A formulação matemática

O modelo matemático do problema é apresentado abaixo:

$$\min \bar{\alpha} \left(\alpha^- \frac{dp^-}{PR-PL} + \alpha^+ \frac{dp^+}{PU-PR} \right) + \bar{\beta} \left(\sum_{j \in \mathcal{Q}} \beta_j \frac{dm_j^- + dm_j^+}{\max\{(TU_j PU - TR_j Pr), (TR_j PR - TL_j PL)\}} \right) \quad (4.1)$$

Restrições de normalização:

$$\bar{\alpha} + \bar{\beta} = 1 \quad (4.2)$$

$$\alpha^- + \alpha^+ = 1 \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{Q}} \beta_j = 1 \quad (4.4)$$

Restrições de qualidade:

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} (T_{ij} - TU_j)x_i \leq 0 \quad \forall j \in \mathcal{Q} \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} (T_{ij} - TL_j)x_i \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{Q} \quad (4.6)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} (T_{ij} - TR_j)x_i + dm_j^- - dm_j^+ = 0 \quad \forall j \in \mathcal{Q} \quad (4.7)$$

Restrições de produção:

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} x_i \leq PU \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} x_i \geq PL \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} x_i - PR + dp^- - dp^+ = 0 \quad (4.10)$$

$$x_i - QU_i \leq 0 \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.11)$$

$$\frac{x_i}{QU_i} \leq y_i \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.12)$$

$$y_i \times TPMIN_i \leq x_i \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.13)$$

$$x_i \geq PP'_i \quad \forall i \in \mathcal{P}' \quad (4.14)$$

$$x_i \geq PF'_i \quad \forall i \in \mathcal{F}' \quad (4.15)$$

Restrições de equipamentos:

$$z_{ik} \leq COMP_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \quad (4.16)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{C}} z_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} z_{ik} \leq MAXOP_k \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (4.18)$$

$$z_{ik} \geq \frac{rm_{ik}}{CA_k} \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \quad (4.19)$$

$$rm_{ik} \geq z_{ik} \times TPMINEQ_k \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \quad (4.20)$$

$$x_i = \sum_{k \in \mathcal{C}} rm_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.21)$$

$$totEq_k = \sum_{i \in \mathcal{M}} rm_{ik} \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (4.22)$$

$$CA_k \times TAXMINEQ_k \times z_{ik} \leq totEq_k \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \quad (4.23)$$

$$CA_k \geq totEq_k \quad \forall k \in \mathcal{C} \quad (4.24)$$

$$z_{ik} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \mid DISP_k = 0 \quad (4.25)$$

Domínio das variáveis:

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.26)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{M} \quad (4.27)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{C} \quad (4.28)$$

$$dm_j^+, dm_j^- \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{Q} \quad (4.29)$$

$$dp^+, dp^- \geq 0 \quad (4.30)$$

A função objetivo do problema é descrita pela Equação(4.1) e pode ser dividida em duas parcelas. Na primeira parcela busca-se minimizar os desvios da produção em relação à meta estabelecida. Os parâmetros α^- e α^+ representam os pesos dados a uma produção abaixo e acima da meta, respectivamente. A minimização dos desvios de qualidade dos parâmetros de controle é tratada na segunda parcela da função objetivo. Os parâmetros β_j^- e β_j^+ são os pesos dados a um desvio abaixo e acima da meta de qualidade para cada parâmetro de controle j , respectivamente. O parâmetro $\bar{\alpha}$ indica a penalidade de peso global para o desvio da meta de produção e o parâmetro $\bar{\beta}$ indica a penalidade de peso global para o desvio da meta de qualidade. As penalidades de peso devem satisfazer as restrições (4.2),(4.3) e (4.4). Note que as parcelas da função objetivo são normalizadas, uma vez que elas possuem unidades de medidas e grandezas diferentes entre si. A normalização ocorre para adequar a comparação entre essas medidas e grandezas.

As restrições (4.5) e (4.6) garantem que os limites máximos e mínimos dos parâmetros de controle sejam respeitados. Pelo conjunto de restrições (4.7) calcula-se os desvios negativo

e positivo em relação à meta de qualidade. As restrições (4.8) e (4.9) garantem que o ritmo de produção respeite os limites máximo e mínimo, respectivamente. A restrição (4.10) define os desvios em relação ao ritmo de produção recomendado. O ritmo de produção em cada pilha ou frente não pode superar o seu ritmo máximo, isso é assegurado pelas restrições (4.11). O conjunto de restrições (4.12) define quais pilhas ou frentes estão ativas. As restrições (4.13) garantem que o ritmo mínimo de uma pilha/frente seja respeitado. Em aplicações reais não é viável economicamente manter um ritmo muito baixo em uma pilha ou frente de lavra. As restrições (4.14) e (4.15) asseguram que seja retomado uma quantidade maior que o mínimo pré-estabelecido para as pilhas/frentes obrigatórias.

A seguir, descreve-se as restrições referentes aos equipamentos de carga. Nas restrições (4.16) são garantidas a compatibilidade entre pilhas/frentes e os equipamentos de carga. As restrições (4.17) definem que para cada pilha/frente deve ser alocado no máximo um equipamento de carga. Já as restrições (4.18) asseguram que o limite de pilhas/frentes que cada equipamento de carga pode operar em um turno é respeitado. As restrições (4.19) definem qual equipamento de carga está sendo utilizado. O ritmo mínimo de operação de cada equipamento de carga em cada pilha/frente é garantido pelas restrições (4.20). As restrições (4.21) asseguram que todo o material retirado de cada pilha/frente é dado pelo somatório de minério retomado pelos os equipamentos de carga alocados a ela. Nas restrições (4.22), é calculado o ritmo total para cada equipamento de carga. A taxa mínima de produção total em relação à capacidade de cada equipamento de carga é garantida pelas restrições (4.23). As restrições (4.24) não permitem que seja retirado mais minério que um equipamento de carga consiga retomar. Por fim, o conjunto de restrições (4.25) assegura que apenas equipamentos de carga disponíveis sejam alocados. O domínio das variáveis é definido nas restrições (4.26), (4.27), (4.28), (4.29) e (4.30).

4.3. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o modelo matemático com os seus conjuntos, parâmetros, variáveis auxiliares, variáveis de decisão, função objetivo e restrições. A seguir, no próximo capítulo, é apresentada a implementação da formulação linear inteira mista proposta na forma de um sistema de suporte à decisão.

5. Implementação do sistema de suporte à decisão

Neste capítulo é apresentada a implementação do sistema de suporte à decisão baseado na formulação matemática do capítulo anterior. Inicialmente, a formulação foi implementada no resolvidor Gurobi, versão 6.5.1. Posteriormente, a interface gráfica para a entrada de dados do problema e exibição formatada dos resultados foi realizada por meio da plataforma Azure, da Microsoft. Esta plataforma permite executar serviços e aplicativos na nuvem, permitindo aos usuários (engenheiros, geólogos e responsáveis pelo planejamento da mina) acesso online ao sistema de suporte à decisão proposto.

A organização deste capítulo é dada como segue. Na Seção 5.1 reporta-se como é realizada a interação do usuário com o sistema de suporte à decisão proposto. Já a Seção 5.2, apresenta as considerações finais deste capítulo.

5.1. Interação do usuário com o sistema proposto

A entrada dos dados foi dividida em quatro etapas: *i)* especificação dos parâmetros de controle de qualidade; *ii)* especificação da produtividade; *iii)* especificação dos equipamentos de carga; *iv)* especificação das pilhas e frentes de lavra. Além disso, o sistema possui validação da entrada de dados, impossibilitando o avanço sem o devido ajuste.

Na Figura 5.1 é possível visualizar a entrada dos dados dos parâmetros de qualidade para cada elemento químico considerado, sendo eles os teores mínimos, recomendados e máximos, além da criticidade.

Dados de Entrada

1 Especificação dos Parâmetros de Qualidade
Planejamento para o próximo turno

Cu	Ni	Cl	F	Au
Mínimo (%) 0,5	Mínimo (ppm) 0	Mínimo (ppm) 0	Mínimo (ppm)	Mínimo (ppm) 0
Recomendado (%) 0,8	Recomendado (ppm) 0	Recomendado (ppm) 0	Recomendado (ppm)	Recomendado (ppm) 0,24
Máximo (%) 1,5	Máximo (ppm) 0,05	Máximo (ppm) 0,7	Máximo (ppm) 0,1	Máximo (ppm) 1
Criticidade Crítico	Criticidade Importante	Criticidade Importante	Criticidade Irrelevante	Criticidade Importante

VOLTAR PRÓXIMO

2 Especificação de Produtividade

3 Especificação de Equipamentos de Carga

Figura 5.1: Entrada dos dados dos parâmetros de controle de qualidade

A seguir, a entrada de dados da especificação de produção é apresentada na Figura 5.2.

As informações de entrada são as criticidades por desvio negativo e positivo da meta de produção, a taxa mínima, a recomendada e a máxima de produção..

Dados de Entrada

1 Especificação dos Parâmetros de Qualidade

2 Especificação de Produtividade
Planejamento para o próximo turno

Ritmo de Produção

Mínimo (t/h) *
1800

Recomendado (t/h) *
2000

Máximo (t/h) *
2300

Turno e Penalidades

Tempo Total (h) *
Diurno (9h)

Penalidade por Desvio Negativo da Produção *
Crítico

Penalidade por Desvio Positivo da Produção *
Crítico

VOLTAR **PRÓXIMO**

3 Especificação de Equipamentos de Carga

Figura 5.2: Entrada dos dados de produção

Na terceira etapa, são inseridos os dados dos equipamentos de carga. O botão amarelo no canto superior esquerdo da Figura 5.3 permite adicionar novos equipamentos. Além disso, o símbolo de lixeira ao lado de cada nome dos equipamentos de carga permite excluí-lo.

3 Especificação de Equipamentos de Carga
Mantenha selecionado todos os equipamentos disponíveis para o próximo turno

NOVO EQUIPAMENTO +

ES1	ES2	ES3	ES4	ES5
Projeção Diária (t/h) 476	Projeção Diária (t/h) 980	Projeção Diária (t/h) 700	Projeção Diária (t/h) 900	Projeção Diária (t/h) 1800
Qtde Máx de Pilha/Frente 1				
Ritmo Min por Pilha/Frente (t/h) 100				
Taxa Min de Utilização (%) 80				
ES6	ES7	ES8	PM1	PM2
Projeção Diária (t/h) 980	Projeção Diária (t/h) 1300	Projeção Diária (t/h) 1300	Projeção Diária (t/h) 1500	Projeção Diária (t/h) 1500
Qtde Máx de Pilha/Frente 1	Qtde Máx de Pilha/Frente 1	Qtde Máx de Pilha/Frente 1	Qtde Máx de Pilha/Frente 3	Qtde Máx de Pilha/Frente 3
Ritmo Min por Pilha/Frente (t/h)				

Figura 5.3: Entrada dos dados de equipamentos de carga

Na última etapa, tem-se a entrada de dados das pilhas e frentes de lavra, como mostra a

Figura 5.4. Uma nova fonte de minério pode ser adicionada ao clicar no botão com o símbolo de + logo a frente do tipo de fonte que deseja acrescentar (Pilha ou Frente de Lavra).

4 Especificação de Pilhas e Frentes de Lavra
Planejamento para o próximo turno

Frente de Lavra +	Pilha +
F1	P1
F2	P2
F3	P3
F4	P4
F5	P5
F6	P6
F7	
F8	

VOLTAR REVISAR DADOS

Figura 5.4: Entrada dos dados pilhas e frentes de lavra

Ao clicar em uma pilha ou frente de lavra é possível acessar os dados detalhados de cada pilha/frente e editá-los. A Figura 5.5 apresenta um exemplo de acesso aos dados da frente F1. Nesta tela é possível excluir a frente, alterar o ritmo mínimo obrigatório (t/h), alterar a massa total disponível (t) e editar os dados de compatibilidade com os equipamentos de carga (ícone de escavadeira) e os dados dos teores (ícone de tubo de ensaio).

4 Especificação de Pilhas e Frentes de Lavra
Planejamento para o próximo turno

Frente de Lavra +	Pilha +						
<div><p>F1</p><p>Uso Obrigatório <input type="checkbox"/></p><p>Ritmo Mínimo Obrigatório (t/h) 100</p><p>Massa Total Disponível (t) 10000</p><p>CANCELAR REMOVER SALVAR ALTERAÇÕES</p></div>	<table><tbody><tr><td>P1</td></tr><tr><td>P2</td></tr><tr><td>P3</td></tr><tr><td>P4</td></tr><tr><td>P5</td></tr><tr><td>P6</td></tr></tbody></table>	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1							
P2							
P3							
P4							
P5							
P6							
F2							
F3							

Figura 5.5: Entrada dos dados de uma frente de lavra

Ao clicar no ícone da escavadeira, é possível adicionar ou remover a compatibilidade de um equipamento de carga com as pilhas e frentes, conforme ilustrado na Figura 5.6.

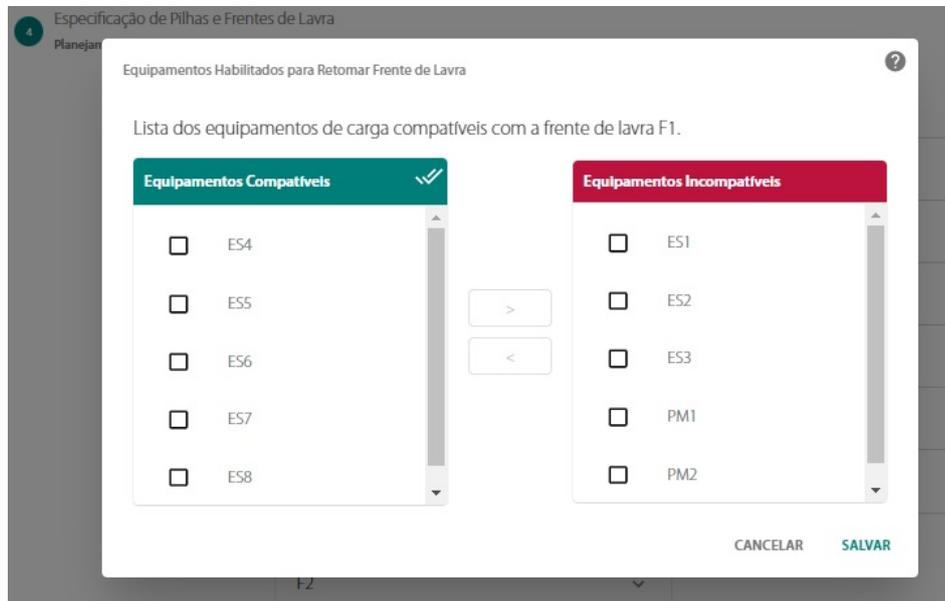


Figura 5.6: Entrada dos dados de compatibilidade entre equipamentos de carga e pilhas/frentes

De maneira similar, ao clicar no ícone do tubo de ensaio, é possível alterar os teores dos parâmetros de controle de qualidade de uma pilha ou de uma frente de lavra, como o exemplo apresentado na Figura 5.7.

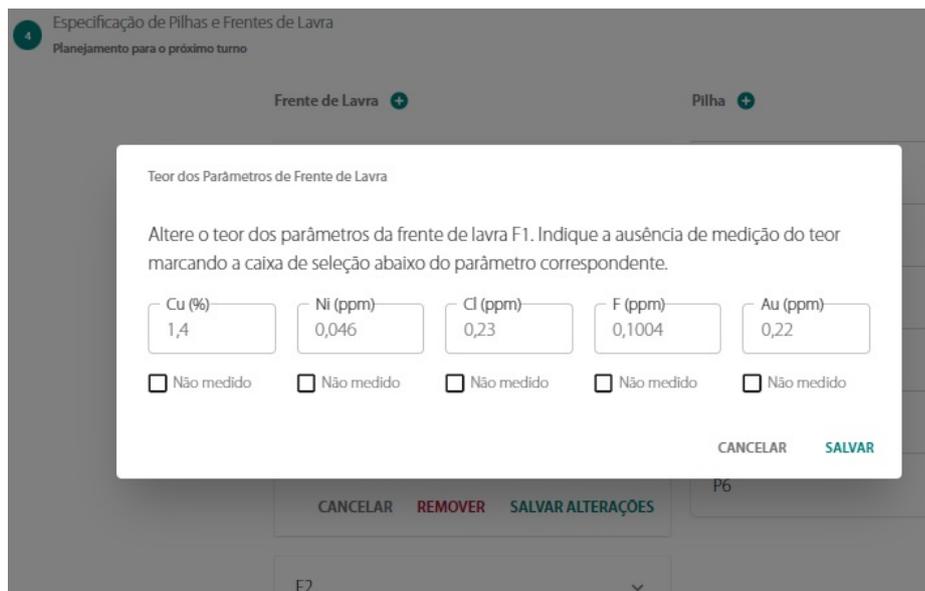


Figura 5.7: Entrada dos dados dos teores de uma frente de lavra

A seguir, o usuário deve clicar no botão “Solucionar” para o sistema resolver o problema

de planejamento, conforme ilustrado na Figura 5.8.

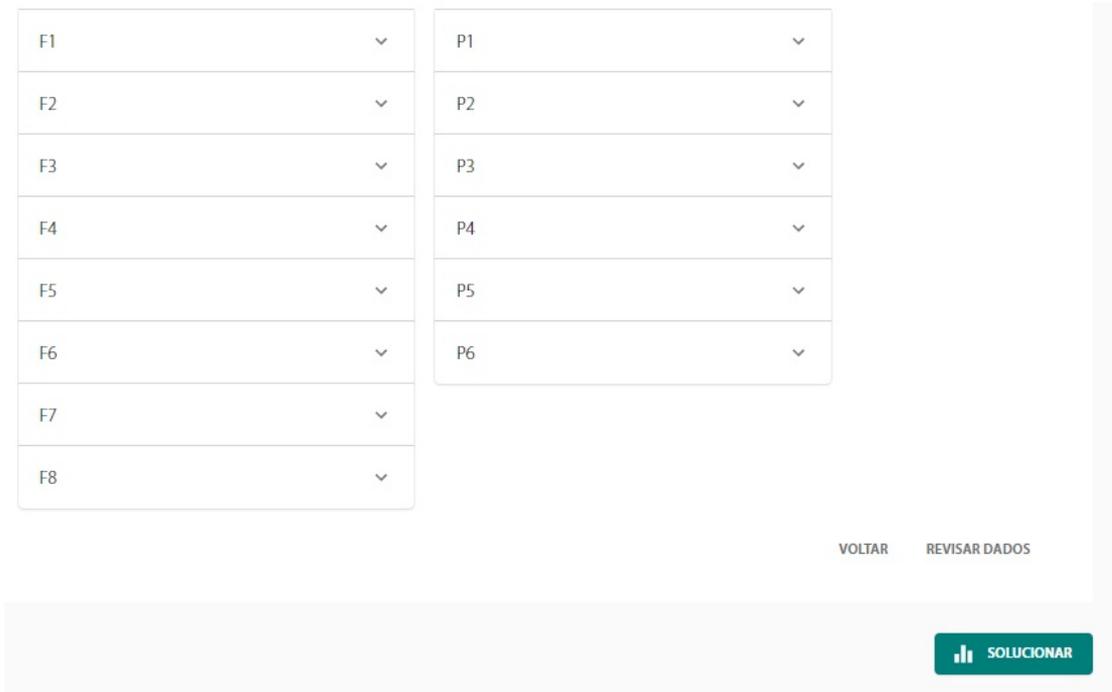


Figura 5.8: Localização do botão utilizado para solucionar o problema

Após o clique, o resolvidor Gurobi será acionado e encontrará uma solução para o problema de planejamento.

A seguir, o usuário irá visualizar os resultados do planejamento conforme ilustrado no exemplos das Figuras 5.9 5.10 e 5.11.

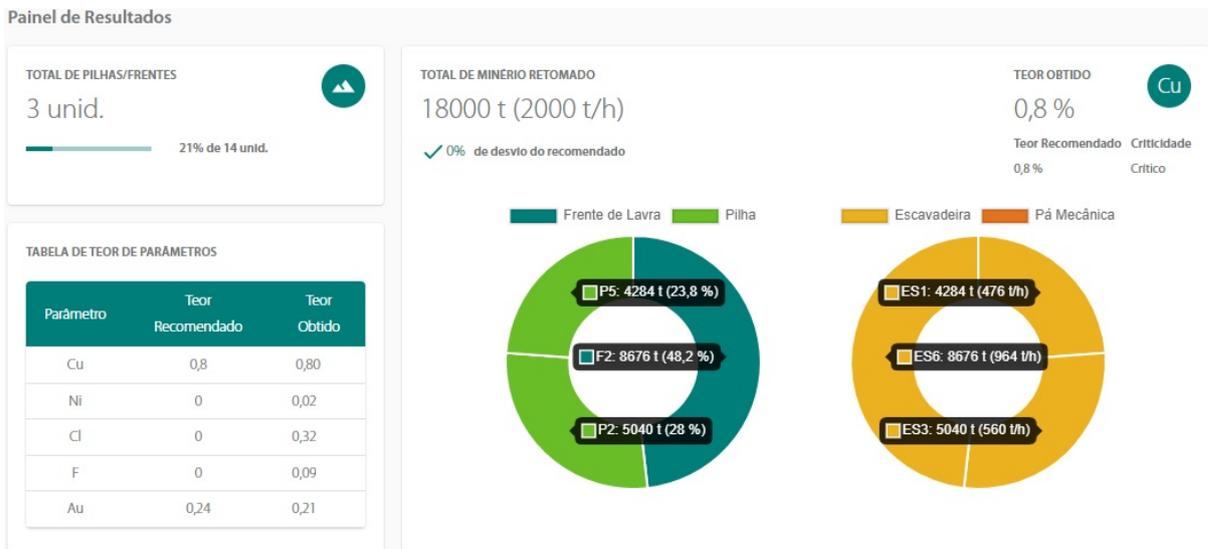


Figura 5.9: Solução ótima



Figura 5.10: Resposta do modelo para a alocação dos equipamento de carga



Figura 5.11: Ociosidade e taxa de produção dos equipamentos de carga

Na Figura 5.9 estão apresentados o número total de pilhas/frentes utilizadas e a tabela com os dados dos teores dos parâmetros de controle. Além disso, são reportados em gráficos as pilhas/frentes e equipamentos de carga selecionados para o planejamento, assim como a quantidade de minério a ser retomado em cada um deles.

A seguir, na Figura 5.10, um gráfico reporta de maneira mais detalhada onde cada equipamento de carga foi alocado e a quantidade de minério que ele irá retomar.

Na Figura 5.11, a ociosidade dos equipamentos de carga é apresentada no gráfico da esquerda, enquanto o gráfico da direita reporta a taxa de produção do turno juntamente com a taxa mínima permitida para cada equipamento de carga.

Além disso, o usuário do sistema pode exportar um relatório do planejamento gerado em dois formatos, PDF e planilha eletrônica. Para isso, ele deve clicar no botão “Exportar Relatório” localizado no canto inferior esquerdo conforme ilustrado na Figura 5.11. Estes relatórios são utilizados para repassar o planejamento para a equipe de operação que atuará na sua

execução no próximo turno.

5.2. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a estrutura do sistema desenvolvido, dando destaque à interação com o usuário. Por meio de figuras foi apresentado o passo a passo de como os dados são inseridos no sistema, a geração do planejamento pelo otimizador e a saída de dados.

6. Experimentos computacionais

Os experimentos foram executados em um computador com processador Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670 v3, 2,3 GHz, 16 GB de memória RAM, 3 processadores e sistema operacional Windows Server 2012. Dados reais da mina de Sossego da Vale S.A, em Canaã dos Carajás-PA, foram utilizados para validar o modelo.

O capítulo é organizado com segue. Na Seção 6.1 são apresentados os cenários utilizados nos experimentos. Já na Seção 6.2 são discutidos os resultados parciais. Por fim, na Seção 6.3 são reportadas as considerações finais.

6.1. Definição de cenários

Nos dados coletados na mina de Sossego existem 8 frentes de lavra e 6 pilhas disponíveis. Para a retomada do minério nas pilhas e frentes de lavra existem 10 equipamentos de carga. Para controle de qualidade do minério nas pilhas e frentes são analisados 5 parâmetros de controle, como teor de cobre e de ouro. As pilhas e frentes disponíveis possuem minério com diferentes teores. Por exemplo, o teor de cobre varia de 0,25% até 1,40%, já o teor de ouro varia de 0,02% até 0,62%.

A Tabela 6.1 mostra as características das pilhas e frentes disponíveis. Os parâmetros de controle para análise do minério são os teores de cobre (Cu), de níquel (Ni), de cloro (Cl), de flúor (F) e de ouro (Au). A tabela é organizada com segue: *i*) na primeira coluna é apresentado o ID da pilha ou frente; *ii*) na segunda coluna é mostrado o ritmo máximo de produção que uma pilha ou frente pode operar, o que está diretamente relacionado à quantidade de minério disponível; *iii*) na terceira coluna apresenta-se o ritmo mínimo de produção para retomar minério de uma pilha ou frente, devido aos custos operacionais; *iv*) a obrigatoriedade de operação em uma pilha ou frente é apresentada na quarta coluna; *v*) por fim, nas últimas colunas são apresentados os teores de controle.

Observa-se que a pilha P5 tem obrigatoriedade de operação, isso foi definido pelos geólogos da mina pelo fato dela ter uma grande quantidade de minério armazenado.

Tabela 6.1: Características das pilhas e frentes de lavra.

ID Pilha/Frente	Ritmo Máx. (ton/h)	Ritmo Mín. (ton/h)	Obrigatória (Sim ou Não)	Teor dos parâmetros (%)				
				Cu	Ni	Cl	F	Au
P1	70.398,69	100	Não	0,53	0,042	0,634	0,104	0,15
P2	17.103,19	100	Não	1,18	0,046	0,561	0,091	0,38
P3	12.197,44	100	Não	0,73	0,048	0,573	0,098	0,06
P4	52.417,60	100	Não	0,69	0,038	0,326	0,128	0,20
P5	312.805,11	100	Sim	0,34	0,007	0,350	0,170	0,27
P6	40.958,55	100	Não	0,40	0,023	0,504	0,120	0,13
F1	1.111,11	100	Não	1,40	0,046	0,231	0,100	0,22
F2	1.111,11	100	Não	0,81	0,030	0,186	0,061	0,09
F3	1.111,11	100	Não	1,03	0,035	0,197	0,174	0,10
F4	15.000,00	100	Não	1,15	0,049	0,191	0,082	0,27
F5	4.000,00	100	Não	0,42	0,012	0,307	0,112	0,04
F6	7.777,78	100	Não	0,25	0,005	0,336	0,135	0,02
F7	4.000,00	100	Não	0,49	0,019	0,224	0,058	0,83
F8	1.222,22	100	Não	1,40	0,039	0,565	0,144	0,82

Os equipamentos de carga para a retomada de minério nas pilhas e frentes são divididos em dois grupos: escavadeiras (ES) e pás mecânicas (PM). O conjunto de equipamentos possui características distintas, ou seja, trata-se de uma frota heterogênea.

Na Tabela 6.2 apresenta-se as características dos equipamentos de carga. Na primeira linha mostra-se a capacidade de operação de cada equipamento. A quantidade máxima de pilhas ou frente que cada equipamento pode operar em um único turno é apresentada na segunda linha, nota-se que as pás mecânicas podem ser realocadas em até três locais diferentes no mesmo turno. Na terceira linha mostra-se o ritmo mínimo que os equipamentos devem retomar caso sejam alocados para operar em uma pilha ou frente. Por fim, na última linha é mostrada a taxa mínima de operação dos equipamentos considerando todas as operações no turno. Já que não é viável economicamente utilizar um equipamento abaixo desta taxa de operação.

Tabela 6.2: Características dos equipamentos de carga.

	Equipamentos de carga									
	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8	PM1	PM2
Capacidade (ton/h)	476	980	700	900	1800	980	1300	1300	1500	1500
Quant. Máx. (unid)	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
Ritmo Mín. (ton/h)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Taxa Mín. (%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80

A compatibilidade dos equipamentos de carga para operação em pilhas e frentes é dada na Tabela 6.3. Por exemplo, as pás mecânicas PM1 e PM2 operam apenas nas pilhas.

Tabela 6.3: Compatibilidade dos equipamentos de carga com as frentes e pilhas.

ID Pilhas/Frentes	Compatibilidade dos equipamentos de carga (Sim ou Não)									
	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8	PM1	PM2
P1	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
P2	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
P3	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
P4	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
P5	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
P6	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
F1	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F2	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F3	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F4	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F5	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F6	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F7	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
F8	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não

Devido às grandezas diferentes dos teores de controle, eles tiveram os seus valores normalizados. Na Tabela 6.4 apresenta-se os valores dos pesos utilizados para os teores de controle e para os desvios de produção. A criticidade foi definida de acordo com a equipe de operação da mina em estudo.

Tabela 6.4: Características de Criticidade

Parâmetros	Pesos	Criticidade
$\beta_{Cu}, \alpha^-, \alpha^+$	100	Crítico
$\beta_{Ni}, \beta_{Cl}, \beta_{Au}$	10	Importante
β_F	0	Irrelevante

Dois cenários foram criados com base em situações cotidianas da mina de Sossego com a finalidade de avaliar o modelo de suporte à decisão proposto. Os cenários são:

- Cenário 01: Situação normal de operação da mina com todas as pilhas/frentes e equipamentos de carga disponíveis para um turno de trabalho de 9 horas.
- Cenário 02: Situação de operação em que alguns equipamentos de carga estão inativos para a realização de manutenção. Os equipamentos indisponíveis são: ES1, ES2, ES3, ES4 e ES5. O turno de trabalho também é de 9 horas.

6.2. Análise dos resultados

Na Tabela 6.5 são apresentadas as metas de produção e de qualidade, além dos limites mínimos e máximos aceitos. À direita da tabela são apresentados os resultados obtidos pelo modelo matemático proposto. O modelo matemático precisou de aproximadamente 1 segundo para encontrar a solução ótima em cada cenário.

Tabela 6.5: Valores de Metas e Resultados

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Recomendado	Cenário 01	Cenário 02
Cobre (%)	0,5	1,5	0,8	0,8	0,8
Níquel (%)	0	0,05	0	0,029	0,03
Cloro (%)	0	0,7	0	0,327	0,34
Flúor (%)	0,078	0,1	0,09	0,095	0,1
Ouro (%)	0	1	0,24	0,214	0,225
Ritmo de Produção (ton/h)	1800	2300	2000	2000	2000

Os desvios entre as metas e os resultados encontrados são nulos em todos os parâmetros críticos (taxa de produção e teor de Cu), em ambos os cenários. Para os parâmetros importantes (teor de Ni, de Cl e de Au), o resultado do cenário 01 se mostrou melhor que o do cenário 02, já que no cenário 01 não existia a limitação do uso de equipamentos de carga. A Figura 6.1 ilustra os limites inferiores e superiores dos teores, já a Figura 6.2 mostra os teores obtidos em cada cenário.

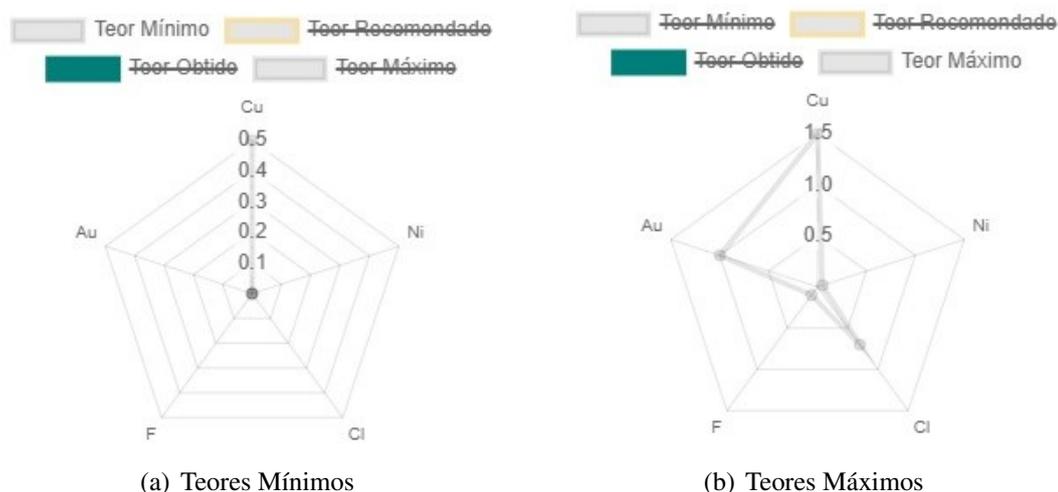


Figura 6.1: Limites dos teores.

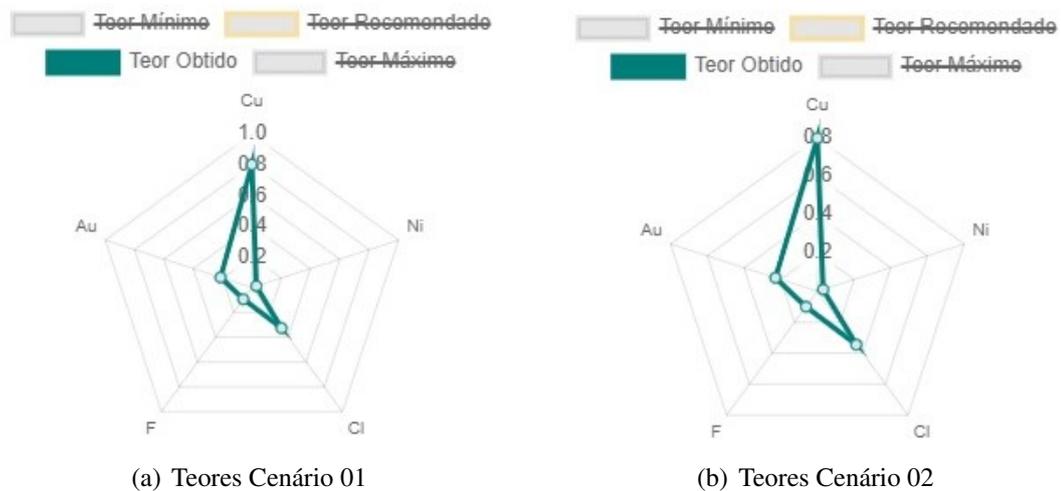


Figura 6.2: Teores obtidos.

Na Tabela 6.6 apresenta-se as pilhas e frentes utilizadas nos cenários 01 e 02. Além disso, mostra-se também a quantidade de material retomado por cada equipamento de carga. Já a Figura 6.3 ilustra os resultados apresentados na tabela.

Tabela 6.6: Valores de Ritmo de Pilhas e Equipamentos

	ID Pilhas/Frentes Utilizadas	Ritmo de Massa Retomado (ton/h)	Equipamentos Utilizados (ton/h)			
			ES1	ES3	ES6	PM1
Cenário 01	P2	560	-	560	-	-
	P5	476	476	-	-	-
	F2	964	-	-	964	-
Cenário 02	P2	579,32	-	-	-	579,32
	P4	163,91	-	-	-	163,91
	P5	456,77	-	-	-	456,77
	F2	800	-	-	800	-

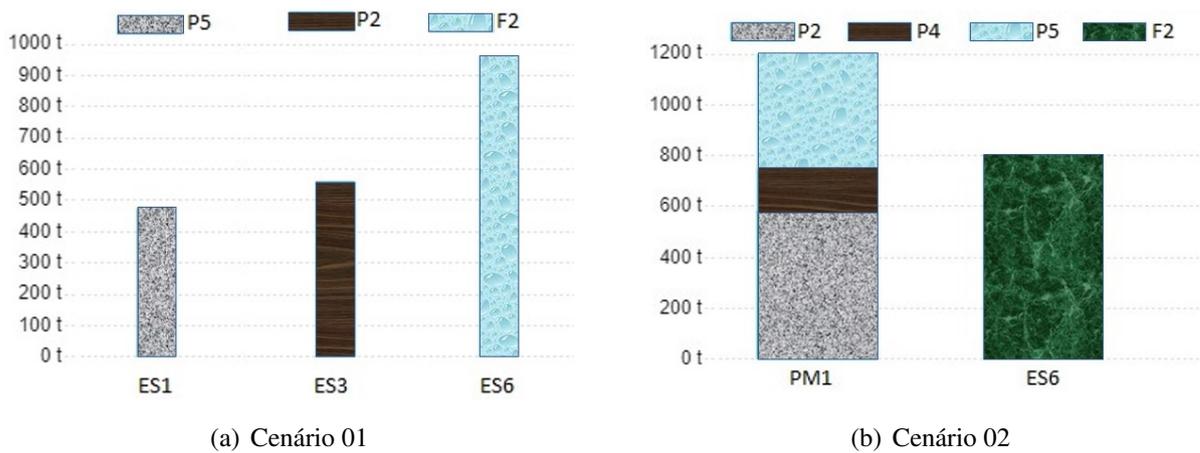


Figura 6.3: Alocação dos equipamentos de carga nas pilhas e frentes.

Observa-se na Tabela 6.6 e na Figura 6.3 que no cenário 01, são selecionadas as pilhas P5 (obrigatória) e P2, além da frente F2. O equipamento de carga ES1 opera na P5, o ES3 opera na P2 e o ES6 opera na F2. Já no cenário 02, ocorre a operação de uma pá mecânica (PM1) em três pilhas diferentes (P2, P4 e P5) e de uma escavadeira (ES6) para operar na frente F2.

Por fim, para avaliar o desempenho do modelo matemático em problemas maiores, ele foi executado para uma instância fictícia com 120 pilhas/frentes, 10 parâmetros de controle de qualidade e 20 equipamentos de carga. Para esta instância, o modelo necessitou de apenas cinco segundos para encontrar a solução ótima, demonstrando que ele pode ser utilizado na prática para instâncias de porte maior que as dos cenários 01 e 02.

6.3. Considerações finais

A partir dos resultados encontrados neste capítulo, conclui-se que o modelo matemático proposto é capaz de resolver o problema de blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga de maneira ótima em tempo computacional suficiente para a tomada de decisão na mina em estudo.

Após a realização dos experimentos computacionais, o sistema proposto foi fornecido para a área de planejamento da mina de Sossego e a equipe local foi capacitada para utilizá-lo.

7. Conclusões

Neste trabalho foi tratado o problema de blendagem de minério de cobre e alocação de equipamentos de carga. Neste problema busca-se gerar um planejamento que atenda as metas de produção e de qualidade do *blend* requisitado pela usina de beneficiamento. O problema em questão é recorrente em minas de metais básicos, por armazenarem parte do minério extraído em pilhas de estoque, que são utilizadas na blendagem.

Na mina estudada, a atividade de planejamento é realizada de maneira manual pela equipe de planejamento, por meio da estratégia tentativa e erro. Essa atividade manual demanda um período de tempo considerável para se chegar a uma solução viável e não há garantias sobre a qualidade da solução gerada. Para resolver este problema de planejamento foi proposto uma formulação de programação linear inteira mista implementada na forma de um sistema de suporte à decisão.

Na formulação de programação linear inteira mista desenvolvida tem-se como função objetivo a minimização dos desvios das metas de produção e qualidade requisitado pela usina de beneficiamento. As restrições da formulação foram divididas em cinco grupos: *i*) Restrições de normalização; *ii*) Restrições de qualidade; *iii*) Restrições de produção; *iv*) Restrições de equipamentos; *v*) Domínio das variáveis. A formulação proposta se difere dos trabalhos encontrados na literatura por tratar simultaneamente características como, o *blend* formado por minério proveniente de pilhas de estoque e de frentes de lavra, a compatibilidade para a operação dos equipamentos de carga, um conjunto de pilhas e frentes de lavras obrigatórias a serem utilizadas no planejamento, dentre outras.

A formulação foi implementada no resolvidor Gurobi e a interface gráfica para o sistema de suporte à decisão foi desenvolvida na nuvem por meio da plataforma Azure, da Microsoft. Como o sistema está na nuvem, os usuários do sistema podem utilizá-lo de maneira online.

Para avaliá-lo, foram realizados experimentos com dados reais da mina de Sossego, da empresa Vale S.A., localizada em Canaã dos Carajás. Dois cenários reais foram selecionados para a avaliação, o primeiro com todos os equipamentos de carga disponíveis para operar e o segundo, com 50% dos equipamentos de carga disponíveis e 50% em manutenção. Nos dois cenários o sistema de suporte à decisão encontrou a solução ótima em poucos segundos, atendendo às metas de produção e qualidade. Após a sua validação, o sistema de suporte à decisão foi recentemente implantado na mina de Sossego e está em testes com a equipe de planejamento.

7.1. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, as seguintes atividades são propostas:

- Adaptar o sistema de suporte à decisão para outros complexos mineradores de metais básicos e de minério de ferro;

- Tratar a alocação de caminhões para o transporte do minério;
- Considerar as incertezas presentes na medição dos parâmetros de controle de qualidade;
- Utilizar simulação para avaliar as soluções geradas pelo sistema.

Referências Bibliográficas

- ALARIE, S., GAMACHE, M. “Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines”, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 16, n. 1, pp. 59–76, 2002.
- ANM. *Anuário Mineral Brasileiro das Principais Substâncias metálicas*. Relatório técnico, Agência Nacional de Mineração, Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brazil, September 2020.
- BAKHTAVAR, E., MAHMOUDI, H. “Development of a scenario-based robust model for the optimal truck-shovel allocation in open-pit mining”, *Computers & Operations Research*, v. 115, pp. 104539, 2020.
- BENLAJILI, S., MOUTAOUAKKIL, F., CHEBAK, A., et al.. “Optimization of Truck-Shovel Allocation Problem in Open-Pit Mines”. Em: *International Conference on Smart Applications and Data Analysis*, pp. 243–255. Springer, 2020.
- BENNDORF, J. “Application of efficient methods of conditional simulation for optimising coal blending strategies in large continuous open pit mining operations”, *International Journal of Coal Geology*, v. 112, pp. 141–153, 2013. ISSN: 0166-5162.
- BOUTOURIA, S., ABID, F. “Pricing and Hedging Copper Futures on the London Metal Exchange”, *IUP Journal of Applied Finance*, v. 18, n. 1, pp. 68–98, 2012.
- CHANDA, E., DAGDELEN, K. “Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems”, *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, v. 9, n. 4, pp. 203–208, 1995.
- FLORES-FONSECA, C., LINFATI, R., ESCOBAR, J. W. “Exact algorithms for production planning in mining considering the use of stockpiles and sequencing of power shovels in open-pit mines”, *Operational Research*, pp. 1–25, 2021.
- HAONAN, Z., SAMAVATI, M., HILL, A. J. “Heuristics for integrated blending optimisation in a mining supply chain”, *Omega*, v. 102, pp. 102373, 2021.
- KORYAGIN, M., VORONOV, A. “Improving the organization of the shovel-Truck systems in open-pit coal mines”, *Transport Problems*, v. 12, pp. 113–122, 2017.

- KUMAR, A., CHATTERJEE, S. “Open-pit coal mine production sequencing incorporating grade blending and stockpiling options: An application from an Indian mine”, *Engineering optimization*, v. 49, n. 5, pp. 762–776, 2017.
- MANRÍQUEZ, F., GONZÁLEZ, H., MORALES, N. “Short-term open-pit production scheduling optimizing multiple objectives accounting for shovel allocation in stockpiles”, *Optimization and Engineering*, pp. 1–27, 2022.
- 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., SOUZA, M. J. F. “Lexicographic goal programming approach for a short-term mining planning problem”, *Engineering Optimization*, 2021.
- MOHTASHAM, M., NASIRABAD, H. M., ALIZADEH, B. “Optimization of truck-shovel allocation in open-pit mines under uncertainty: a chance-constrained goal programming approach”, *Mining Technology*, v. 130, n. 2, pp. 81–100, 2021.
- MORADI AFRAPOLI, A., ASKARI-NASAB, H. “Mining fleet management systems: a review of models and algorithms”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v. 33, n. 1, pp. 42–60, 2019.
- MORAES, E. F., ALVES, J. M. D. C. B., SOUZA, M. J. F., et al.. “Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD”, *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 3, pp. 299–306, 2006.
- OZDEMIR, B., KUMRAL, M. “Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 95, pp. 36–48, 2019. ISSN: 1569-190X.
- PÉREZ, J., MALDONADO, S., GONZÁLEZ-RAMÍREZ, R. “Decision support for fleet allocation and contract renegotiation in contracted open-pit mine blasting operations”, *International Journal of Production Economics*, v. 204, pp. 59–69, 2018. ISSN: 0925-5273.
- QINGHUA, G., CAIWU, L., JINPING, G., et al.. “Dynamic management system of ore blending in an open pit mine based on GIS/GPS/GPRS”, *Mining Science and Technology (China)*, v. 20, n. 1, pp. 132–137, 2010.
- RAVINDRAN, A., HANLINE, D. L. “Optimal location of coal blending plants by mixed-integer programming”, *AIIE Transactions*, v. 12, n. 2, pp. 179–185, 1980.

- SILVA, A., LOPES-JÚNIOR, E., COTA, L. P., et al.. “Uma formulação matemática para o problema de blendagem de pilhas intermediárias em uma mina de níquel”. Em: *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Limeira, Brazil, 2019.
- SILVA-JÚNIOR, A. L., PANTUZA-JÚNIOR, G., COTA, L. P., et al.. “Uma formulação de programação matemática para o planejamento de lavra das minas de Capão Xavier e Mar Azul”. Em: *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, v. 2, Limeira, Brazil, 2019.
- SOUZA, M. J., 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.
- UPADHYAY, S. P., ASKARI-NASAB, H. “Dynamic shovel allocation approach to short-term production planning in open-pit mines”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v. 33, n. 1, pp. 1–20, 2019.
- VALE. *Cobre*. Relatório técnico, Vale S.A., Canaã dos Carajás, 2021. Available at <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/copper/Paginas/default.aspx>, accessed on January 29, 2021.
- WILLIAMS, K., HALEY, K. “A practical application of linear programming in the mining industry”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 10, n. 3, pp. 131–137, 1959.
- XI-JIN, G., MING, C., JIA-WEI, W. “Coal blending optimization of coal preparation production process based on improved GA”, *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 1, n. 1, pp. 654–660, 2009.
- ZHANG, L., XIA, X. “An Integer Programming Approach for Truck-Shovel Dispatching Problem in Open-Pit Mines”, *Energy Procedia*, v. 75, pp. 1779–1784, 2015.

Apêndice A: Publicações

A seguir é listada a publicação originada por este trabalho de pesquisa que foi aceita em um evento científico e publicada nos seus anais:

- **Título:** Sistema de suporte à decisão para a blendagem de minério e alocação de equipamentos de carga em uma mina de cobre
Autores: Natanael Salgado Coutinho, Angela Costa, Rafael Sposito, Luiz Silva, Thiago Euzébio e Luciano Perdigão Cota
Evento: LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2021)
Local: João Pessoa (online), PB, Brasil
Período: 3 a 5 de Novembro de 2021