LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Nova abordagem para o Problema de Mistura de Minérios

Alexandre Xavier Martins, Joyce Martins Milagres,
Paganini Barcellos de Oliveira
Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas,
Departamento de Engenharia de Produção, João Monlevade, Brasil
Rua 36, 115 - Loanda, João Monlevade - MG, 35931-008
xmartins@ufop.edu.br, joycemartins687@gmail.com
paganini@ufop.edu.br

RESUMO

A perda por estoque, ocasionada pela indisponibilidade de material, é um problema real enfrentado pelas empresas mineradoras. Se por um lado a manutenção de um estoque mínimo visa redução de capital "parado", a falta dos recursos para a produção pode implicar em problemas de ociosidade na mina, atrasos e até a paralisação das operações. O processo blendagem de minérios aliado ao dimensionamento adequado do estoque surge como alternativa para a diminuição destas perdas. Neste contexto, este trabalho propõe dois modelos matemáticos para a resolução do problema de mistura de minérios, com foco na maximização do número de lotes de produção. Um conjunto de instâncias teste, baseado em dados reais, foi utilizado para comparar o desempenho do modelo proposto frente a outros modelos presentes na literatura. Os resultados mostram que o modelo proposto é o mais eficiente, por permitir um melhor aproveitamento do estoque e maximizar o total de lotes gerados.

PALAVRAS CHAVE. Mineração. Blendagem de minérios. Estoque. Modelagem Matemática. Problema de Mistura.

PM – Programação Matemática

ABSTRACT

The loss from stock, caused by material unavailability, is a real problem faced by mining companies. Maintaining a minimum stock is aimed at reducing capital at a standstill. On the other hand, the lack of resources for production can lead to problems of idleness in the mine, delays, and even the interruption of operations. The ore blending process, combined with the adequate size of the stock, can be seen as an alternative to reduce these losses. In this context, this work proposes two mathematical models to solve the ore blending problem, with a focus on maximizing the number of production batches. A set of real test instances was used to compare the performance of the proposed model with other models in the literature. The results show that the proposed model is the most efficient of all, as it allows better use of the stock and maximizes the total batches generated.

KEYWORDS. Mining. Ore Blending. Stock. Mathematical Programming. Blending Problems.

MP – Mathematical Programming

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

O solo brasileiro é caracterizado pela sua riqueza e diversidade quando se trata da presença de minérios. Tal fato torna o setor de mineração uma das principais atividades econômicas do Brasil, levando-o a protagonizar ganhos significativos na economia brasileira. Segundo relatório anual do [Instituto Brasileiro de Mineração, 2017], a indústria extrativa foi uma das responsáveis por *superávits* na balança comercial brasileira em 2016, com um volume de 394 milhões de toneladas exportadas, representando US$ FOB[1] 21,6 bilhões.

Essa grande participação no mercado, não só brasileiro, mas mundial, leva a uma concorrência cada vez mais acirrada no setor mineiro, consequentemente, tornando-o mais competitivo. Neste cenário, as indústrias mineradoras estão em busca da otimização dos seus processos, com o intuito de atingir a redução de custos, aumento da produtividade e eficiência, de modo a atender as metas produtivas, dentro dos limites requeridos de quantidade e qualidade dos minérios [Toffolo, 2009].

Os processos na mineração despendem altos investimentos, além do elevado custo operacional devido ao grau de complexidade das operações e à movimentação de materiais localizados em uma frente de lavra até os seus destinos [Alexandre, 2010]. Logo, a tomada de decisão nas mineradoras está relacionada à escolha do minério e a quantidade a ser utilizada na composição dos produtos; ao curso dos minérios provenientes de diferentes minas; à maneira como se dará o transporte (minerodutos, terminais ferroviários, rodoviários, etc.) e à produção dos produtos finais, tendo como base suas capacidades produtivas e as demandas internas e externas dos produtos [Toffolo, 2009].

Para auxiliar essa tomada de decisão, as indústrias extrativas utilizam a Pesquisa Operacional (PO). A PO permite a modelagem de ambientes simulados para avaliar diversos cenários otimizados por meio de modelos que abordam variados aspectos quantitativos e qualitativos, os quais possibilitam aos responsáveis testar e avaliar situações de decisão antes de sua implementação [Pessoa e Alves, 2013]. Assim, os cenários estudados auxiliam a seleção adequada de uma estratégia operacional. Segundo [Barbosa e Mapa, 2017].

Um problema comumente avaliado sob a ótica da PO no setor mineiro é o Problema de Blendagem (mistura) de minérios [Wilke e Reimer, 1977; Chanda e Dagdelen, 1995; Costa, 2005]. A ideia básica é estabelecer o quantitativo ótimo de composição do produto mineral e de planejamento operacional de lavra, de modo a alocar os equipamentos de carga na mineradora, com base nas frentes retiradas do minério lavrado diretamente da rocha. Além disso, é necessário também levar em consideração a qualidade do minério (uns são mais valiosos que outros) e suas impurezas, para o seu direcionamento às usinas de beneficiamento, visando a manutenção da qualidade requerida para o produto e redução do número de equipamentos utilizados no processo.

O presente estudo propõe uma mudança de paradigma no estudo de mistura de minérios. A abordagem proposta tem foco no aumento da produtividade da empresa ao viabilizar um melhor aproveitamento e rendimento do material em estoque, diferentemente de boa parte dos trabalhos da literatura que objetivam a minimização dos custos. Cabe ressaltar que aspectos como restrições de qualidade e de quantidade do material utilizado também serão levados em consideração na modelagem matemática do problema.

[1] *Free On Board*

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Outro importante requisito a ser considerado pelo tomador de decisão e incluído no modelo, são as perdas nos processos produtivos da mineradora. Segundo [Klippel, 1999], muitas dessas perdas estão relacionadas à falta de minérios, ocasionando ociosidade nas minas, esperas entre operações, e, até mesmo a paralisação nos transportes e instalações.

Contudo, [Chanda e Dagdelen, 1995] destaca ainda que, ao realizar um planejamento adequado no processo de blendagem de minérios, a base de estoque necessite ser ampliada, desde que um minério abaixo do teor de corte, que não seja considerado como estéril, seja utilizado e misturado com outro material de alto teor. Portanto, fica evidente que a seleção apropriada das quantidades e concentrações ideais de minérios que, quando blendados, permitirão aumentar o rendimento dos produtos finais, sem deixar de atender as expectativas do cliente.

O artigo está organizado conforme descrito a seguir. A Seção 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o assunto. A Seção 3 apresenta descrição do problema da mistura de minérios e suas particularidades, enquanto a Seção 4 introduz os modelos matemáticos propostos para o problema. O ambiente computacional, a descrição das instâncias e os resultados obtidos são apresentados na Seção 5. Por fim, a Seção 6 sumariza as principais conclusões alcançadas por meio deste estudo, bem como são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão da Literatura

Nesta seção apresentamos uma breve mas consistente revisão acerca do problema tratado, com destaque para alguns modelos de mistura de minérios e seus propósitos.

O processo de blendagem consiste na mistura dos minérios beneficiados, chamados de produtos primários, em teores pré-determinados de maneira que, ao serem blendados, atendam às especificações de qualidade e quantidade pré-definidas. É necessário atentar às concentrações utilizadas pois os minérios têm diferentes origens, o que leva a características econômicas e de qualidade distintas, como, por exemplo, o custo de lavra, o teor de determinado elemento químico e as faixas de granulometria [Alves, 2007]. Com o intuito de assegurar a uniformidade dos produtos finais, muitas vezes se faz necessário realizar a mistura de minérios advindos de várias frentes de lavra ou de diferentes minas [Rodrigues e Pinto, 2012].

Segundo [Toffolo, 2009] existem quatro possíveis etapas para formação dos produtos finais por meio da blendagem:

1. Seleção de blocos com composição específica, a serem lavrados em uma determinada mina;
2. Determinação da sequência de caminhões, contendo minérios de características específicas, para o transporte das minas até o porto;
3. Seleção da pilha no porto, na qual o caminhão deverá descarregar seu material;
4. Seleção das pilhas com composições específicas, a serem utilizadas no carregamento de determinado navio.

Um ponto importante a ser ressaltado é que o processo de blendagem não pode ser confundido com o processo de homogeneização. Tal processo está relacionado com o manuseio ou mistura de quantidades de minério, com objetivo de obter um conjunto de produtos finais que possuam composições uniformes. Já a blendagem consiste em uma mistura, em proporções pré-definidas de

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

minérios com diferentes características, com o objetivo de se obter uma massa com características específicas [Moraes et al., 2006].

No âmbito da PO, algumas aplicações técnicas foram desenvolvidas para o problema, conforme apresentado em sequência. Note que, os trabalhos mencionados são exemplos de aplicações reais que podem ser realizadas na indústria de mineração, e que foram utilizados como base para a realização do presente estudo.

[Chanda e Dagdelen, 1995] utilizam de um modelo de programação linear por metas para um problema de mistura de minérios para planejamento de curto prazo. O uso dessa técnica é justificado pelos autores pelo fato dela ser a mais adequada à realidade das mineradoras, visto que seu objetivo é obter uma solução que se aproxime ao máximo das metas de produção e qualidade pré-estabelecidas. Já o modelo desenvolvido por [Wilke e Reimer, 1977] aborda o planejamento de lavra utilizando programação linear, para resolução do problema de mistura de minérios, considerando a relação entre estéril e minério e as capacidades de produção, enquanto o modelo proposto por [Costa, 2005] resolve o problema de blendagem de minérios por metas, no qual a quantidade de minério retirada em uma frente é múltipla da capacidade da caçamba do equipamento de carga em operação naquela frente.

3. Descrição do Problema

A maioria dos modelos encontrados na literatura para o problema de mistura de minérios tem como objetivo a minimização do custo. Mais especificamente, o modelo proposto por [Carvalho, 2003] que se baseia neste princípio de minimização de custos, foi utilizado como base para elaboração do modelo matemático desenvolvido pelos autores. O modelo (1)-(7) de [Carvalho, 2003] possui as características construtivas destacadas na Tabela 1.

$$\min \sum_{i \in P} c_i x_i \tag{1}$$

$$\text{s.a: } x_i \geq L m_i \qquad \forall\, i \in P \tag{2}$$

$$x_i \leq U m_i \qquad \forall\, i \in P \tag{3}$$

$$\sum_{i \in P} a_{ij} x_i \geq L_j \qquad \forall\, j \in J \tag{4}$$

$$\sum_{i \in P} a_{ij} x_i \leq U_j \qquad \forall\, j \in J \tag{5}$$

$$\sum_{i \in P} x_i = \Omega \tag{6}$$

$$x_i \geq 0 \qquad \forall\, i \in P. \tag{7}$$

A função objetivo (1) do modelo é responsável por encontrar uma quantidade x do minério i para compor o produto final de modo a minimizar o custo de fabricação. As restrições (2) e (3) definem que as quantidades mínima e máxima pré-definidas de cada minério i utilizadas na mistura, respectivamente. Já as restrições (4) e (5) garantem que as concentrações de cada elemento j da mistura não ultrapassem os limites de concentração mínimo e máximo, respectivamente. A restrição

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o Galoá proceedings

Tabela 1: Conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo de [Carvalho, 2003].

Símbolo	Descrição
Conjuntos	
J	Conjunto de elementos.
P	Conjunto de minérios.
Parâmetros	
L_j	Percentual mínimo do elemento j na mistura.
U_j	Percentual máximo do elemento j na mistura.
Lm_i	Quantidade mínima (em Kg) a ser usada do minério i.
Um_i	Quantidade máxima (em Kg) a ser usada do minério i.
a_{ii}	Percentual do elemento j no minério i.
Ω	Produção total requerida (em Kg).
Variáveis	
x_i	Quantidade do minério i utilizado na mistura

(6) assegura que a quantidade total produzida seja igual a quantidade total requerida. Por fim, o domínio das variáveis de decisão são apresentados pelas restrições (7).

4. Modelagem Matemática

Essa seção apresenta dois diferentes modelos matemáticos, baseados no modelo de [Carvalho, 2003], para a resolução do problema de mistura de minérios. O primeiro deles, denominado MAX-S, visa maximizar a menor quantidade de sobra de recursos no estoque. Já o segundo, denominado MIN-V objetiva minimizar o total de lotes de produção inviáveis, ou seja, resulta na configuração amplia ao máximo o total de lotes viáveis.

4.1. Modelo MAX-S

O modelo MAX-S, ou (8)-(11), adiciona outros três conjuntos de restrições (9)-(11) ao modelo proposto por [Carvalho, 2003]. Note que a função objetivo (1) é completamente modificada ao introduzir um conjunto de variáveis s_i, uma para cada tipo de minério i, e outra variável γ^s, em função do novo paradigma proposto. As variáveis s_i contabilizam o estoque final (sobra total) de cada tipo de minério i, enquanto a variável γ^s incorpora o valor da menor sobra entre todos os tipos de minério.

$$\max \gamma^s \tag{8}$$

$$\text{s.a: (2)-(7)}$$

$$s_i = Um_i - x_i \qquad \forall\, i \in P \tag{9}$$

$$\gamma^s \leq s_i \qquad \forall\, i \in P \tag{10}$$

$$s_i \geq 0 \qquad \forall\, i \in P. \tag{11}$$

A função objetivo do modelo MAX-S (8) visa maximizar o valor de γ^s. As restrições (9) definem o valor de s_i por meio da subtração da quantidade máxima de minério i pela quantidade

utilizada no produto final x_i. As restrições (10) asseguram que o valor da γ^s não ultrapasse o valor da s_i. Por fim, as restrições (11) determinam o domínio das variáveis de decisão s_i.

Em resumo, pode-se dizer que, a ideia básica do modelo MAX-S é obter um lote que utiliza, prioritariamente, os minérios com maior quantidade em estoque. Assim, em uma execução subsequente do modelo, espera-se que um novo lote possa ser gerado e partir do estoque remanescente, até que não seja mais possível a geração de um lote completo, que seja viável (dentro das especificações pré-estabelecidas).

4.2. Modelo MIN-V

O segundo modelo, chamado MIN-V, é executado uma única vez, ou seja, não é necessário a execução de inúmeras iterações, até que não seja mais possível a geração de novos lotes viáveis. Em outras palavras, ao executar o modelo MIN-V, ele retorna o conjunto de todos os lotes de produção viáveis. A Tabela 2 apresenta o conjunto de informações necessárias para construção do modelo MIN-V.

Tabela 2: Conjuntos, parâmetros e variáveis do MIN-V.

Símbolo	**Descrição**
Conjuntos	
J	Conjunto de elementos.
P	Conjunto de minérios.
K	Conjunto de lotes ($\sum_{j \in P} x_j / \Omega$).
Parâmetros	
L_j	Percentual mínimo do elemento j na mistura.
U_j	Percentual máximo do elemento j na mistura.
Um_i	Quantidade máxima (em Kg) a ser usada do minério i.
a_{ii}	Percentual do elemento j no minério i.
Ω	Produção total requerida por lote (em Kg).
β_k	Multiplicador de viabilidade, que garante que os primeiros lotes k tenham preferência na viabilidade.
M	Número grande capaz de desabilitar a restrição, quando não for mais possível gerar lotes viáveis.
Variáveis	
x_i	Quantidade do minério i utilizado na mistura
y_k	$\begin{cases} 1, & \text{se o lote } k \text{ for inviável} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Note que o modelo MIN-V (12)-(18) demanda a introdução de um novo conjunto K que corresponde a uma estimativa da quantidade de lotes de minério possíveis, obtido por meio da soma total de minérios disponíveis ($\sum_{j \in P} x_j /$) dividido pelo produção total requerida por lote Ω. Note também que, x que os demais modelos contabilizavam apenas a quantidade de minério i utilizada na mistura. Já em MIV-V um novo índice é adicionado às variáveis x para correspondente ao lote de produção $k \in K$.

Além disso, o modelo MIN-V adiciona um novo conjunto de variáveis variáveis binárias y_k, que assumem valor igual a 1 sempre que o lote k é inviável, e 0 caso contrário. Os parâmetros M e β_k são incorporados o modelo para estabelecer e garantir os critérios de viabilidade dos lotes.

$$\min \sum_{k \in K} \beta_k y_k \tag{12}$$

$$\text{s.a: } \sum_{k \in K} x_{ik} \leq U m_i \qquad \forall\, i \in P \tag{13}$$

$$\sum_{i \in P} x_{ik} = \Omega \qquad \forall\, k \in K \tag{14}$$

$$\sum_{i \in P} a_{ij} x_{ik} \geq L_j (1 - y_k) \qquad \forall\, j \in J,\ k \in K \tag{15}$$

$$\sum_{i \in P} a_{ij} x_{ik} \leq U_j + M y_k \qquad \forall\, j \in J,\ k \in K \tag{16}$$

$$x_i \geq 0 \qquad \forall\, i \in P \tag{17}$$

$$y_k \in \{0, 1\} \qquad \forall\, k \in K. \tag{18}$$

A função objetivo (12) busca minimizar o número de lotes inviáveis, ou seja, tenta gerar o maior número de lotes possíveis. As restrições (13) garantem que as quantidades totais de cada minério i utilizado por lote k respeitem o limite máximo. As restrições (14) garantem que a quantidade total produzida por lote seja igual a quantidade total requerida. Já as restrições (15) e (16) asseguram que concentrações de cada elemento j na mistura do lote k não ultrapassem os limites de concentração mínimo e máximo, respectivamente. Além disso, caso o lote seja inviável as restrições (15) e (16) são desabilitadas. Por fim, o domínio das variáveis x_{ik} e y_k são descritos pelas restrições (17) e (18), respectivamente.

5. Resultados e Discussões

5.1. Instâncias

Para validação dos modelos propostos, um conjunto de instância teste baseado em dados reais foi avaliado. Todas as instâncias criadas utilizaram faixas de valores presentes na indústria mineral, extraídas e/ou adaptadas do estudo realizado por [Carvalho, 2003]. Contudo, foram geradas 4 diferentes instâncias, todas comuns aos três modelos mencionados, e que incluem 1 atributo exclusivamente para o modelo MIN-V, envolvendo o parâmetro multiplicador de viabilidade β_k. Os dados informados em cada uma das instâncias são:

- Minérios, Elementos e Composição (%);
- Custo do minério ($/Kg);
- Composto da liga e suas concentrações mínima e máxima;
- Tamanho dos lotes (Ω);

- Quantidade de lotes possíveis e multiplicador de viabilidade (exclusiva do MIN-V).

Todas as instâncias foram geradas tomando como base uma instância inicial 1, porém variando as quantidades de minérios e as composições dos elementos. Quanto aos custos, todas as instâncias mantiveram os mesmos valores da instância 1. A Tabela 3 apresenta o conjunto de dados referentes às instância 1, enquanto a Tabela 4 mostra as concentrações mínima e máxima na mistura, rendimento dos elementos e o tamanho requerido dos lotes.

Tabela 3: Dados da instância 1.

Tipo de minério	Qtd. (Kg)	Custo (R$/Kg)	Composição (%)		
			Mn	Fe	P
Monte Negro	1000	0.10	31.00	4.80	0.08
Hematita	4500	0.27	0.00	65.90	0.06
Pelota de Mn	500	0.06	35.40	19.20	0.06
Cobra	5000	0.16	38.21	14.40	0.02
Carajas MG - 73	1500	0.14	49.25	4.17	0.12
Urucum	5000	0.17	45.25	10.98	0.15
São Desiderio	1000	0.01	30.29	8.80	0.02
Sinter Carajás	2000	0.13	46.40	7.30	0.12
Sil. Carb. Bitolado	500	0.07	30.70	3.30	0.12
Esc. Fe Mn AC R1 R2/R3	500	0.02	31.00	1.03	0.02

Fe - Ferro Mn - Manganês P - Fósforo.

Tabela 4: Limites de qualidade para cada lote da mistura.

Composto	**Min**	**Max**
Mn_liga	36.00	40.00
Fe_liga	10.00	20.00
P_liga	0.00	0.20
Ω (Kg)	1000	

Os valores de β_k são definidos em função no total material em estoque, ou seja, se o total de material em estoque, independente de gerar ou não lotes viáveis, limita a instância a fornecer no máximo 20 lotes, então $\beta_1 = 20$, $\beta_2 = 19$, ... , $\beta_{20} = 1$, por exemplo.

5.2. Experimentos computacionais

Os modelos matemáticos foram implementados em *C++* utilizando um computador *Intel Core* i3, 3.40GHz com 4GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10. O resolvedor comercial CPLEX 12.8 foi adotado como estratégia de resolução exata dos modelos, propiciando obter a solução ótima dos problemas em tempo computacional adequado, considerando os dados de entrada fornecidos em cada teste.

Para os dois primeiros modelos, [Carvalho, 2003] e MAX-S, um processo iterativo de resolução das instâncias foi realizado, o qual os dados de entrada correspondiam as sobras de recursos no estoque, resultantes da iteração anterior, até que não seja mais possível a produção de um

lote adicional viável. Em todos os casos foram levantados os resultados correspondente ao custo total das misturas, bem como o total de lotes viáveis, conforme mostrado a seguir.

5.2.1. Comparação entre o número de lotes gerados

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos por cada um dos três modelos, em termos do número de lotes gerados. A primeira coluna apresenta todos os modelos, enquanto as demais colunas especificam o valor da função objetivo encontrada para cada uma das 4 instâncias. Em negrito são destacadas as melhores soluções obtidas, em relação ao total de lotes gerados, por instância.

Tabela 5: Número de lotes gerados.

Modelo	Instância			
	1	2	3	4
[Carvalho, 2003]	17	18	18	**16**
MAX-S	18	9	9	7
MIN-V	**19**	**19**	**19**	**16**

Pela Tabela 5 é possível notar que o modelo MIN-V é capaz de encontrar a melhor solução para o problema (solução ótima) em todos os casos, enquanto o modelo MAX-S encontra uma boa solução para a primeira instância, porém, soluções piores para as demais. O modelo de [Carvalho, 2003] é capaz de encontrar boas soluções em todos os casos, obtendo, inclusive, a mesma solução ótima que MAX-S para a instância 4.

5.3. Comparação entre os custos

A Tabela 6 apresenta o custo total e o custo médio para cada modelo em cada instância. Para cada instância, na primeira coluna temos o custo total e na segunda coluna o custo médio, calculado pela razão entre o custo total e o número de lotes resultante.

Tabela 6: Custos total e médio.

Modelo	Instâncias							
	1		2		3		4	
	Total	Médio	Total	Médio	Total	Médio	Total	Médio
[Carvalho, 2003]	2388.58	140.50	2594.93	144.16	2398.93	133.27	2388.38	149.27
MAX-S	2602.88	144.60	1420.21	157.80	1411.99	156.89	1110.10	158.59
MIN-V	2844.70	149.72	2845.00	149.74	2845.00	149.74	2634.73	164.67

Pela Tabela 6 é possível perceber que o modelo MAX-S apresenta custos totais inferiores para as instâncias 2, 3 e 4. Isso ocorre pelo fato do modelo obter um número bem inferior de lotes para estas instâncias. Além disso, assim como o MIN-V, o MAX-S não leva em consideração o custo da mistura, seja como uma restrição ou objetivo. Quando se observa os custos médios por lote, nota-se que o modelo de [Carvalho, 2003] faz jus ao seu propósito, sendo capaz de encontrar lotes sempre com o menor valor.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Por fim, cabe ressaltar que este trabalho não foi realizada nenhuma comparação de tempo computacional de processamento entre os modelos, pois se tratam de estratégias de solução diferentes, bem como pelo fato do modelo MIN-V sendo executado uma única vez para cada instância e os demais até que não seja mais possível obter lotes viáveis.

6. Conclusão

O gerenciamento de estoques tem um importante papel dentro das organizações, visto que ele é responsável pelo equilíbrio entre o controle de consumo de material e a necessidade de atender às demandas e risco de escassez. Uma boa gestão de estoques garante a continuidade de operações, a obtenção de eficiência na geração de receita da empresa e o atendimento às demandas, bem como evita paradas, pela falta de insumos.

Neste contexto, o presente trabalho propôs um modelo matemático para resolução do problema de blendagem de minérios, que visa maximizar o total de lotes de produção de minério, considerando o estoque de insumos disponível pela empresa. Os resultados computacionais comprovam que, os modelos baseados em minimização dos custos do processo de blendagem são menos eficientes do que o modelo proposto, uma vez que desconsideram o rendimento dos materiais em estoque, e, assim obtém uma taxa de produtividade menor para mineradora.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a construção de uma abordagem multiobjetivo, o qual contemple, ao mesmo tempo, a minimização de custos e a maximização do total de lotes produzidos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e à UFOP pelo apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Referências

Alexandre, R. F. (2010). Modelagem, simulação da operação e otimização multiobjetivo aplicada ao problema de despacho de veículos em minas a céu aberto. Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. URL https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/Defesas/906/Rafael%20Alexandre%20-%20Versao%20Final.pdf. Acessado: 2020-04-29.

Alves, J. M. d. C. B. (2007). Um sistema para o planejamento de produção e vendas de uma empresa mineradora. Mestrado em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. URL http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2664. Acessado: 2020-04-29.

Barbosa, L. W. G. e Mapa, S. M. S. (2017). Aplicações da pesquisa operacional no setor de mineração: estudo bibliométrico no período de 2006 a 2016. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, 5(8):166–186.

Carvalho, L. J. L. (2003). Otimização de mistura de minérios para a composição de carga na produção de ferro ligas: O caso da Companhia Paulista de Ferro Ligas. Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. URL http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Orientacoes/Monografia_LeonardoJabour.pdf. Acessado: 2020-04-29.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Chanda, E. K. C. e Dagdelen, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 9(4):203–208. URL https://doi.org/10.1080/09208119508964748. Acessado: 2020-04-29.

Costa, F. P. (2005). Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Mestrado em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. URL http://www.decom.ufop.br/marcone/Orientacoes/Dissertacao_Felippe_PPGEM.pdf. Acessado: 2020-04-29.

Instituto Brasileiro de Mineração (2017). Relatório Anual de atividades: junho de 2016 a junho de 2017. Relatório Anual de atividades, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. URL https://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf. Acessado: 2020-04-29.

Klippel, A. F. (1999). O Sistema Toyota de Produção e a indústria de mineração: uma experiência de gestão da produtividade e da qualidade nas minas de fluorita do estado de Santa Catarina. Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. URL https://lume.ufrgs.br/handle/10183/119128. Acessado: 2020-04-29.

Moraes, E. F., Alves, J. M. d. C. B., Souza, M. J. F., Cabral, I. E., e Martins, A. X. (2006). 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*, 59:299–306. ISSN 0370-4467. URL http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000300008&nrm=iso. Acessado: 2020-04-29.

Pessoa, L. d. P. e Alves, J. M. d. C. B. (2013). Sistema de otimização do balanço de massas para alimentação de alto-fornos: um estudo de caso. *Revista Eletrônica Produção & Engenharia*, 4 (1):355–364.

Rodrigues, L. F. e Pinto, L. R. (2012). Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. *Rem: Revista Escola de Minas*, 65:377–384. ISSN 0370-4467. URL http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672012000300015&nrm=iso.

Toffolo, T. A. M. (2009). Otimização do fluxo de produtos de uma empresa mineradora. Mestrado em Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. URL https://www.dcc.ufmg.br/pos/cursos/defesas/1115M.PDF. Acessado: 2020-04-29.

Wilke, F. e Reimer, T. (1977). Optimizing the short term production schedule for an open pit iron ore mining operation. *15th Internat. Appl. Comput. Oper. Res. in Mineral Indust.(APCOM) Sympos. Proc*, p. 425–433.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings