

UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CARGA EM UMA MINA A CÉU ABERTO

**Fábio Fernandes Ribeiro¹, Marcone Jamilson Freitas Souza², Sérgio Ricardo de Souza¹,
Elisangela Martins de Sá¹**

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG
Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática e Computacional
Campus 2 - CEP 30421-169 - Belo Horizonte - MG, Brasil

²Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Campus Universitário Morro do Cruzeiro - CEP 35400-000 - Ouro Preto - MG, Brasil
fabiohb@gmail.com, sergio@cefetmg.br, marccone@iceb.ufop.br, elisangela.martinss@gmail.com

RESUMO

Este trabalho trata de uma abordagem integrada de otimização e simulação para resolver e verificar a factibilidade do plano de alocação de escavadeiras em uma mina a céu aberto. A abordagem utiliza uma formulação de programação linear inteira mista que minimiza quatro objetivos relacionados a aspectos operacionais, como desvio de produtividade dos equipamentos de carga, desvios de qualidade e massa nos destinos, além da redução dos tempos de deslocamento, para determinar o plano de alocação de escavadeiras do cenário em análise. A abordagem utiliza também um modelo de simulação de eventos discretos para representar as operações de lavra de curto prazo. Experimentos foram realizados utilizando dados reais de uma mina para validar a abordagem integrada. Os resultados dos experimentos foram satisfatórios quando comparados com os resultados de um cenário operacional. A abordagem integrada apresenta-se como uma importante ferramenta de tomada de decisão para identificar gargalos operacionais, simular cenários alternativos de produção e validar planos de alocação de escavadeiras.

PALAVRAS CHAVE. Alocação de equipamentos de carga, Planejamento de lavra de curto prazo, Programação Linear Inteira Mista, Simulação Computacional.

POI - Pesquisa Operacional na Indústria

ABSTRACT

This work deals with an integrated optimization and simulation approach to propose and check the shovel allocation plan for an open pit mine. The proposed approach considers a mixed integer linear programming formulation that minimizes four objectives related to operational aspects, such as shovel productivity deviation, quality and mass deviations at destinations and reduction of travel times, to determine the shovel allocation plan for scenario under analyses. This approach also uses a formulation discrete event simulation to represent the load and transport operations for a short-term plan. Experiments were carried out using real data from a mine to validate the integrated approach and the results were satisfactory when compared with an operational scenario results. The integrated approach presents itself as an important tool that can be used to identify operational bottlenecks, simulate alternative production scenarios, as well as validate the shovel allocation plan.

KEYWORDS. Shovel allocation, Short term mine planning, Mixed-integer linear programming, Simulation

POI - Operational Research in Industry

1. Introdução

O planejamento de lavra em uma mina a céu aberto pressupõe a tomada de decisões em horizontes de tempo distintos, que buscam estabelecer, nos níveis estratégico, tático e operacional, as melhores políticas, diretrizes e procedimentos, de forma a maximizar o aproveitamento das reservas e a geração de valor, minimizando os custos operacionais e os impactos ambientais decorrentes daquele empreendimento.

O nível estratégico do planejamento de lavra é responsável por determinar o melhor contorno para a cava final, ou seja, estabelecer os limites de execução das operações de lavra, de modo a obter o melhor aproveitamento possível do recurso mineral [Lerchs e Grossmann, 1965]. No nível de planejamento tático, determina-se, a partir do limite de cava final conhecido, a sequência de lavra dos blocos, de forma a maximizar o retorno financeiro sobre o investimento, representado pelo resultado do fluxo de caixa futuro (NPV - *Net Present Value*). Este problema é amplamente discutido em Caccetta e Hill [2003], Ramazan [2007] e Newman et al. [2007]. Finalmente, no nível operacional do planejamento de lavra, são tomadas decisões relacionadas à melhor alocação dos equipamentos necessários às operações mineiras, de forma a minimizar as horas improdutivas destes equipamentos e, conseqüentemente, o custo operacional.

A Figura 1 apresenta um modelo de blocos de uma mina a céu aberto bem como o sequenciamento de lavra desses blocos, utilizado como dado de entrada para a geração do plano de alocação de escavadeiras apresentado no lado esquerdo da figura, contendo ao longo do horizonte de planejamento a relação dos blocos que serão lavrados por cada escavadeira e suas respectivas mudanças de frentes de trabalho, que ocorrem, por exemplo, quando o plano prevê a lavra de um bloco que se encontra distante daquela escavadeira.

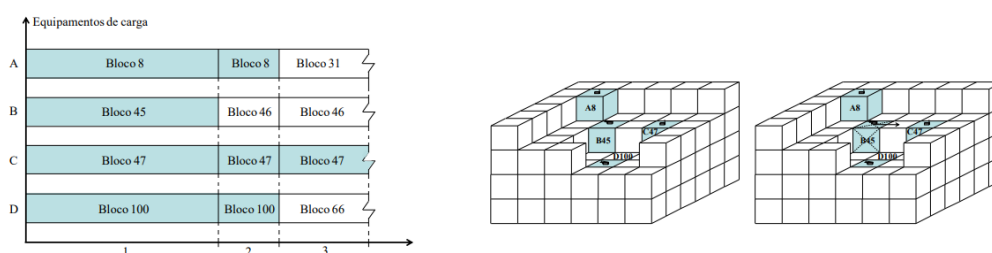


Figura 1: Alocação dos equipamentos de carga no modelo de blocos

A operação em uma mina a céu aberto geralmente ocorre mediante a lavra simultânea em diversas frentes. Uma frente ou um banco operacional é aquele onde a operação de lavra está ocorrendo naquele instante de tempo. Os bancos inativos são aqueles que já foram lavrados ou aqueles que cumprem apenas a função de manter a estabilidade de um talude. Em virtude da quantidade de bancos ou frentes de lavra, dos tipos de materiais, dos equipamentos disponíveis, do processo de locomoção dos mesmos e da taxa requerida nos destinos, definir qual a melhor alocação dos equipamentos às frentes de lavra é uma tarefa não trivial. Na literatura, são encontrados diversos trabalhos que tratam os problemas de alocação de equipamentos de carga e transporte utilizando modelos de programação linear, considerando diversos objetivos [Subtil et al., 2011; L'Heureux et al., 2013; Benlaajili et al., 2020]). Outros trabalhos consideram abordagens híbridas, que combinam programação matemática com técnicas analíticas [Souza et al., 2010; Fioroni et al., 2008; Upadhyay e Askari-Nasab, 2018]. Trabalhos envolvendo a combinação de programação matemática e simulação computacional para o problema da alocação de equipamentos de carga ainda são pouco explorados na literatura.

Propõe-se neste trabalho uma abordagem integrada de otimização e simulação na qual um

modelo de programação linear inteira mista é utilizado para representar o problema de alocação de equipamentos de carga numa mina a céu aberto. Este modelo é composto por 4 objetivos que representam importantes características dos processos de lavra: Desvios de qualidade e massa do material entregue nas usinas de beneficiamento mineral; Tempo de deslocamento das escavadeiras durante a mudança de blocos; Desvios de produtividade dos equipamentos de carga. A partir da minimização desses objetivos, um plano de alocação de escavadeiras é gerado e utilizado na fase de simulação de eventos discretos, onde um modelo computacional simula a execução do plano de alocação proposto contemplando as operações de carga e transporte e suas respectivas variáveis e processos estocásticos inerente a essas operações. Esta abordagem permitirá ao planejador de mina avaliar e comparar diversos cenários de produção, contemplando diferentes configurações do plano de lavra e de parâmetros de equipamentos, gerando informações confiáveis para suportar o processo de tomada de decisão nos níveis tático e operacional.

As demais seções do artigo estão organizadas da seguinte forma. A revisão bibliográfica é apresentada na Seção 2. A Seção 3 apresenta a caracterização do problema e uma descrição detalhada da abordagem proposta. A Seção 4 apresenta as informações acerca do estudo de caso realizado. A Seção 5 apresenta os experimentos e os resultados obtidos e a Seção 6 apresenta as conclusões obtidas a partir deste estudo.

2. Trabalhos relacionados

A programação matemática e a simulação computacional são técnicas da pesquisa operacional que possuem vasta aplicação a problemas da indústria mineral, segundo Blom et al. [2018]. As operações de lavra em minas a céu aberto são realizadas mediante o emprego de equipamentos de carga e caminhões, que representam, aproximadamente, 50% de todo o custo operacional de uma mina, de acordo com Bajany et al. [2019]. Além do custo operacional, Kozan e Liu [2016] afirmam que os equipamentos de carga e transporte são responsáveis também por uma importante parcela da alocação de capital necessário à implantação e operação de uma mina a céu aberto. Definir o melhor planejamento operacional desses ativos pode representar uma excelente oportunidade de redução de custos. Souza et al. [2010] apresentam um modelo de programação linear inteira mista para o problema de atendimento à demanda horária de produção, com o objetivo de minimizar o desvio de qualidade do material requerido na alimentação das usinas de beneficiamento mineral, além de reduzir a quantidade de equipamentos necessários à operação. O modelo foi resolvido por meio de uma abordagem híbrida baseada na heurística *Variable Neighborhood search* (VNS). L'Heureux et al. [2013] apresentam um modelo de programação linear inteira mista para determinar a sequência de blocos que serão escavados em uma mina a céu aberto, bem como a alocação dos equipamentos de carga e suas respectivas movimentações, de forma a obter a alimentação desejada nas instalações de beneficiamento mineral. Koryagin e Voronov [2017] propõem uma abordagem híbrida, combinando heurísticas e simulação para minimização dos tempos ociosos dos caminhões e dos equipamentos de carga em uma mina a céu aberto. Upadhyay e Askari-Nasab [2018] apresentam um modelo matemático para alocação de equipamentos de carga às frentes de lavra, com o objetivo de maximizar a produção, minimizar os desvios de massa e qualidade do material entregue às usinas de beneficiamento mineral, além de minimizar a distância percorrida pelos equipamentos de carga ao deslocarem-se entre frentes de lavra. Nesta abordagem, o autor utiliza também um modelo de simulação das operações de lavra, que interage com um segundo modelo matemático, responsável por determinar dinamicamente a alocação dos caminhões ao longo da simulação. Benlaajili et al. [2020] apresentam um modelo para alocação de equipamentos de carga e transporte, desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa, é proposto um modelo para alocação dos equipamentos de carga às frentes de lavra como um problema de roteamento de veículos. Na segunda

etapa, é proposto um modelo de programação linear inteira mista para obter a quantidade de viagens de caminhão necessárias ao transporte da quantidade de material requerido entre os pontos de carregamento e basculamento. Este modelo considera também frotas heterogêneas, ou seja, de diferentes portes e capacidades de carregamento e transporte.

3. A abordagem integrada proposta

O problema abordado neste artigo consiste na obtenção e operacionalização do plano de alocação dos equipamentos de carga a um conjunto de blocos já sequenciados, de forma a atender as demandas de massa e qualidade do material, considerando a aleatoriedade característica das operações de carga e transporte de uma mina a céu aberto. A Figura 2 apresenta um esquema geral da abordagem proposta neste artigo.

A abordagem integrada proposta neste trabalho está subdividida em dois momentos distintos. No primeiro momento, o problema de alocação dos equipamentos de carga às frentes de trabalho é resolvido de forma exata. No segundo momento, a alocação dos equipamentos de carga obtida no passo anterior é utilizada como dado de entrada de um modelo de simulação de eventos discretos das operações de carga e transporte da mina em estudo.

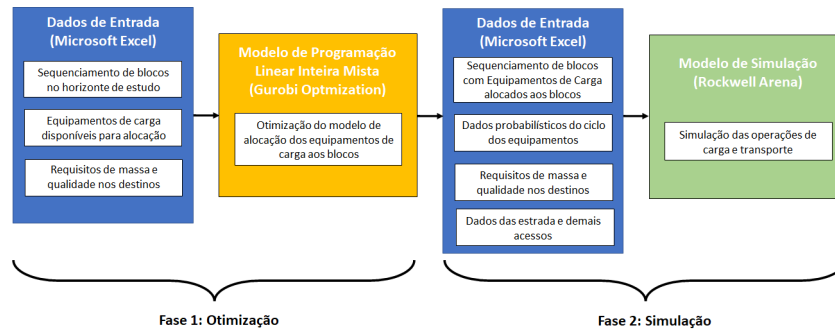


Figura 2: Abordagem integrada de otimização e simulação para geração e validação do plano de alocação dos equipamentos de carga de uma mina a céu aberto.

Para implementação desta abordagem foram utilizadas três aplicações computacionais: Gurobi Optimization®, Rockwell Arena® e Microsoft Excel®. O modelo matemático apresentado na Seção 3.1 foi implementado no resolvidor Gurobi Optimization®, versão 6.5.1. A solução ótima proposta pelo modelo foi utilizada como dado de entrada do modelo de simulação computacional desenvolvido no software de simulação Rockwell Arena®, versão 16, apresentado na Seção 3.2. Todo o fluxo de informações entre o resolvidor matemático e o modelo de simulação é realizado por meio de planilhas do Microsoft Excel®. Esta abordagem integrada tem, portanto, o objetivo de desenvolver, implementar e verificar a exequibilidade de um plano de lavra, levando em consideração as características estocásticas inerentes às operações de carga e transporte, além de permitir a realização de experimentos com cenários hipotéticos de produção.

3.1. Fase 1: Alocação dos equipamentos de carga

O modelo de alocação dos equipamentos de carga considera uma mina a céu aberto, cuja operação de lavra é realizada por escavadeiras e caminhões. Este sistema inclui caminhões, escavadeiras, usinas de beneficiamento mineral, pilhas de estéril, frentes de lavra com diferentes tipos de materiais e uma rede de estradas e acessos que interligam as frentes de lavra aos destinos dos materiais (usinas de beneficiamento e frentes de lavra). O propósito deste modelo é determinar o sequenciamento das atividades dos equipamentos de carga, determinando qual frente será lavrada

por cada equipamento em cada período, indicando também a necessidade de deslocamento desses equipamentos entre esses blocos. O modelo matemático utilizado neste trabalho foi elaborado por Upadhyay e Askari-Nasab [2018]. A notação e a formulação matemática são apresentadas a seguir.

Existem $\hat{S}$ caminhões (indexados por s), $\hat{F}$ frentes de lavras (indexadas por f), $\hat{T}$ tipos de caminhões (indexados por t), $\hat{K}$ tipos de materiais (indexados por k), $\hat{P}$ britadores/plantas de beneficiamento mineral (indexados por d^c), $\hat{W}$ destinos de estéril (indexados por d^w) e P períodos (indexados por p). O índice d foi adotado para representar os destinos (plantas de beneficiamento mineral e pilhas de estéril).

Para o tipo de caminhão t , os parâmetros N_t^T , H_t e α_t^T representam o número de caminhões, a capacidade em massa e a disponibilidade mecânica dos caminhões (fração), respectivamente. O parâmetro J representa a flexibilidade na massa produzida para permitir carregamento acima da capacidade dos caminhões (toneladas). Para cada equipamento de carga s , X_s e X_s^+ representam, respectivamente, a capacidade de sua caçamba e a máxima produção possível pelo equipamento no horizonte de planejamento, em toneladas, enquanto L_s representa o seu tempo de ciclo em segundos e S_s representa a sua velocidade de deslocamento em metros/minuto. O parâmetro α_s^S representa a disponibilidade mecânica do equipamento de carga s (fração) e $F_{i_s}^S$ representa a frente de lavra inicial deste equipamento. O parâmetro binário ϕ_s indica se o equipamento de carga s encontra-se ou não em funcionamento. O parâmetro M_s^{ore} indica se o equipamento s está trabalhando em uma frente de minério (0), estéril (1) ou outro material (2), enquanto $M_{t,s}^T$ é um parâmetro binário para indicar se é possível carregar o caminhão t com o equipamento de carga s . Para cada usina de beneficiamento d^c , o parâmetro Z_{d^c} representa sua capacidade máxima de processamento, em t/h, $\Lambda_{d^c}^+$ e $\Lambda_{d^c}^-$ representam o desvio positivo e negativo máximo admitido, em toneladas. O parâmetro $G_{k,d}$ representa a qualidade desejada por tipo de material nos destinos de minério. Para cada frente f , N_f^F representa o número de frentes precedentes, Π_f o conjunto de frentes precedentes, O_f representa a massa inicial disponível na frente, em toneladas, Q_f é um parâmetro binário, que indica o tipo de material da frente (minério= 0 e estéril= 1). O parâmetro $\bar{G}_{f,k}$ representa a qualidade do material k na frente f . O parâmetro O^{min} representa a quantidade mínima de material em uma frente para que a mesma seja considerada como frente exaurida. O parâmetro $\Gamma_{f_1 f_2}^F$ representa a distância entre as frentes de lavra f_1 e f_2 , em metros. O parâmetro $\bar{T}_{t,f,d}$ representa o tempo de ciclo do caminhão do tipo t da frente f até o destino d , em minutos. Por fim, T representa o tamanho do horizonte de planejamento em horas, ϵ representa um número decimal muito pequeno e BM representa um número suficientemente grande, de acordo com as restrições.

O modelo matemático utiliza as seguintes variáveis de decisão: A variável binária $a_{s,f,p} = 1$ que indica se o equipamento de carga s foi alocado à frente f no período p , e $a_{s,f,p} = 0$, caso contrário. A variável binária $m_{f,p} = 1$ indica se uma frente f foi exaurida no período p e $m_{f,p} = 0$, caso contrário. A variável inteira $n_{t,f,d}$ determina o número de viagens realizadas por um caminhão t , da frente f para o destino d no período p . A variável $x_{s,f,d,p}$ representa a fração de massa da frente f lavrada pelo equipamento de carga s , para o destino d no período p . A variável $x_{s,p}^-$ representa o desvio negativo máximo entre a capacidade nominal do equipamento de carga s e sua produção no período p . As variáveis $\delta_{d^c,p}^-$ e $\delta_{d^c,p}^+$ representam os desvios positivos e negativos entre a alimentação das usinas de beneficiamento mineral d^c no período p e sua capacidade nominal. As variáveis $g_{k,d^o,p}^-$ e $g_{k,d^o,p}^+$ representam o desvio positivo e negativo da massa de material k com a qualidade desejada nos destinos de minério d^o no período p . A variável $l_{f,p}$ representa a massa de material disponível na frente f no início do período p . As variáveis $r_{s,p}$, $r_{s,p}^{rem}$ e $r_{s,p}^{act}$ representam, respectivamente, o tempo de movimentação (em minutos), o tempo de movimentação remanescente (em minutos) e o

tempo de movimentação (em minutos) efetivamente gasto do equipamento de carga s no período p para se deslocar até a próxima frente de lavra. A variável binária $y_{s,p} = 0$ se $r_{s,p}^{rem}$ é maior que 0 e $y_{s,p} = 1$, caso contrário.

O modelo matemático utiliza quatro objetivos, que representam o atendimento aos requisitos operacionais de uma mina a céu aberto: (i) minimização do desvio negativo da massa produzida pelo equipamento de carga s em comparação com sua capacidade nominal no período p ; (ii) minimização dos desvios de massa requerida nas usinas de beneficiamento mineral d^c ; (iii) minimização do desvio de qualidade do material desejado nos destinos d ; (iv) minimização dos tempos de deslocamento dos equipamentos de carga. A representação matemática dos objetivos é apresentada nas expressões a seguir:

$$\psi_1 = \sum_p \sum_s \left(\frac{1}{p} \right) \times x_{s,p}^- \quad (1)$$

$$\psi_2 = \sum_d^c \sum_p \left(\frac{1}{p} \right) \times (\delta_{d^c,p}^- + \delta_{d^c,p}^+) \quad (2)$$

$$\psi_3 = \sum_p \sum_{d^O} \sum_k \left(\frac{1}{p} \right) \times (g_{x,d^O,p}^- + g_{k,d^O,p}^+) \quad (3)$$

$$\psi_4 = \sum_s \sum_p r_{s,p} \quad (4)$$

A otimização do modelo com os quatro objetivos é realizada mediante uma abordagem ponderada, em que, para cada um dos objetivos, é atribuída ponderação, definida de acordo com a prioridade de um objetivo sobre os demais. Desta forma, os objetivos individuais normalizados são resolvidos separadamente pela otimização, determinando, em seguida, seus valores no conjunto Pareto ótimo. O parâmetro W_i representa os pesos normalizados para o objetivo i do problema. As restrições do modelo foram formuladas de maneira a contemplar os requisitos de precedência entre os blocos, movimentação e desempenho individual dos equipamentos de carga, alimentação nos destinos de minério, qualidade do material enviado as usinas de beneficiamento mineral e número de viagens de caminhão requeridas. O modelo matemático para o problema, portanto, é dado por:

$$\min \psi = W_1 \times \psi_1 + W_2 \times \psi_2 + W_3 \times \psi_3 + W_4 \times \psi_4 \quad (5)$$

$$s.a \sum_s a_{s,f,p} \leq 1 \quad \forall f \quad \forall p \quad (6)$$

$$a_{s,Fi_s,1} = 1 \quad \forall s \quad (7)$$

$$\sum_f a_{s,f,p} \leq 2 \quad \forall s, p \quad (8)$$

$$\sum_{f^1} a_{s,f^1,p} \leq a_{s,f,p} + m_{f,p} + (1 - a_{s,f,p-1}) + (1 - a_{s,f,p})BM \quad \forall s, f, p \quad (9)$$

$$a_{s,f,p+1} \geq a_{s,f,p} - m_{f,p} \quad \forall s, f, p = 1 \dots P - 1 \quad (10)$$

$$a_{s,f,p+1} \leq 1 + a_{s,f,p} - m_{f,p} \quad \forall s, f, p = 1 \dots P - 1 \quad (11)$$

$$a_{s,f,p+1} \geq 2a_{s,f,p} - \sum_{f^1} a_{s,f^1,p} \quad \forall s, f, p = 1 \dots P - 1 \quad (12)$$

$$r_{s,p} \geq \sum_{f^1} a_{s,f^1,p} \Gamma_{f^1,f}^f / S_s - (1 - a_{s,f,p})BM \quad \forall s, f, p \quad (13)$$

$$r_{s,p} = r_{s,p}^{act} + r_{s,p}^{rem} \quad \forall s, p \quad (14)$$

$$r_{s,p} \leq \left(\sum_f a_{s,f,p} - 1 \right) BM \quad \forall s, p \quad (15)$$

$$\sum_d x_{s,f,d,p} \leq (1 - a_{s,f,p} + a_{s,f,p-1}) BM + y_{s,p} BM \quad \forall s, f, p \quad (16)$$

$$r_{s,p}^{rem} \geq (1 - y_{s,p}) 2\varepsilon \quad \forall s, p \quad (17)$$

$$r_{s,p}^{rem} \leq \varepsilon y_{s,p} + (1 - y_{s,p}) BM \quad \forall s, p \quad (18)$$

$$\sum_f \sum_d O_f x_{s,f,d,p} + (r_{s,p-1}^{rem} + r_{s,p}^{act}) 60 X_s / L_s \leq 3600 T X_s \alpha_s^S / L_s \quad \forall s, p \quad (19)$$

$$l_{f,1} = O_f \quad \forall f \quad (20)$$

$$l_{f,p+1} = l_{f,p} - \sum_s \sum_d O_f x_{s,f,d,p} \quad \forall f, p = 1 \dots P-1 \quad (21)$$

$$l_{f,p} - \sum_s \sum_d O_f x_{s,f,d,p} \geq (1 - m_{f,p})(O_{min} + \varepsilon) \quad \forall f, p \quad (22)$$

$$l_{f,p} - \sum_s \sum_d O_f x_{s,f,d,p} \leq m_{f,p} O_{min} + (1 - m_{f,p}) BM \quad \forall f, p \quad (23)$$

$$m_{f,p+1} \geq m_{f,p} \quad \forall f, p = 1 \dots P-1 \quad (24)$$

$$\sum_d \sum_f x_{s,f,p,d} O_f / X_s^+ + x_{s,p}^- = 1 \quad \forall s, p \quad (25)$$

$$\sum_d x_{s,f,d,p} \leq a_{s,f,p} \quad \forall s, f, p \quad (26)$$

$$\sum_s \sum_{d^o} O_f x_{s,f,d^o,p} \leq l_{f,p} Q_f \quad \forall f, p \quad (27)$$

$$\sum_s \sum_{d^w} O_f x_{s,f,d^w,p} \leq l_{f,p} (1 - Q_f) \quad \forall f, p \quad (28)$$

$$N_f^F \sum_s a_{s,f,p} - \sum_{f' \in \Pi_f} m_{f',p} \leq 0 \quad \forall f, p \quad (29)$$

$$\sum_s \sum_f x_{s,f,d^c,p} O_f / (Z_{d^c} T) + \delta_{d^c,p}^- - \delta_{d^c,p}^+ = 1 \quad \forall d^c, p \quad (30)$$

$$\delta_{d^c,p}^- \leq \Lambda_{d^c}^- / Z_{d^c} \quad \forall d^c, p \quad (31)$$

$$\delta_{d^c,p}^+ \leq \Lambda_{d^c}^+ / Z_{d^c} \quad \forall d^c, p \quad (32)$$

$$\sum_s \sum_f x_{s,f,d^0,p} O_f \bar{G}_{f,k} + g_{k,d^0,p}^- - g_{k,d^0,p}^+ = \sum_s \sum_f x_{s,f,d^0,p} O_f G_{k,d^0} \quad \forall k, d^0, p \quad (33)$$

$$\sum_s x_{s,f,d,1} O_f \leq \sum_t n_{t,f,d} H_t \quad \forall d, f \quad (34)$$

$$\sum_s x_{s,f,d,1} O_f + J \geq \sum_t n_{t,f,d} H_t \quad \forall d, f \quad (35)$$

$$\sum_d n_{t,f,d} H_t \leq \sum_s \left(\sum_d x_{s,f,d,1} O_f + a_{s,f,1} J \right) M_{t,s}^t \quad \forall t, \forall f \quad (36)$$

$$\sum_f \sum_d n_{t,f,d} \bar{T}_{t,f,d} \leq 60 T N_t^T \alpha_t^T \quad \forall t \quad (37)$$

$$\sum_f \sum_d \sum_p x_{s,f,d,p} \leq (1 - \phi_s) B M \quad \forall s \quad (38)$$

$$a_{s,f,p} \leq \min(1, \text{abs}(M_s^{\text{ore}} - Q_f)) \quad \forall s, f, p \quad (39)$$

$$a_{s,f,p}, m_{f,p}, y_{s,p} \in \{0, 1\} \quad \forall s, f, p \quad (40)$$

$$n_{t,f,d} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall t, f, d \quad (41)$$

$$x_{s,f,d,p}, x_{s,p}^-, \text{delta}_{d^c,p}^-, \delta_{d^c,p}^+, g_{k,d^0,p}^-, g_{k,d^c,p}^+, l_{f,p}, r_{s,p}, r_{s,p}^{\text{rem}}, r_{s,p}^{\text{act}} \geq 0 \quad \forall s, f, d, p \quad (42)$$

A função objetivo (5) minimiza os quatro objetivos ponderados. A expressão (6) atribui os equipamentos de carga às frentes de carga no período inicial. A expressão (7) garante que um equipamento de carga trabalhe em apenas uma frente de lavra por período. A expressão (8) modela o deslocamento de um equipamento de carga para uma nova frente de lavra dentro do mesmo período, que, por sua vez, limita a duas frentes de lavra que um equipamento de carga possa estar atribuído em um período. A expressão (9) restringe a atribuição de um equipamento de carga no mesmo período a no máximo duas frentes, desde que a frente de trabalho atual seja totalmente lavrada; caso contrário, a quantidade máxima é igual a 1. A expressão (10) garante a continuidade da atribuição da escavadeira à frente de lavra, caso a mesma não seja exaurida naquele período. A expressão (11) garante que um equipamento de carga não seja atribuído a uma frente de lavra já exaurida, se o equipamento não estiver atribuído a esta frente no período anterior. As expressões (12) e (9) trabalham em conjunto, para garantir que, caso uma máquina que tenha sido atribuída a uma frente de lavra no meio de um período, em que o tempo não seja suficiente para exauri-la, continue atribuída a ela no próximo período. Por outro lado, essa restrição força o modelo a iniciar o deslocamento da máquina para um nova frente de lavra, dentro do mesmo período em que ela tenha exaurido uma frente. A expressão (13) modela o tempo de movimento como sendo maior ou igual ao tempo real, caso haja deslocamento no período. O tempo de movimento é dividido entre o tempo real gasto na movimentação no período e o tempo de movimento remanescente para o próximo período pela expressão (14). A expressão (15) garante que o tempo de movimento seja zero, caso a escavadeira esteja atribuída a apenas uma frente naquele período. As restrições (16) a (18) proíbem qualquer produção nas frentes de lavra atribuídas, caso os tempos de movimento restantes não estejam zerados. A capacidade total de produção dos equipamentos de carga é modelado pela expressão (19). As restrições (20) a (24) modelam a massa disponível nas frentes de lavra em cada período. A expressão (25) modela o desvio negativo da massa lavrada pelo equipamento de carga em comparação à sua capacidade. Já a expressão (26) proíbe a produção em uma frente de lavra onde o equipamento de carga não esteja atribuído naquele período. As expressões (27) e (28) modelam a produção máxima de minério e estéril possível a partir das frentes de lavra atribuídas. A expressão (29) usa a precedência entre frentes de lavra para modelar a acessibilidade às mesmas. O desvio na quantidade de minério recebido pelas plantas de beneficiamento mineral em comparação com sua necessidade é modelado pela expressão (30) e limitado pelas expressões (31) e (32). A expressão (33) modela o desvio na qualidade do material recebido nos destinos de minério. A alocação de caminhões é realizada apenas para o primeiro período, que calcula, nas equações (34) e (35), a quantidade de viagens de caminhões necessárias. A expressão (36) modela a equivalência de tipos de caminhão e equipamentos de carga, impedindo que uma viagem não seja realizada quando houver incompatibilidade. A expressão (37) estabelece um limite na quantidade de caminhões. A expressão (38) é utilizada para indicar falhas mecânicas do equipamento de carga. A expressão (39) permite que

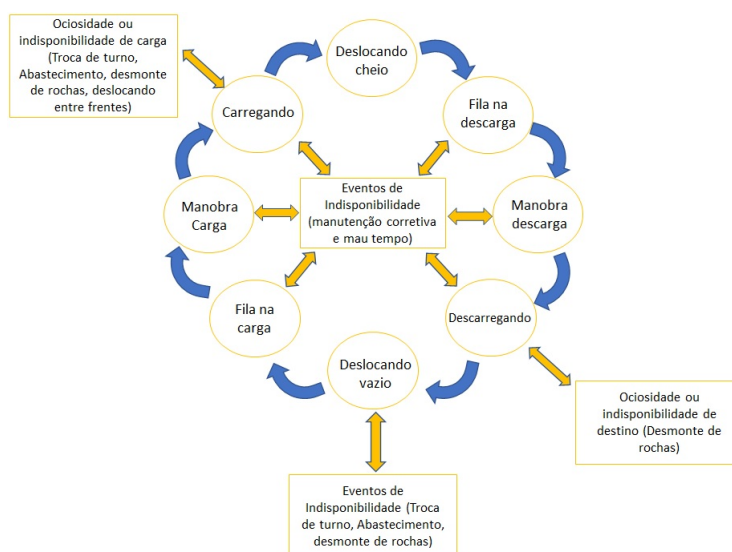


Figura 3: Modelagem conceitual do modelo de simulação implementado.

os equipamentos de carga sejam bloqueados para trabalhar apenas em minério ou estéril. As restrições (40)-(42) representam o domínio das variáveis de decisão.

3.2. O modelo de simulação de eventos discretos

No presente trabalho um modelo de simulação de eventos discretos foi construído para representar o funcionamento de uma mina, tendo como dados de entrada o planejamento operacional de lavra, que contém os dados relacionados ao sequenciamento de lavra; o sequenciamento dos equipamentos de carga; a origem e o destino do material lavrado; os requisitos de qualidade e taxa de alimentação dos destinos; e os dados operacionais dos equipamentos de carga e transporte (quantidade de equipamentos, tempo de carregamento, velocidade média, carga média, etc). O modelo de simulação considera também as informações relacionadas ao mapeamento da mina, contendo os acessos responsáveis por conectar os pontos de origem aos destinos, além de informações relacionadas à geometria dos mesmos, como comprimento, largura, inclinação, resistência ao rolamento e tipo de pista (dupla ou simples).

O modelo de simulação representa cada caminhão, equipamento de carga, frentes de lavra, britadores, pilhas de estéril e acessos como elementos únicos no sistema, tratados de forma independente, de acordo com a lógica de funcionamento inerente a cada um deles. A Figura 3 apresenta os eventos implementados no modelo computacional, bem como a sequência em que ocorrem no sistema. A simulação tem início no deslocamento vazio dos caminhões até um ponto de carregamento, onde o mesmo será carregado por um equipamento de carga, após aguardar em fila para carregamento e realizar a manobra para posicionamento junto a ele. A definição do destino do caminhão é realizada através de uma lógica implementada no modelo, disparada no primeiro minuto da execução do experimento com o modelo. Essa lógica identifica, mediante a necessidade de taxa de alimentação, a qualidade requerida nos destinos e o tempo de deslocamento entre o caminhão e a frente de lavra, a quantidade de caminhões que deverão ser fixados naquele par origem-destino. Uma vez fixado, aquele equipamento continuará alocado a aquela frente de lavra, até que um evento de indisponibilidade da mesma seja disparado, fazendo com que o simulador opte pela parada do caminhão ou pela fixação do mesmo a uma outra rota. Uma vez carregado o caminhão desloca-se para o seu destino, realizando a descarga do material e iniciando novamente o ciclo de transporte.

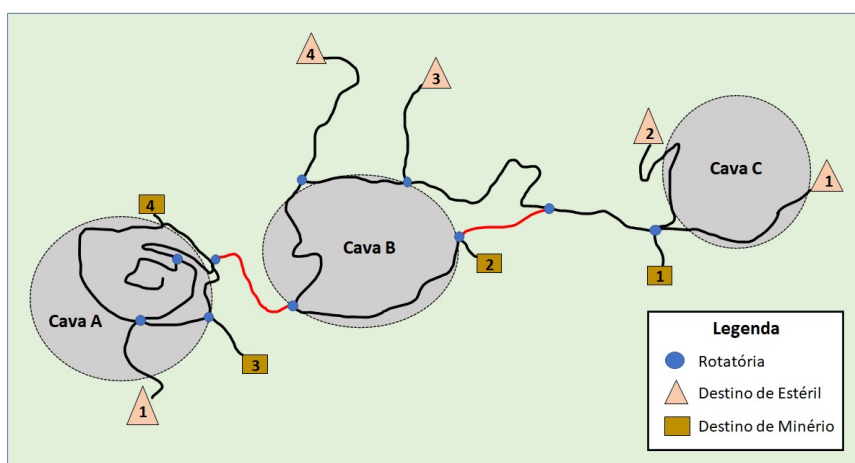


Figura 4: Representação esquemática da mina contendo as cavas, os acessos e os destinos de Minério e Estéril

Tabela 1: Comparação dos resultados obtidos pelo simulador com os dados realizados ao longo de 2021

Movimentação	Real	Simulado	Desvio(%)
ROM (Mt)	77,15	79,75	3,26
Estéril (Mt)	77,30	80,97	3,08
OM (Mt)	16,99	18,76	9,45
Mov. Total(Mt)	171,44	178,27	3,83

Todos os eventos implementados neste modelo são aleatórios e independentes entre si, tendo sua frequência e duração obtidos por meio de curvas de distribuição de probabilidade, gerados a partir do tratamento estatístico de dados históricos. A única exceção diz respeito à frequência de ocorrência do evento “Troca de turno”, que ocorre mediante um intervalo de tempo pré-definido.

4. Estudo de caso

Os dados de uma mina de minério de ferro localizada no estado de Minas Gerais, com produção em larga escala e com significativa quantidade de frentes de lavra e equipamentos de carga e transporte envolvidos na operação foram utilizados neste trabalho. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática desta mina, com os pontos de origem e destino dos materiais, bem como os principais acessos e cavas disponíveis. A validação do modelo de simulação implementado foi realizada mediante a simulação do ano de 2021, quando o mesmo sequenciamento de lavra, a mesma alocação das escavadeiras e os mesmos parâmetros operacionais dos equipamentos realizados naquele ano foram utilizados como dados de entrada do modelo. Os resultados obtidos após 10 (dez) replicações estão relacionados na Tabela 1. Os resultados obtidos, à exceção da movimentação OM, ficaram abaixo de 4% de desvio entre o valor real e o valor simulado. Apesar desta variação mais elevada na OM, a movimentação total também ficou abaixo dos 4% de variação, o que nos habilita a validar o modelo de simulação.

5. Experimento e Resultados

Foi realizado um experimento com o objetivo de se conhecer a capacidade máxima de movimentação de material pelo acesso de ligação entre as cavas A e B da mina em análise. Conhecer a capacidade máxima de movimentação por este acesso, destacado em vermelho na Figura 4, se faz importante, pois a cava A encontra-se em processo de exaustão, com término das operações prevista para o ano de 2027. Como as instalações de beneficiamento mineral 1 e 2 possuem limitada capacidade de produção, será necessário enviar minério para as instalações 3 e 4, para complemento

Tabela 2: Resultados para o cenário de avaliação da capacidade de movimentação de material no acesso de ligação entre as cavas A e B.

Movimentação	Resultado
ROM (Mt)	51,13
Estéril (Mt)	43,70
OM (Mt)	12,03
Mov. Total(Mt)	106,86
Capacidade Acesso (Mt)	94,83

da produção prevista a partir de 2027. O cenário avaliado considerou que toda a produção de ROM realizada na cava B será enviada para as instalações de beneficiamento mineral 3 e 4. Além disso, todo o estéril lavrado na cava B deverá ser enviado, respeitando o sequenciamento de blocos e a relação estéril minério estabelecida. Com essa estratégia, podemos observar, ao final do experimento, qual a quantidade máxima de material que circulou pelo acesso de interligação entre as duas cavas, estabelecendo assim a capacidade máxima do mesmo.

Para a realização deste experimento, foi utilizado um computador com Windows 10®, processador Intel®Core™i7 2.6GHz e 16Gb de memória RAM. Para o cenário em análise, foi executada 1(uma) rodada do modelo de otimização e 10 (dez) rodadas do modelo de simulação para o período de 365 dias. A alocação de 12 (doze) equipamentos de carga entre os 432 blocos previstos para serem lavrados no período avaliado demandou 9, 12 horas para obter a alocação ótima desses equipamentos. De posse desta alocação, o modelo de simulação demandou outras 22, 3 horas para realizar as 10 replicações de 1 ano de operação. No total, foram necessárias 31, 42 horas de processamento para a obtenção dos resultados, que podem ser conferidos na Tabela 2. O resultado apontado como capacidade máxima de movimentação de material no acesso entre as cavas A e B é de 94, 83Mt/ano.

6. Conclusões

Este artigo apresentou uma abordagem integrada para o problema de alocação de equipamentos de carga em uma mina a céu aberto, que contempla a implementação de um modelo de otimização para a resolução do problema de alocação de equipamentos de carga e a implementação de um modelo de simulação de eventos discretos, que, por sua vez, carrega o plano de alocação de equipamentos de carga simulando a operação da mina com esta nova estratégia.

A abordagem integrada apresentou uma grande facilidade de utilização, pois seu funcionamento ocorre mediante a interação entre planilhas excel e as ferramentas de otimização e simulação. O usuário alimenta a planilha com informações relacionadas ao sequenciamento de lavra e a quantidade de equipamentos de carga e transporte disponíveis, utilizada como dado de entrada para o modelo de otimização. O modelo de otimização gera, então, a sequência de alocação dos equipamentos de carga, que será utilizado como dado de entrada para o modelo de simulação de eventos discretos.

Os resultados obtidos após a realização dos experimentos computacionais foram utilizados para validar o modelo de simulação de eventos discretos e a abordagem integrada proposta, que apresentou resultados extremamente satisfatórios. O ponto de atenção desta abordagem diz respeito ao tempo necessário para a conclusão dos experimentos propostos, indicando que a a simulação de períodos superiores a 1 ano não são indicadas para esta abordagem.

A grande contribuição desta estratégia integrada de simulação e otimização é possibilitar ao planejador de mina a avaliação dos impactos que modificações nos planos de lavra, nas condições dos acessos, na distribuição de massa entre os destinos ou na quantidade ou nos parâmetros

operacionais dos equipamentos podem trazer ao planejamento operacional de uma operação e aos resultados relacionados ao acréscimo ou redução de produção.

Referências

- Bajany, D. M., Zhang, L., e Xia, X. (2019). An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open-pit mines: Case of heterogeneous fleet of shovels. *18th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, 52:207–212.
- Benlaajili, S., Moutaouakkil, F., Chebak, A., Medromi, H., Deshayes, L., e Mourad, S. (2020). Optimization of truck-shovel allocation problem in open-pit mines. In Hamlich, M., Bellatreche, L., Mondal, A., e Ordonez, C., editors, *Smart Applications and Data Analysis*, p. 243–255, Cham. Springer International Publishing.
- Blom, M., Pearce, A., e Stuckey, P. (2018). Short-term planning for open pit mines: A review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33:318–339.
- Caccetta, L. e Hill, S. P. (2003). An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *Journal of Global Optimisation*, 27:349–365.
- Fioroni, M., Franzese, L., Bianchi, T., Ezawa, L., e Pinto, L. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation Conference*, p. 759–767, Miami/USA. IEEE.
- Koryagin, M. e Voronov, A. (2017). Improving the organization of the shovel-truck systems in open-pit coal mines. *Transport Problems*, 12:113–122.
- Kozan, E. e Liu, S. Q. (2016). A new open-pit multi-stage mine production time tabling model for drilling, blasting and excavating operations. *Mining Technology*, 125:47–53.
- Lerchs, H. e Grossmann (1965). Optimum design of open-pit mines. In *Transactions on CIM - LXVIII*, p. 17–24, Quebec/Canada. Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- L'Heureux, G., Gamache, M., e Soumis, F. (2013). Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines. *Mining Technology*, 122:101–109.
- Newman, A. M., Rubio, E., e Weintraub, R. C. A. (2007). The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 40: 22–245.
- Ramazan, S. (2007). The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 177:1153–1166.
- Souza, M. J., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G., e Merschmann, L. H. D. C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207:1041–1051.
- Subtil, R. F., Silva, D. M., e Alves, J. C. (2011). A practical approach to truck dispatch for open pit mines. In *35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia*, p. 765–777.
- Upadhyay, S. P. e Askari-Nasab, H. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28:153–166.