

Planejamento de Lavra: um estudo de caso

Ademar Lopes da Silva Júnior* Guido Pantuza Júnior***
Luciano Perdigão Cota** Marccone Jamilson Freitas Souza****

* Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, MG,
(e-mail: ademar.lopes@vale.com)

** Instituto Tecnológico Vale, MG,
(e-mail: luciano.p.cota@itv.org)

*** Instituto Federal de Minas Gerais, MG, (e-mail:
guido.junior@ifmg.edu.br)

**** Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, (e-mail: marccone@ufop.edu.br)

Abstract: This paper presents a goal programming model to solve a problem of daily mining scheduling for the very short term mine planning of an iron ore mine. In this problem the objective is to minimize the deviations of production and quality goals, as well as the amount of trucks needed to the process. The constraints regarding quality, number of transport and loading equipment, sterile/ore ratio at a desired level, and production goal are defined previously. Trucks must be allocated dynamically, that is, without a fixed route, and their cycle time varies according to the site of mining. The model was implemented in the LINGO solver and applied to a mining complex with four unload points, where three for ore and one for sterile. The results validate the use of the model as a tool to subsidize the operator in the execution of the daily schedule.

Resumo: Este trabalho apresenta um modelo de programação matemática por metas para resolver um problema de programação diária de lavra de uma mina de minério de ferro. No problema procura-se minimizar os desvios de meta de produção, os desvios de qualidade e a quantidade de caminhões necessários ao processo. As restrições referentes a qualidade, granulometria, número de equipamentos para transporte e carga, relação estéril/minério em um nível desejado, e meta de produção são definidas previamente. Os caminhões devem ser alocados de forma dinâmica, isto é, sem rota fixa, e o tempo de ciclo deles varia de acordo com o local de lavra. O modelo foi implementado no resolvidor LINGO e aplicado a um complexo minerador com quatro pontos de descarga, sendo três para minério e um para estéril. Os resultados encontrados validam a utilização do modelo como ferramenta para subsidiar o operador na execução da programação diária.

Keywords: Open-pit Mining; Mathematical Programming; Goal Programming.

Palavras-chaves: Mineração a Céu Aberto; Modelagem Matemática; Programação por Metas.

1. INTRODUÇÃO

Após o último ciclo de valorização da *commoditie* de minério de ferro, as mineradoras passaram a ter como objetivo principal o atendimento às metas de qualidade do minério e redução da variabilidade em detrimento ao volume de produção. Devido à grande oferta de minério de ferro, o mercado passou a exigir que cada vez mais as empresas ofertassem um produto com mais qualidade. O cliente passou a pagar mais por atendimento à qualidade do material requerido, baixa variabilidade e não somente pela massa. Assim, somente volume não é garantia de lucro e geração de caixa para as empresas. O não atendimento à qualidade requerida, em alguns casos, impacta diretamente

* Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto, ao Instituto Tecnológico Vale e às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

na redução do volume de produção, com consequente aumento do custo operacional. Entretanto, reduzir os custos operacionais, sendo produtivo e eficiente, agora faz parte da rotina desses empreendimentos. Dessa forma, a busca por ferramentas que possam ser aplicadas na indústria com o objetivo de gerar valor deve ser sempre objeto de pesquisa.

O presente trabalho tem seu foco em um problema de programação diária de lavra para o planejamento de lavra de curtíssimo prazo de um complexo minerador localizado em Minas Gerais, com duas minas a céu aberto em operação. Os materiais extraídos das frentes de lavras possuem quatro destinos, sendo três pontos de descarga de minério e um ponto de descarga de estéril. Para que se tenha um bom desenvolvimento de mina, é essencial que a programação de lavra de curtíssimo prazo seja bem elaborada. São

necessários inúmeros parâmetros para que se tenha uma programação de qualidade como, por exemplo, conhecer as metas de produção e qualidade, a quantidade de equipamentos de carga e transporte que estão disponíveis para operação, suas capacidades, o tempo de ciclo em função da frente de lavra e o respectivo destino e as características físicas e químicas por frente. A utilização somente da experiência do operador na busca por uma programação de produção e blendagem de minério no curtíssimo prazo que seja eficiente e ágil, e que seja capaz de atender a todas essas questões, tem mostrado não ser suficiente. Nesse sentido, este artigo tem como principal objetivo apresentar um modelo de programação matemática capaz de gerar soluções para atender as metas de produção e qualidade nos pontos de descarga de minério, bem como reduzir o número de caminhões usados, respeitando-se um conjunto de restrições, entre elas o atendimento à Relação Estéril/Minério (REM). Assim, é esperado um aumento da eficiência operacional e a melhora da competitividade da empresa em seu mercado de atuação.

O restante deste trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 o problema é caracterizado. Na Seção 3 é feita uma breve revisão de literatura. Na Seção 4 é apresentado o modelo matemático proposto para representar o problema. Na Seção 5 são apresentados os resultados dos experimentos computacionais e na Seção 6 o trabalho é concluído.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema foco deste trabalho envolve duas minas de minério de ferro em operação, quatro usinas com três pontos distintos para descarga de minério, uma pilha de estéril, sete equipamentos de carga e quarenta e cinco caminhões de mesmo porte para transportar minério e estéril. A Figura 1 ilustra algumas das características do problema tratado. Observa-se algumas frentes com diferentes parâmetros de qualidade que podem ser destinados aos três pontos de descarga de minério e também para o ponto de descarga de estéril. Cada ponto de descarga de minério possui uma meta de produção e outra de qualidade. Considera-se a alocação dinâmica, ou seja, os caminhões podem realizar rotas diferentes durante a operação. A disponibilidade das frentes de lavra para elaboração da programação de lavra leva em consideração o que foi definido pelo plano de lavra mensal.

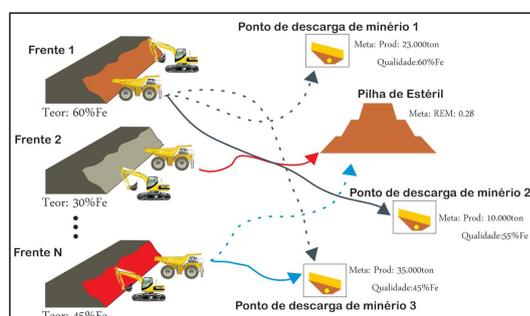


Figura 1. Ilustração do problema tratado.

O plano de lavra mensal é composto por uma geometria que considera diversos parâmetros operacionais para a sua elaboração. A partir do plano são disponibilizadas as frentes de lavra que irão compor a programação diária de produção. O seu propósito é direcionar a lavra através de

uma geometria que é identificada na mina pela equipe de topografia com o uso de estacas e sequenciada pela equipe de controle de qualidade para que através das programações diárias, as especificações de massa e qualidade sejam atendidas em todos os pontos de descarga de minério. A programação semanal e diária é elaborada por um técnico de mineração, que informa quais frentes estão disponíveis no período e verifica a qualidade e produtividade delas. Ao final do mês, para avaliar a execução do plano de lavra mensal, são feitas as medições topográficas para cálculo dos indicadores de aderência, avaliação geométrica do plano, e reconciliação, avaliação feita entre as massas e qualidades previstas e realizadas. Atualmente o responsável técnico do controle de qualidade realiza avaliação visual das frentes e calcula, com base em sua experiência de mina, e por tentativa e erro, a quantidade de material que deve ser retirada por cada equipamento. Entretanto, dada a complexidade do problema, nem sempre as metas de produção, especificação e qualidade, assim como a REM mínima, são atendidas.

Para o empreendimento mineiro, a REM é considerada um dos principais indicadores de mina. A extração de estéril tem por objetivo garantir a liberação de novas frentes de lavra de minério, desenvolver a mina e confeccionar novos acessos. O não cumprimento da REM pode influenciar a oferta de minério em um curto espaço de tempo com a perda de volume, qualidade e perda de mercado, devido ao não cumprimento das especificações dos produtos. Dessa forma, o problema da produção e mistura de minério de curtíssimo prazo é real e a proposta de desenvolver um modelo matemático contribui com a possibilidade de escolher uma programação diária mais adequada para a operação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Para fornecer um minério de qualidade uniforme para o processo é necessário misturar minério de diferentes qualidades proveniente de várias partes da mina ou de diferentes minas. O objetivo é assegurar a uniformidade da alimentação, já que mudanças são usualmente acompanhadas de aumento do custo total da operação (Alarie and Gamache, 2002). Chanda and Dagdelen (1995) apresentaram um modelo de programação linear por metas para resolver um problema de mistura de minérios no planejamento de curto prazo em uma mina de carvão. O objetivo foi maximizar um critério econômico e reduzir a soma dos desvios dos parâmetros individuais de qualidade e da tonelagem em relação aos valores desejados.

De acordo com Alarie and Gamache (2002), o transporte de material é uma das mais importantes atividades na operação de minas a céu aberto devido ao seu elevado custo. Segundo Maran and Topuz (1988), é exigido um grande volume de capital e recursos para executar o transporte de carga nas minas. Assim, minimizar o custo do transporte de material da mina para a usina é essencial, isto por que de acordo com Gershon (1982) o custo está relacionado à escolha do ponto de extração.

O OTISIMIN, sistema de otimização e simulação desenvolvido por Merschmann (2002), realiza análises de cenário para minas a céu aberto em dois módulos. O primeiro é um modelo de programação linear que busca otimizar

a mistura de minérios para atender as especificações dos parâmetros de controle e definir o local onde os equipamentos devem ser alocados. O segundo módulo, que é de simulação, é usado para validar o resultado da otimização advinda do primeiro módulo. Esse modelo foi aperfeiçoado por Costa et al. (2004). O aperfeiçoamento principal consistiu em incluir o atendimento às metas de produção e qualidade, por meio da minimização dos desvios dessas metas na função de avaliação.

Guimarães et al. (2007) apresentaram um modelo de programação linear por metas e alocação dinâmica que acrescentava ao modelo de Costa et al. (2004) restrições de taxa de utilização dos veículos de transporte. Além disso, a formulação proposta considerava um terceiro objetivo, a minimização do número de veículos. Os resultados foram validados por um modelo de simulação computacional.

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

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

Martins (2013) propôs um modelo de programação inteira mista para o planejamento de lavra de uma mina de ferro com dois pontos de descarga de minério e outro de estéril, considerando um tempo médio de ciclo dos caminhões. Esse modelo interage com um modelo de simulação que valida o resultado da otimização.

Silva et al. (2014) desenvolveram um algoritmo heurístico que combina as metaheurísticas GRASP e *Late Acceptance Hill-Climbing* para tratar um problema de planejamento operacional de lavra de uma mina. O trabalho difere de outros da literatura por considerar a possibilidade de extrair mais de um tipo de material de uma mesma frente de lavra. As frentes são divididas em blocos, e esses, por sua vez, em sub-blocos contendo um único tipo de material. Existem dependências entre os sub-blocos, restringindo a sequência de lavra na mina.

O modelo aqui apresentado difere dos trabalhos citados anteriormente por tratar de duas minas distintas com três pontos de descarga de minério e um ponto para descarga de estéril, o que torna a modelagem mais complexa. Ele proporciona a possibilidade de obter ganhos na efetividade de lavra com o cumprimento das metas de produção e qualidade e redução do número de caminhões necessários ao processo.

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Nesta seção é apresentado um modelo de programação matemática para solucionar o problema de programação diária de lavra para o planejamento de lavra de curtíssimo

prazo das minas de Capão Xavier e Mar Azul. O modelo considera a existência de mais de um ponto de descarga de minério e um ponto de descarga de estéril. Ele considera, ainda, que o tempo de ciclo dos caminhões depende do material transportado (minério ou estéril) e da distância entre a frente e o ponto de descarga. Além disso, faz-se diferenciação das capacidades de carga para minério e estéril e considera-se a alocação dinâmica dos caminhões.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do problema e as variáveis de decisão.

O modelo de programação matemática, apresentado pelas Equações (1) a (39), representam o problema em estudo.

$$\min \sum_{b \in B} (\alpha^- dp_b^- + \alpha^+ dp_b^+) + \sum_{b \in B} \sum_{j \in Q} (\beta_{jb}^- dm_{jb}^- + \beta_{jb}^+ dm_{jb}^+) + \sum_{b \in B} \sum_{j \in Q} (\delta_{jb}^- de_{jb}^- + \delta_{jb}^+ de_{jb}^+) + \sum_{l \in V} \omega_l u_l \quad (1)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_{jb}) x_{ib} - de_{jb}^+ \leq 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (2)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_{jb}) x_{ib} + de_{jb}^- \geq 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (3)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_{jb}) x_{ib} + dm_{jb}^- - dm_{jb}^+ = 0 \quad \forall j \in Q, b \in B \quad (4)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pu_b \leq 0 \quad \forall b \in B \quad (5)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pl_b \geq 0 \quad \forall b \in B \quad (6)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ib} - pr_b + dp_b^- - dp_b^+ = 0 \quad \forall b \in B \quad (7)$$

$$x_{ib} - qu_i \leq 0 \quad \forall i \in F, b \in B \quad (8)$$

$$\sum_{i \in E} x_{i,pest} - rem \sum_{b \in B} \sum_{i \in M} x_{ib} \geq 0 \quad (9)$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad (10)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in C \quad (11)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ib} - \sum_{k \in C} cum_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in M \quad (12)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{k \in C} cue_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in E \quad (13)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ib} - \sum_{k \in C} clm_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in M \quad (14)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{k \in C} cle_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in E \quad (15)$$

$$\sum_{j \in B} x_{ij} - \sum_{l \in V} z_{(l,i,b)} capm_l = 0 \quad \forall i \in M, b \in B \quad (16)$$

$$x_{i,pest} - \sum_{l \in V} z_{(l,i,pest)} cape_l = 0 \quad \forall i \in E \quad (17)$$

$$n_{il} - z_{(l,i,b)} = 0 \quad \forall i \in M, l \in V \quad (18)$$

Tabela 1. Descrição dos parâmetros e variáveis de decisão

Parâmetros do problema			
M	Conjunto das frentes de minério	E	Conjunto das frentes de estéril
F	$M \cup E$	Q	Conj. dos parâmetros de qualidade
C	Conj. dos equipamentos de carga	V	Conj. dos equipamentos de transporte
B	Conj. pontos de descarga de minério	$pest$	Ponto de descarga de estéril
$inicio$	Nó origem	fim	Nó destino
D	$B \cup \{pest\}$	N	$F \cup B \cup \{pest\} \cup \{inicio\} \cup \{fim\}$
pr_b	Ritmo de produção recomendado do britador b (Ton/h)	pl_b	Ritmo de produção mínimo para o britador b (Ton/h)
pu_b	Ritmo de produção máximo do britador b (Ton/h)	α^-	Penalidade por desvio negativo de produção
β_{jb}^-	Penalidade por desvio negativo de meta do parâmetro j na mistura do britador b	α^+	Penalidade por desvio positivo de produção
β_{jb}^+	Penalidade por desvio positivo de meta do parâmetro j na mistura do britador b	δ_{jb}^-	Penalidade por desvio negativo de especificação do parâmetro j na mistura do britador b
ω_l	Penalidade pelo uso do caminhão l	δ_{jb}^+	Penalidade por desvio positivo de especificação do parâmetro j na mistura do britador b
qu_i	Ritmo de lavra máximo na frente i (Ton/h)	rem	Relação estéril/minério mínima requerida
clm_k	Produção mínima de minério do equipamento de carga k (Ton/h)	cum_k	Produção máxima de minério do equipamento de carga k (Ton/h)
cle_k	Produção mínima de estéril do equipamento de carga k (Ton/h)	cue_k	Produção máxima de estéril do equipamento de carga k (Ton/h)
$capm_l$	Capacidade do caminhão l ao transportar minério (Ton)	$cape_l$	Capacidade do caminhão l ao transportar estéril (Ton)
tx	Taxa de utilização máxima dos caminhões	$tv_{(l,o,d)}$	Tempo de viagem do caminhão l do nó de origem o até o nó de destino d somado ao tempo de carga e descarga (min)
$tcMin_l$	Tempo de ciclo do caminhão l para as frentes de minério (min)	$tcEst_l$	Tempo de ciclo do caminhão l para as frentes de estéril (min)
$disp_k$	Parâmetro que assume o valor 0 se a carregadeira k está disponível e 0, c.c.	$comp_{kl}$	Igual a 1 se a carregadeira k é compatível com o caminhão l e 0, caso contrário
t_{ij}	Teor do parâmetro j na frente i (%)	tr_{jb}	Teor recomendado para o parâmetro j no britador b (%)
t_{jb}	Teor máximo admissível para o parâmetro j no britador b (%)	tl_{jb} (%)	Teor mínimo admissível para o parâmetro j no britador b (%)
Variáveis de decisão			
x_{ib}	Ritmo de lavra da frente i no britador b (Ton/h)	tc_l	Tempo de ciclo total do caminhão l (min)
y_{ik}	Igual a 1 se a carregadeira k opera na frente i e 0, caso contrário	dm_{jb}^+	Desvio positivo de meta do parâmetro j no britador b (Ton/h)
dm_{jb}^-	Desvio negativo de meta do parâmetro j no britador b (Ton/h)	de_{jb}^-	Desvio negativo de especificação do parâmetro j no britador b (Ton/h)
de_{jb}^+	Desvio positivo de especificação do parâmetro j no britador b (Ton/h)	dp_b^-	Desvio negativo de meta do ritmo de produção no britador b (Ton/h)
dp_b^+	Desvio positivo de meta do ritmo de produção no britador b (Ton/h)	u_l	Assume valor 1 se o caminhão l for usado e 0, caso contrário
$z_{(l,o,d)}$	Número de vezes que o caminhão l percorre o arco (o,d) , com $o, d \in N$	n_{il}	Número de viagens do caminhão l até a frente i

$$n_{il} - z_{(l,i,pest)} = 0 \quad \forall i \in E, l \in V \quad (19)$$

$$z_{(l,b,f)} \leq 1 \quad \forall l \in V, f \in M, b \in B \quad (20)$$

$$z_{(l,pest,e)} \leq 1 \quad \forall l \in V, e \in E \quad (21)$$

$$tc_l - 60 \sum_{k \in C, comp_{lk}=1} y_{ik} \leq 0 \quad \forall l \in V, i \in F \quad (22)$$

$$\frac{tc_l}{60} \leq tx \quad \forall l \in V \quad (23)$$

$$\frac{tc_l}{60} \leq u_l \quad \forall l \in V \quad (24)$$

$$z_{(l, inicio, f)} - \sum_{b \in B} z_{(l, f, b)} = 0 \quad \forall l \in V, f \in M \quad (25)$$

$$z_{(l, inicio, e)} - z_{(l, e, pest)} = 0 \quad \forall l \in V, e \in E \quad (26)$$

$$z_{(l, b, fim)} - \sum_{f \in M} z_{(l, f, b)} = 0 \quad \forall l \in V, b \in B \quad (27)$$

$$z_{(l, pest, fim)} - \sum_{e \in E} z_{(l, e, pest)} = 0 \quad \forall l \in V \quad (28)$$

$$u_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in V \quad (29)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad (30)$$

$$n_{il} \in Z^+ \quad \forall i \in F, l \in V \quad (31)$$

$$z_{(l,o,d)} \in Z^+ \quad \forall l \in V, o \in N, d \in N \quad (32)$$

$$x_{ib} \geq 0 \quad \forall i \in F, b \in B \quad (33)$$

$$x_{ipest} \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (34)$$

$$dm_{jb}^+, dm_{jb}^-, de_{jb}^+, de_{jb}^- \geq 0 \quad \forall j \in Q, d \in B \quad (35)$$

$$dm_{jb}^+, dm_{jb}^-, de_{jb}^+, de_{jb}^- \geq 0 \quad \forall j \in Q, d \in B \quad (36)$$

$$dp^+, dp^- \geq 0 \quad \forall b \in B \quad (37)$$

$$tc_l \geq 0 \quad \forall l \in V \quad (38)$$

$$y_{ik} = 0 \quad \forall i \in F, k \in C \mid disp_k = 0 \quad (39)$$

O tempo de ciclo total do caminhão l para todas as viagens a ele alocadas (tc_l), em minutos, é calculado pela Eq. (40), na qual tem-se $\forall l \in V$:

$$tc_l = tcMin_l + tcEst_l \quad \forall l \in V \quad (40)$$

$$tcMin_l = \sum_{b \in B} \sum_{f \in M} (z_{(l, inicio, f)} tv_{(l, inicio, f)} + z_{(l, b, f)} tv_{(l, b, f)} + z_{(l, f, b)} tv_{(l, inicio, f)} + z_{(l, pest, f)} tv_{(l, pest, f)}) \quad (41)$$

$$tcEst_l = \sum_{b \in B} \sum_{e \in E} (z_{(l, inicio, e)} tv_{(l, inicio, e)} + z_{(l, pest, e)} tv_{(l, pest, e)} + z_{(l, e, pest)} tv_{(l, e, pest)} + z_{(l, b, e)} tv_{(l, b, e)}) \quad (42)$$

A Equação (1) representa a função objetivo, que visa a minimização dos desvios de produção e qualidade em relação aos valores requeridos, bem como o número de veículos utilizados. As restrições (2) e (3) possibilitam que os limites máximo e mínimo de cada parâmetro de controle possam ser extrapolados em cada ponto de descarga. As restrições (4) visam a alcançar a meta de qualidade dos parâmetros de controle nos pontos de descarga de minério. As restrições (5) e (6) asseguram que os limites máximo e mínimo, para o ritmo de produção dos pontos de descarga de minério, sejam respeitados. As restrições (7) visam ao atendimento das metas de ritmo de produção nos pontos de descarga de minério. Para assegurar que não seja solicitado mais minério que o disponível pelas frentes é utilizado o conjunto de restrições (8). A restrição (9) assegura que a REM mínima seja atendida. As restrições (11) e (10) garantem, respectivamente, que cada equipamento de carga opere somente em uma única frente e que cada frente de lavra só possua um único equipamento de carga. As restrições (12) e (13) impedem que a quantidade extraída de minério ou estéril supere a capacidade máxima de produção do equipamento de carga em operação. Para garantir que esses equipamentos não fiquem ociosos, extraindo massa abaixo da quantidade mínima, foram utilizadas as restrições (14) e (15) para minério e estéril, respectivamente. As restrições (16) e (17) asseguram que o ritmo de lavra em cada frente de minério e de estéril, respectivamente, é dado pela soma do número de viagens àquela frente feita por todos os caminhões vezes sua respectiva capacidade. As restrições (18) e (19) garantem que o número de viagens de cada caminhão a cada frente de minério e de estéril seja igual ao número de visitas aos pontos de descarga de minério (18) e de estéril (19). As restrições (20) e (21) definem que o caminhão obrigatoriamente deve realizar todas as viagens a ele alocadas primeiramente a um conjunto de frentes (somente minério ou somente estéril) e, depois, ao outro (estéril ou minério). Isto é, se o caminhão tiver que realizar 5 viagens a uma frente de minério e 2 a uma frente de estéril, então ele deve realizar todas as 5 viagens à frente de minério e só depois as duas viagens à frente de estéril. Observe que se o caminhão tiver que visitar mais de um ponto de descarga de minério, ele realizará todas as viagens a um ponto de descarga de minério e, em seguida, ele realizará todas as viagens para o outro ponto de descarga de minério. As restrições (22) asseguram que somente caminhões compatíveis sejam carregados pelos equipamentos de carga. As restrições (23) determinam a taxa máxima de utilização de cada caminhão l para cada hora. As restrições (24) retornam um valor unitário para a variável u_l sempre

que um caminhão for utilizado. As restrições (25), (26), (27) e (28) garantem o balanceamento do fluxo nos arcos. As restrições (29) e (30) estabelecem o domínio das variáveis de decisão relacionadas à utilização dos caminhões e alocação dos equipamentos de carga, respectivamente. As restrições (31), (32), (33), (34), (36), (37) e (38) definem o domínio das demais variáveis de decisão. As restrições (39) asseguram que não serão alocadas viagens às carregadeiras que estejam indisponíveis.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O modelo apresentado na Seção 4 foi implementado no resolvidor LINGO, versão 10.0, da Lindo Systems Inc. (<http://www.lindo.com>) interfaceando com uma planilha do Microsoft Excel. O computador utilizado nos experimentos computacionais foi um notebook Dell XPS, com processador Intel Core I5, clock de 2,5 GHz, 6 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 de 64 bits. A instância utilizada nos experimentos foi extraída de uma condição real de lavra das minas Capão Xavier e Mar Azul da Vale S.A. Nessa instância há 15 frentes de lavra e 13 parâmetros de controle, envolvendo qualidade e granulometria. As frentes de lavra disponíveis possuem teores de ferro que variam de 43,5% até 67,0%, os teores de manganês estão distribuídos entre 0,01% até 0,18% e a granulometria +8 mm varia de 8,20% a 75,2%.

Foram considerados dois cenários diferentes com relação aos pesos dados às componentes da função objetivo, dada pela Equação (1). A Tabela 2 mostra como são classificados os parâmetros quanto à criticidade, pc_j é o peso de cada parâmetro de controle. Na Tabela 3 são apresentados os pesos dos desvios de produção, especificação, qualidade e utilização de caminhões, $Norm_{jb}$ é a normalização dos parâmetros j no britador b importante devido as diferentes grandezas dos parâmetros. No cenário 1 a prioridade mais alta é atender à produção enquanto a redução do número de caminhões tem a prioridade mais baixa. Já no segundo cenário, a prioridade continua sendo a produção, mas a redução do número de caminhões tem a segunda prioridade. Isso acontece porque a variação da produção ocorre em múltiplos da capacidade do caminhão, tipicamente de 64 toneladas (considerando minério). Como o peso para o desvio de produção é 100, então cada desvio impacta 6400 (= 100 × 64) na função objetivo. Por outro lado, o uso de cada caminhão impacta 4800 (= 4800 × 1).

Tabela 2. Pesos dos parâmetros de controle.

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

Tabela 3. Pesos dos desvios de produção, especificação, qualidade e uso dos caminhões.

Componente	Valor
α^-, α^+	100
$\beta_{jb}^-, \beta_{jb}^+$	$1 \times Norm_{jb} \times pc_j$
$\delta_{jb}^-, \delta_{jb}^+$	$10 \times Norm_{jb} \times pc_j$
ω_l (Cen.1)	6,4
ω_l (Cen.2)	4800

A Tabela 4 mostra os resultados nos dois cenários com relação ao atendimento das metas de produção nos três pontos

de descarga de minério, REM e número de caminhões. Na primeira coluna é informado o indicador; na segunda, terceira e quarta colunas, a meta (pr_b , se britador), o limite inferior (pl_b) e o superior (pu_b), respectivamente, para esse indicador. Nas duas últimas colunas são reportados os resultados de produção encontrados em cada cenário.

Tabela 4. Resultados dos indicadores de ritmo de produção, REM e número de caminhões.

Indicador	Meta de prod. (pr_b)	Prod. mín. (pl_b)	Prod. máx. (pu_b)	Result. (Cen.1)	Result. (Cen.2)
Brit 1 (Ton/h)	700	500	1000	700	500
Brit 2 (Ton/h)	700	500	1000	500	500
Brit 3 (Ton/h)	1800	1500	2000	1680	1560
REM	$\geq 0,25$	-	-	0,25	0,26
#Caminhões	-	-	-	45	40

Como pode ser observado na Tabela 4, e como era esperado em vista dos pesos estabelecidos na função objetivo, a produção no cenário 1 ficou mais próxima da meta do que no cenário 2. Por outro lado, no cenário 2 houve uma redução de 5 caminhões em relação ao cenário 1.

A Figura 2 ilustra os resultados de 4 parâmetros de controle (Fe, Si, Al e Pf Globais) em cada ponto de descarga de cada cenário. Como pode ser observado, o cenário 1 apresentou melhores resultados com relação aos principais parâmetros de qualidade se comparado ao cenário 2, isto porque no cenário 1 o atendimento a esses parâmetros tem prioridade sobre a redução do número de caminhões.

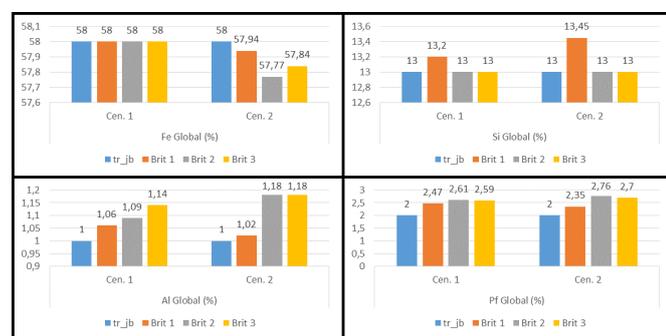


Figura 2. Percentuais dos parâmetros Fe, Si, Al e Pf Globais nos três pontos de descarga de minério.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho tratou um problema de planejamento e mistura de minérios de curtíssimo prazo de uma indústria brasileira de mineração de ferro. Para resolvê-lo, foi desenvolvida uma formulação de programação linear inteira mista por metas que leva em consideração o atendimento das metas de produção e qualidade, bem como a redução do número de caminhões necessários à operação. Essa formulação foi aplicada a um estudo de caso real de um complexo minerador com duas minas que, em comum, fornecem minério para três pontos de descarga de minério e depositam estéril em um único ponto. Foram analisados dois cenários que diferem entre si com relação aos pesos dados às componentes da função objetivo. No primeiro, a produção tinha a maior prioridade e a redução do número de caminhões a menor prioridade. Já no segundo cenário, a redução do número de caminhões tinha a segunda maior

prioridade. Como esperado, no cenário 1 a produção ficou mais próxima das metas, e não houve redução no número de caminhões. Por outro lado, no cenário 2 houve uma redução de caminhões no processo produtivo.

Desta forma, os resultados encontrados validam seu uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão. De fato, o operador pode, por meio da formulação, escolher com base no cenário diário de lavra (necessidade de aumento de produção, baixa disponibilidade de equipamentos, flexibilização da qualidade, etc.), escolher qual objetivo é mais importante. Como trabalhos futuros esta formulação será implementada em outro resolvidor do mercado mais poderoso, tal como o GUROBI, além de adaptada para tratar outros complexos mineradores.

REFERÊNCIAS

- Alarie, S. and Gamache, M. (2002). Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *Int. Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16(1), 59–76.
- Chanda, E. and Dagdelen, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *Int. Journal of Surface Mining and Reclamation*, 9(4), 203–208.
- Costa, F.P., Souza, M.J.F., and Pinto, L.R. (2004). Um modelo de alocação dinâmica de caminhões. *Revista Brasil Mineral*, 231, 26–31.
- Gershon, M. (1982). A linear programming approach to mine scheduling optimization. In *Proceedings of the 17th Application of computers and operations research in the mineral industry*, 483–493. New York.
- Guimarães, I.F., Pantuza Jr., G., and Souza, M.J.F. (2007). Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto. In *Anais do XIV Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP*. Bauru, SP.
- Maran, J. and Topuz, E. (1988). Simulation of truck haulage systems in surface mines. *Int. J. of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2(1), 43–49.
- Martins, A.G. (2013). *Simulação das operações de lavra da mina de Brucutu utilizando um modelo de programação linear para alocar os equipamentos de carga*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, UFOP, Ouro Preto, MG.
- Merschmann, L.H.C. (2002). *Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Pantuza Jr., G. and Souza, M.J.F. (2010). Um modelo de programação matemática para o problema de planejamento de lavra considerando o método de lavra seletiva. In *Anais do XVII Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP*. Bauru, SP.
- Silva, A.A., Souza, M.J.F., Guimarães, V.L., and Martins, A.G. (2014). Planejamento operacional de lavra: Um estudo de caso. In *Anais do XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, volume 46, 2030–2041. Salvador.
- Souza, M.J.F., Coelho, I.M., Ribas, S., Santos, H.G., and Merschmann, L.H.C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European J. of Op. Res.*, 207(2), 1041–1051.