

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES:
ABORDAGENS EXATA E HEURÍSTICA**

Francisco César Rodrigues de Araújo
Mestrando–PPGEM/EM/UFOP–Ouro Preto–MG
E-mail: fcesaraujo@yahoo.com.br

Marcone Jamilson Freitas Souza
Prof. Adjunto–PPGEM/EM/UFOP e DECOM/ICEB/UFOP–Ouro Preto–MG
E-mail: marcone@iceb.ufop.br

RESUMO

ESTE TRABALHO TRATA DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES. ESTE PROBLEMA CONSISTE EM DETERMINAR O NÚMERO DE VIAGENS QUE CADA CAMINHÃO DEVE FAZER A CADA FRENTE DE LAVRA, BEM COMO DECIDIR EM QUAIS FRENTES DE LAVRA ALOCAR AS CARREGADEIRAS, DE SORTE A ATENDER AS METAS DE PRODUÇÃO E QUALIDADE REQUERIDAS PARA O MINÉRIO A SER PRODUZIDO, FAZENDO O MELHOR APROVEITAMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS DISPONÍVEL. DADA SUA COMPLEXIDADE COMBINATÓRIA, O PROBLEMA É ABORDADO POR UM PROCEDIMENTO HEURÍSTICO BASEADO NA METAHEURÍSTICA *ITERATED LOCAL SEARCH*. TAMBÉM É FORMULADO UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA, O QUAL SERVE PARA VALIDAR O ALGORITMO HEURÍSTICO PROPOSTO. OS MODELOS PROPOSTOS SÃO TESTADOS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE DADOS REAIS EM UM *SOFTWARE* DESENVOLVIDO PARA ESTE FIM.

Palavras-Chave: Planejamento de lavra em minas a céu aberto, Alocação Dinâmica de Caminhões, *Iterated Local Search*, Metaheurísticas.

ABSTRACT

THIS WORK DEALS WITH THE OPERATIONAL MINING PLANNING IN OPEN PIT MINES WITH EQUIPMENT DYNAMIC ALLOCATION. THIS PROBLEM CONSISTS IN DETERMINING THE NUMBER OF TRIPS THAT EACH TRUCK WOULD DO IN EACH MINING SITE AS WELL AS DECIDING IN WHICH MINING SITE TO ALLOCATE THE LOADERS MACHINES, IN ORDER TO ATTEND THE PRODUCTION AND QUALITY GOALS REQUIRED TO THE ORE PRODUCTION, DOING THE BEST UTILIZATION OF THE AVAILABLE VEHICLE FLEET. DUE TO THE COMBINATORIAL COMPLEXITY OF THE PROBLEM, IT IS SOLVED USING A HEURISTIC PROCEDURE BASED ON THE ITERATED LOCAL SEARCH METAHEURISTIC. ALSO IT IS PROPOSED A MODEL OF MATHEMATICAL PROGRAMMING, WHICH SERVES TO VALIDATE THE PROPOSED METAHEURISTIC ALGORITHM. THE PROPOSED MODELS ARE VALIDATED BY THE UTILIZATION OF REAL DATA IN A SOFTWARE DEVELOPED FOR THIS PURPOSE.

Keywords: *Operational Mining Planning in open pit mines, Equipment Dynamic Allocation, Iterated Local Search, Metaheuristics.*

INTRODUÇÃO

O objetivo principal da Pesquisa Operacional (PO) é encontrar a melhor utilização de recursos limitados, procurando determinar a programação otimizada de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistêmica problemas que envolvam a utilização de recursos escassos. Dentre as aplicações da PO, destaca-se sua utilização em Planejamento de Lavra a céu aberto em Mineração, em especial, na alocação de máquinas (carregadeiras e/ou escavadeiras) e caminhões em uma frente de lavra.

Estudos como os de Chanda e Dagdelen (1995), Alvarenga (1997), Costa (2005), Pinto e Merschmann (2001), Merschmann (2002), Pinto *et al.* (2003) e Costa *et al.* (2004, 2005), têm utilizado a Pesquisa Operacional com o objetivo de aplicar metodologias para a solução destes tipos de problemas. Tais esforços se concentraram na aplicação de técnicas de otimização (programação linear e métodos heurísticos) que podem, no entanto, ser aprimoradas. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo remodelar as metodologias referidas para a solução do problema mencionado, concentrando-se nos métodos heurísticos. Apesar de estas técnicas não garantirem a otimalidade, elas conseguem, em geral, produzir soluções de boa qualidade, são de fácil implementação e baixo custo de desenvolvimento. Dentre as heurísticas, destacam-se as chamadas metaheurísticas, as quais, ao contrário das heurísticas convencionais, têm caráter geral e são providas de mecanismos para escapar de ótimos locais (SOUZA, 2007).

O restante do trabalho está organizado como segue. Na seção a seguir, é descrito o problema abordado. Logo após, é apresentada uma modelagem de programação matemática para o problema e, ainda, uma modelagem heurística. Em seguida, são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos pela aplicação dos modelos desenvolvidos a um caso real. A última seção conclui o trabalho.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES

No Planejamento de Lavra a Céu Aberto em Mineração, em especial, na alocação de máquinas e caminhões em uma frente de lavra, cada frente contém uma determinada quantidade de minério, com características físicas, químicas e econômicas diferenciadas, denominadas parâmetros de controle. Para satisfazer as especificações exigidas pelos clientes, é necessário selecionar as frentes a serem lavradas, bem como os respectivos ritmos de lavra. Para a operação de minério e estéril, a mina conta com uma frota limitada de equipamentos de carga, os quais devem ser alocados às frentes de lavra e operarem em uma faixa de produtividade que torne viável sua utilização (COSTA, 2005). O transporte do material retirado da frente de lavra é realizado por uma frota de caminhões com capacidades de carga diferentes. Esses caminhões são alocados às frentes de lavra dinamicamente, tentando-se evitar a formação de filas, ou seja, o caminhão é alocado a um ponto de carga ou basculamento que proporcione o menor tempo de fila possível. O ritmo de lavra é determinado pelas capacidades de operação dos equipamentos de carga e transporte alocados às diversas frentes.

No sistema de alocação dinâmica, os caminhões não ficam fixos a uma determinada frente de lavra, como no modelo estático. Eles podem ser direcionados a diferentes frentes de lavra compatíveis, aumentando a produtividade da frota e proporcionando, segundo Costa

(2005), um aumento na capacidade de produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter o mesmo nível de produção.

No problema abordado, há dois pontos de descarga: um para minério e outro para estéril. Considera-se também que o transporte do material às frentes e ao britador é feito por caminhões de capacidades diferentes. Sendo a alocação dinâmica, ao descarregar o material, seja no britador (ou pilhas de estoque próximas ao britador) ou na pilha de estéril, o caminhão é direcionado a uma frente, não necessariamente a mesma da viagem anterior. Admite-se, também, que há um conjunto de carregadeiras de diferentes capacidades de carregamento, sendo este conjunto menor que o conjunto das frentes às quais elas serão alocadas. Considera-se, também, o planejamento para uma hora de produção, o qual é aplicado até uma frente exaurir ou ocorrer uma parada de equipamento, situação na qual deve ser feito outro planejamento. Dado o elevado custo de uma carregadeira, normalmente impõe-se uma quantidade mínima a ser extraída para justificar economicamente sua utilização. É desejável também no planejamento de lavra considerar uma taxa de utilização para os caminhões, ou seja, pode-se desejar que cada caminhão utilizado no transporte de minério e estéril tenha uma determinada produtividade. Com a introdução deste requisito, o número de caminhões utilizados no transporte do material poderá ser, naturalmente, menor do que aquele conseguido sem a utilização dessa taxa.

MODELAGEM DO PROBLEMA ABORDADO

Introdução

Para resolver o problema, são apresentados dois modelos: um de programação matemática e outro heurístico. O primeiro modelo servirá para validar o segundo e será aplicado a instâncias de pequeno porte. Para problemas de porte mais elevado, o primeiro modelo, em geral, não é capaz de resolvê-los na otimalidade, em virtude do tempo proibitivo de execução.

Modelo de programação matemática

O modelo proposto de alocação dinâmica de caminhões é adaptado de Costa *et al.* (2004). Especificamente, a equação referente à relação estéril/minério é substituída por uma equação de meta de produção de estéril. Assim são criadas variáveis de desvio relativas ao não atendimento desta meta. Adicionalmente são incluídas restrições relativas às taxas de utilização dos veículos de transporte, bem como uma componente de avaliação do número de veículos usados.

Sejam os seguintes parâmetros de entrada:

- M : Conjunto de frentes de minério;
- E : Conjunto de frentes de estéril;
- F : Conjunto de frentes formado por $M \cup E$;
- S : Conjunto de parâmetros de qualidade analisados no minério;
- C : Conjunto de equipamentos de carga;
- V : Conjunto de equipamentos de transporte;
- Pr : Ritmo de lavra recomendado relativo a minério (t/h);

Pl : Ritmo de lavra mínimo relativo a minério (t/h);
 Pu : Ritmo de lavra máximo relativo a minério (t/h);
 Er : Ritmo de lavra recomendado relativo a estéril (t/h);
 a^- : Penalidade por desvio negativo da produção de minério;
 a^+ : Penalidade por desvio positivo da produção de minério;
 γ^- : Penalidade por desvio negativo da produção de estéril;
 γ^+ : Penalidade por desvio positivo da produção de estéril;
 t_{ij} : Valor do parâmetro j na frente i (%);
 tr_j : Valor recomendado para o parâmetro j na mistura (%);
 tl_j : Valor mínimo admissível para o parâmetro j na mistura (%);
 tu_j : Valor máximo admissível para o parâmetro j na mistura (%);
 β^- : Penalidade por desvio negativo para o parâmetro j na mistura;
 β^+ : Penalidade por desvio positivo para o parâmetro j na mistura;
 Qu_i : Ritmo de lavra máximo para a frente i (t/h);
 Cl_k : Produção mínima do equipamento de carga k (t/h);
 Cu_k : Produção máxima do equipamento de carga k (t/h);
 cap_l : Capacidade do caminhão l (t);
 T_{il} : Tempo total de ciclo do caminhão l na frente i (min);
 ω_l : Peso associado à importância da utilização do caminhão l ;
 $TxMax_l$: Taxa máxima de utilização admitida para o caminhão l ;
 g_{lk} : parâmetro que assume o valor 1 se o caminhão l é compatível com a carregadeira k e 0, caso contrário;

e as seguintes variáveis de decisão:

x_i : Ritmo de lavra da frente i (t/h);
 y_{ik} : variável que assume o valor 1 se a carregadeira k opera na frente i e 0, caso contrário;
 n_{il} : Número de viagens que um caminhão l realiza na frente i em uma hora;
 d_j^- : Desvio negativo do parâmetro j na mistura (t/h);
 d_j^+ : Desvio positivo do parâmetro j na mistura (t/h);
 P^- : Desvio negativo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado (t/h);
 P^+ : Desvio positivo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado (t/h);
 Pe^- : Desvio negativo do ritmo de lavra de estéril em relação ao recomendado (t/h);
 Pe^+ : Desvio positivo do ritmo de lavra de estéril em relação ao recomendado (t/h);
 $usou_l$: Variável binária que assume valor 1 se o caminhão l é usado e 0, caso contrário.

A seguir, é apresentado pelas equações (1)-(24) o modelo de programação matemática relativo à alocação dinâmica de uma frota heterogênea de caminhões e equipamentos de carga, levando-se em consideração metas de produção e qualidade de minério, bem redução no número de caminhões usados.

$$\min \sum_{j \in S} \alpha_j^- d_j^- + \sum_{j \in S} \alpha_j^+ d_j^+ + \beta^- P^- + \beta^+ P^+ + \gamma^- Pe^- + \gamma^+ Pe^+ + \sum_{l \in V} \omega_l usou_l \quad (1)$$

s.a:

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad \forall j \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i \geq 0 \quad \forall j \in S \quad (3)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j) x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall j \in S \quad (4)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \quad (5)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \quad (6)$$

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad (7)$$

$$\sum_{i \in E} x_i + Pe^- - Pe^+ = Er \quad (8)$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall i \in F \quad (9)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (10)$$

$$d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall j \in S \quad (11)$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad (12)$$

$$Pe^+, Pe^- \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad (14)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in C \quad (15)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in F, \forall k \in C \quad (16)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F \quad (17)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (18)$$

$$n_{il} T_{il} - 60 \sum_{k \in C, g_{ik} \neq 0} y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F, \forall l \in C \quad (19)$$

$$\frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} T_{il} \leq TxMax_l \quad \forall l \in V \quad (20)$$

$$x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cap_l = 0 \quad \forall i \in F \quad (21)$$

$$usou_l \geq \frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} T_{il} \quad \forall l \in V \quad (22)$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in F, \forall l \in V \quad (23)$$

$$usou_l \in \{0,1\} \quad \forall l \in V \quad (24)$$

O modelo de mistura de minérios com metas é formado pelas restrições (2)-(13) e pela função objetivo (1). As restrições (7) e (8) dizem respeito, respectivamente, aos atendimentos das metas de produção de minério e estéril. As demais restrições que complementam o modelo podem ser divididas em dois grupos. O primeiro diz respeito à alocação de equipamentos de carga e a faixa de produtividade que torne viável a utilização desses equipamentos. O segundo grupo de restrições está relacionado ao transporte de material na mina e a alocação e utilização dos caminhões.

Em relação ao primeiro grupo de restrições, o conjunto (14) define que cada frente possui um único equipamento de carga, enquanto que as restrições (15) definem que cada equipamento de carga opera em uma única frente. As restrições (16) definem se um equipamento de carga deve ou não ser alocado a uma determinada frente de lavra. As restrições (17) e (18) limitam, respectivamente, o ritmo de lavra máximo e mínimo, definido

pela carregadeira alocada à frente. Já as restrições (9) limitam o ritmo de lavra máximo definido pelo usuário.

No segundo grupo de restrições, que está relacionado ao transporte de material na mina e a alocação e utilização dos caminhões, cada restrição (19) faz com que um caminhão somente realize viagens à uma frente onde esteja alocado um equipamento de carga compatível. As restrições (20) definem que cada caminhão opere no máximo $TxMax_i\%$ em uma hora. As restrições (21) fazem com que o ritmo de lavra de uma frente seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados à frente. As restrições (22), juntamente com a função objetivo, forçam com que os caminhões usados sejam penalizados. As restrições (23) determinam que o número de viagens que um caminhão faz à uma frente é um valor inteiro positivo. As restrições (24) indicam que as variáveis $usou_i$ são binárias.

Modelo Heurístico

Iterated Local Search (ILS)

Iterated Local Search (ILS) é uma metaheurística de busca local e como tal, baseado na noção de vizinhança. A exploração do espaço de soluções é feita por meio de movimentos, os quais consistem em modificações feitas na solução corrente, guiando a soluções vizinhas.

O método *Iterated Local Search (ILS)* é baseado na idéia de que um procedimento de busca local pode ser melhorado gerando-se novas soluções de partida, as quais são obtidas por meio de perturbações na solução ótima local (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). A perturbação precisa ser suficientemente forte para permitir que a busca local explore diferentes soluções, mas também fraca o suficiente para evitar um reinício aleatório. Para aplicar um algoritmo ILS, quatro componentes têm que ser especificadas: (a) Procedimento GeraSolucaoInicial(), que gera uma solução inicial s' para o problema; (b) Procedimento BuscaLocal, que retorna uma solução melhorada s'' ; (c) Procedimento Perturbacao, que modifica a solução corrente s guiando a uma solução intermediária s' e (d) Procedimento CritérioAceitação, que decide de qual solução a próxima perturbação será aplicada. Na adaptação proposta para o ILS, o método parte de uma solução inicial gerada conforme descrito mais adiante, em subseção específica. A seguir, é feita uma busca local, de acordo com a subseção seguinte. A partir do ótimo local encontrado, são feitas, em cada iteração, perturbações nessa solução ótima local, tal como especificado mais à frente, seguida de nova aplicação de busca local. Em seguida, verifica-se se houve melhora no valor da função de avaliação (critério de aceitação). Em havendo, guarda-se esta solução como a melhor até o presente momento e volta-se ao menor nível de perturbação. Não havendo, a solução não é armazenada e, neste caso, aplica-se a perturbação no nível corrente à solução atual até que não haja melhora no valor da função de avaliação (no caso, 10% do produto do número de frentes pelo número de caminhões). Decorrido esse número de iterações sem melhora, o nível de perturbação é incrementado. As perturbações são dispostas de forma que as de menores índices são as mais fracas no sentido de complexidade computacional. O procedimento pára quando um tempo limite de processamento é alcançado ou quando o número de iterações sem melhora atingir um valor limiar.

Busca Local

A Busca Local é feita pelo Método de Descida em Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Descent*, VND), proposto originalmente em *Mladenovic e Hansen (1997)*. Trata-se de um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança, aceitando somente soluções de melhora da solução corrente e retornando à primeira estrutura quando uma solução melhor é encontrada.

Cada vizinhança da solução corrente é explorada por meio de movimentos que serão descritos a seguir. Em cada vizinhança, caminha-se de um vizinho para outro, parando-se ao encontrar um ótimo local.

Movimentos e Estruturas de Vizinhança

Para explorar o espaço de soluções do problema são utilizados os seguintes movimentos, cada qual definindo uma dada vizinhança, aplicáveis tanto para as frentes de minério quanto para as de estéril: (1) Retirar uma viagem de um caminhão em uma frente qualquer; (2) Retirar duas viagens de um caminhão em uma frente qualquer; (3) Realocar uma viagem a uma frente diferente, mantendo o caminhão; (4) Realocar uma viagem a um caminhão diferente, mantendo a frente; (5) Inserir uma viagem de um caminhão a uma frente; (6) Retirar todas as viagens de um caminhão em todas as frentes; (7) Desativar uma carregadeira; (8) Realocar uma carregadeira.

Dados de Entrada

Sejam: F o conjunto de frentes, V o conjunto de veículos, C o conjunto de equipamentos de carga, T o conjunto dos parâmetros de controle (teores de Fe , Al_2O_3 e etc e granulometria) presentes nas frentes, q_i a quantidade máxima de massa lavrável em cada frente i , tc_{il} o tempo de ciclo de cada veículo l a cada frente i , t_{ij} o percentual do parâmetro de controle j presente na frente i , $Compatib_{|C| \times |V|}$ a matriz que representa a compatibilidade entre os equipamentos de carga k e os caminhões l , cap_l a capacidade de cada caminhão l , cl_k a capacidade mínima de cada carregadeira k e cu_k a capacidade máxima de cada carregadeira k e tuc_l a taxa de utilização mínima desejável para o l -ésimo caminhão.

Representação de uma solução

Uma solução é representada por uma matriz $R_{|F| \times (1+V)}$ formada pelas matrizes $Y_{|F| \times 1}$ e $N_{|F| \times |V|}$, em que:

y_{ik} : representa a alocação do equipamento de carga k à frente i , observando-se o estado ativo ou inativo de cada equipamento;

n_{il} : representa o número de viagens do caminhão l à frente i .

$$R_{|F| \times (1+V)} = [Y_{|F| \times 1} \mid N_{|F| \times |V|}] \quad (25)$$

A partir de Y , N e os tempos de ciclo da matriz $Tc_{|F| \times |V|}$ são determinados $S_{|F| \times 1}$ e $Tcv_{1 \times |V|}$, os quais representam, respectivamente, a quantidade de massa lavrada em cada frente e o somatório dos tempos de ciclo de cada veículo.

Geração de uma solução inicial

Para se gerar a solução inicial é necessário se construir as matrizes $Y_{|F| \times 1}$, $N_{|F| \times |V|}$, $S_{|F| \times 1}$ e $Tcv_{1 \times |V|}$. Para se gerar a matriz $Y_{|F| \times 1}$, inicialmente, atribui-se o valor -1 para todas as carregadeiras, ou seja, considera-se que não existe carregadeira alocada a nenhuma frente. Atribui-se, também, o valor 0 (zero) para o *status* de cada carregadeira informando a inatividade de cada uma delas em cada frente. Em seguida, as carregadeiras são alocadas aleatoriamente a cada uma das frentes disponíveis. Para estas carregadeiras, atribui-se o *status* ativo (1), inicialmente.

O número de viagens em cada célula da matriz $N_{|F| \times |V|}$ é gerado aleatoriamente. Para cada célula n_{il} é verificado inicialmente o número máximo (nv_max) de viagens, por hora, em função do tempo de ciclo (Tc) de cada caminhão l às diversas frentes i . É gerado, então, de forma aleatória, um número compreendido entre 0 e o número máximo de viagens (nv_max).

Posteriormente, é verificado se existe carregadeira alocada a essa frente. Se existir, verifica-se se há compatibilidade entre a carregadeira k e o caminhão alocado l . Caso afirmativo, verifica-se se a carregadeira k alocada à frente i encontra-se ativa ou não. Estando ativa, considera-se o número aleatório calculado anteriormente como sendo o número de viagens do caminhão l à frente i . O procedimento é repetido para todas as células da matriz $N_{|F| \times |V|}$.

A quantidade de massa lavrável (s_i) em cada frente é gerada da seguinte forma: para cada frente i , é gerado s_i como sendo o somatório dos produtos das matrizes $N_{|F| \times |V|}$ e $Capcam_{|V|}$, ou seja, entre o número de viagens (n_{il}) e a capacidade de cada caminhão (Cap_l).

Para cada caminhão, é calculado também o somatório do produto entre o número de viagens (n_{il}) e o tempo de ciclo Tc_{il} nas diversas frentes, gerando a matriz $Tcv_{1 \times |V|}$ (somatório dos tempos de ciclo por caminhão).

Mesmo com a geração de todas essas matrizes, é conveniente verificar se existem inviabilidades na solução inicial gerada. A correção das mesmas propicia uma solução inicial de melhor qualidade diminuindo o esforço computacional exigido no refinamento dessa solução. O procedimento verifica a existência de duas inviabilidades.

A primeira diz respeito ao somatório dos tempos de ciclo por caminhão. O tempo de ciclo acumulado de cada caminhão não poderá exceder a 60 minutos. Como o objetivo é fornecer uma solução em uma hora, há a necessidade de se fazer uma correção na solução. Para cada caminhão l , é verificado se o tempo de ciclo acumulado (tcv_l) é superior a 60 minutos. Caso seja, é gerada uma frente i , aleatoriamente, e retirada uma viagem do caminhão l , caso exista. Em seguida, subtrai-se o tempo de ciclo ($tc_{i,l}$) correspondente. O procedimento é repetido, para cada caminhão, até que o tempo acumulado seja inferior ou igual a 60 minutos. Após aplicar este reparador de inviabilidade, é necessário reconstruir a matriz $S_{|F| \times 1}$ (massa lavrável em cada frente).

A segunda inviabilidade diz respeito à quantidade de massa lavrável, por frente. Mesmo com a correção da primeira inviabilidade, não há garantias de que a massa lavrável calculada seja inferior à quantidade máxima lavrável (Q_u) existente em cada frente. Sendo superior, há a necessidade de se fazer a correção. Essa correção também deverá ser realizada caso a quantidade de massa lavrável calculada seja maior que capacidade máxima de produção da carregadeira em uma hora. Portanto, para cada frente, é verificado se a quantidade de massa lavrável calculada inicialmente é superior à quantidade máxima (Q_u) existente na frente i e superior à capacidade máxima de produção da carregadeira alocada à frente i , por hora. Se pelo menos uma das duas situações acontecer, é gerado, aleatoriamente, um caminhão l . Caso haja viagens desse caminhão l à frente i , é retirada uma viagem e recalculados o tempo total (tcv) do caminhão l e a quantidade de massa lavrável s_i . É atualizada também a variável que corresponde à somatória de todas as massas lavráveis, seja de minério (t), seja de estéril (est). Esse procedimento é repetido para todas as frentes até que não haja mais nenhuma inviabilidade.

Esse processo de geração de uma solução inicial é repetido *IterConstr* (99) vezes e, em cada vez, aplica-se o método da descida em vizinhança variável (VND), descrito anteriormente (Busca Local), e a melhor solução obtida é utilizada como solução inicial para o ILS. Este procedimento tem a vantagem de produzir uma solução inicial de boa qualidade rapidamente, já que a busca local exige pouco esforço computacional.

Avaliação de uma solução

Uma solução s é avaliada em função da produção, da qualidade do produto final e da alocação dos equipamentos utilizados (carga e transporte), como mostra a equação a seguir:

$$f(s) = f^p(s) + \sum_{j \in s} f_j^q(s) + f^l(s) + \sum_{l \in V} f_l^u(s) + \sum_{k \in C} f_k^c(s) \quad (26)$$

em que:

- $f^p(s)$: função que avalia s quanto a produção;
- $f_j^q(s)$: função que avalia s quanto à qualidade do j -ésimo parâmetro de controle;
- $f_l^u(s)$: função que avalia s quanto ao atendimento da taxa de utilização máxima do l -ésimo caminhão.
- $f^l(s)$: função que avalia s quanto ao número de caminhões utilizados.
- $f_k^c(s)$: função que avalia s quanto à produtividade da carregadeira k .

As duas últimas parcelas da função de avaliação são usadas apenas para guiar a busca no espaço de soluções e são desconsideradas na apresentação dos resultados, de forma a permitir uma comparação com a função objetivo do modelo de programação matemática.

A seguir, é mostrada a avaliação de cada um dos componentes da função $f(i)$:

- **Produção de Minério e Estéril**

A produção de minério e estéril é avaliada pela equação (27).

$$f^p(s) = \beta \times (|Pr - P| + \gamma \times |Pre - Pe|) \quad (27)$$

onde P é a produção de minério (t); Pr é a meta de Produção de Minério (t); Pe é a produção de Estéril (t); Pre é a meta de Produção de Estéril (t); β é a penalidade por não atendimento à meta de minério e γ é a penalidade por não atendimento à meta de estéril.

A produção P é calculada segundo a equação (28), ou seja, é obtida pela multiplicação do número de viagens dos caminhões às frentes, pela capacidade de carga de cada caminhão.

$$P = \sum_{i \in M} \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \quad (28)$$

onde M representa o conjunto de frentes de minério; V é o conjunto de equipamentos de transporte; n_{il} indica o número de viagens de um caminhão l à frente i e cap_l é a capacidade do caminhão l (t);

Para o cálculo de Pe , substitui-se o conjunto das frentes de minério M pelo conjunto E das frentes de estéril e aplica-se uma equação similar à (28).

- **Qualidade da Mistura**

A qualidade da mistura é avaliada segundo a equação (29), em que tm_j é o valor percentual encontrado para o parâmetro j (%) na mistura; tr_j é a meta de qualidade para o parâmetro j (%); P indica a produção de minério (t) e α_j^q é a penalidade por não atendimento à meta de qualidade do parâmetro de controle j ;

$$f_j^q(s) = \alpha_j^q \times P \times \frac{|tr_j - tm_j|}{100} \quad \forall j \in S \quad (29)$$

O valor tm_j é calculado através da média ponderada entre t_{ij} e a produção (em uma hora) de cada frente i de minério, conforme mostrado na equação (30).

$$tm_j = \frac{\sum_{i \in M} t_{ij} x_i}{\sum_{i \in M} x_i} \quad \forall j \in S \quad (30)$$

onde o ritmo de lavra em cada frente i é calculado com base na equação a seguir:

$$x_i = \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \quad (31)$$

- **Taxa de utilização dos caminhões**

A utilização dos caminhões é avaliada pela equação (32).

$$f_l''(s) = \mu \times |TxUtil_l - TxMaxUtil_l| \quad \forall l \in V \quad (32)$$

onde μ é a penalidade por se ultrapassar a taxa máxima de utilização dos caminhões; $TxMaxUtil_l$ é a taxa máxima permitida de utilização do caminhão l e $TxUtil_l$ representa a taxa de utilização do caminhão l , dada por:

$$TxUtil_l = \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \quad \forall l \in V \quad (33)$$

sendo n_{il} o número de viagens realizadas pelo caminhão l à frente i e tc_{il} o tempo de ciclo do caminhão l à frente i .

São utilizados dois valores para o peso μ na expressão (32). Um valor alto (μ_A) é usado caso a quantidade transportada esteja acima da máxima permitida e outro valor, mais baixo (μ_B), caso a quantidade transportada esteja abaixo da máxima permitida.

- **Número de caminhões utilizados**

A avaliação do número de caminhões utilizados é feita com base na equação (34).

$$f^l(s) = \omega \times \sum_{l \in V} \lceil TxUtil_l \rceil \quad (34)$$

onde ω é a penalidade pela utilização de caminhões e $\lceil TxUtil_l \rceil$ é uma função que assume valor igual a 1 se o caminhão l for utilizado;

- **Avaliação da produtividade das carregadeiras**

A produtividade das carregadeiras é avaliada pela equação (35).

$$f_k^c(s) = \begin{cases} \varphi \times (Cu_k - prod_k) & \text{se } Cl_k \leq prod_k \leq Cu_k \\ \lambda \times (Cl_k - prod_k) & \text{se } prod_k < Cl_k \end{cases} \quad \forall k \in C \quad (35)$$

onde φ é a penalidade por não se atingir a produtividade máxima da carregadeira k e λ a penalidade por utilizar uma carregadeira k com uma produtividade inferior à mínima;

Perturbações

Para escapar de ótimos locais, o método *Iterated Local Search* utiliza-se de mecanismos de perturbações, que são modificações realizadas nos ótimos locais encontrados. As perturbações funcionam como um mecanismo de diversificação do algoritmo. As seguintes perturbações são usadas: (1) Retirar uma viagem, (2) Retirar duas viagens, (3) Realocar viagem mantendo o caminhão, (4) Realocar viagem mantendo a frente, (5) Retirar viagem duas vezes, (6) Retirar duas viagens duas vezes, (7) Realocar viagem mantendo o caminhão duas vezes, (8) Realocar viagem mantendo a frente duas vezes, (9) Realocar

carregadeira, (10) Desativar carregadeira, (11) Ativar carregadeira, (12) Trocar carregadeira, (13) Tirar todas as viagens de um caminhão, (14) Inserir uma viagem.

RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O algoritmo heurístico ILS proposto foi desenvolvido na linguagem visual Delphi, versão 7 e o modelo de programação matemática foi implementado no modelador e otimizador LINGO, versão 7.0. Ambos foram testados em um Notebook HP, AMD Turion64 Mobile, Technology MK-36, 2,01 GHz, com 1 GB de RAM.

Apresentam-se, a seguir, os resultados do uso dessas metodologias em um problema-teste envolvendo 5 parâmetros de controle, 15 frentes de lavra, sendo 11 de minério e 4 de estéril, com 30 caminhões e 8 carregadeiras disponíveis.

Os dados desse cenário foram submetidos a dez execuções do algoritmo proposto. De forma a comparar o desempenho do ILS com o método de programação matemática executou-se o otimizador LINGO, interrompendo-se a execução em duas situações: (1) decorrido o tempo gasto pelo ILS para gerar a melhor solução em cada cenário e (2) decorrido uma hora de processamento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação ILS × LINGO

Item	Meta	ILS	LINGO	LINGO
%Fe	47,000	47,9825	47,9937	47,9937
%Al ₂ O ₃	0,3200	0,3175	0,3166	0,3166
%P	0,0400	0,0419	0,0419	0,0419
%PPC	2,35	2,9137	2,9197	2,9197
%He	40,00	37,95	37,87	37,87
Fo	-	30.583,83	30.812,70	30.811,74
Carregadeiras	-	6	7	6
%Tx. util. car.	-	87,04	73,35	82,75
Caminhões	-	20	18	17
Viagens	-	92	80	71
%Tx. util. cam.	85	76,98	74,90	72,89
Tempo (seg.)	-	161	161	3600

Como se observa na Tabela 1, o ILS foi capaz de gerar soluções melhores que as do LINGO em vários aspectos. Por exemplo, a solução do ILS é a que mais se aproximou das metas de qualidade. Com relação à função objetivo, observa-se que o ILS em 161 segundos produz uma solução melhor que o LINGO, tanto em 161 segundos, quanto em uma hora de processamento. Com relação à taxa de utilização das carregadeiras, observa-se que o ILS produz soluções com melhor aproveitamento desses equipamentos. Já com relação ao número de veículos e viagens, as soluções LINGO são mais eficientes; entretanto, esses aspectos têm prioridade inferior à da qualidade dos parâmetros de controle.

Em relação aos valores médios, o algoritmo ILS apresentou desvio de 2,13% quando comparado com o valor da função objetivo da melhor solução conhecida para esse problema-teste.

CONCLUSÕES

Este trabalho tratou o problema de planejamento operacional de lavra considerando alocação dinâmica de caminhões. Dada sua dificuldade de resolução na otimalidade, foi desenvolvido um algoritmo heurístico baseado na metaheurística *Iterated Local Search* (ILS). O algoritmo foi testado em um cenário relativo a um problema real de uma mineração de ferro, comparando-se as soluções produzidas pelo ILS com aquelas produzidas por um otimizador aplicado a um modelo de programação matemática desenvolvido. Os resultados obtidos mostraram que as melhores soluções produzidas pelo ILS são de melhor qualidade que aquelas produzidas pelo otimizador LINGO, mesmo considerando as dimensões relativamente modestas do problema-teste tratado. Adicionalmente, verificou-se que as soluções produzidas pelo ILS foram obtidas sem muito esforço computacional, ao contrário daquelas geradas pelo otimizador. Este último demandou tempo proibitivo para gerar soluções próximas àsquelas geradas pelo ILS em poucos minutos, fato que valida a utilização do algoritmo proposto, enquanto ferramenta de apoio à tomada de decisão. Com relação às características das soluções produzidas pelo algoritmo proposto, pode-se verificar que os valores dos parâmetros de controle ficaram bem próximos das metas estabelecidas. Em relação à frota de veículos de transporte e de equipamentos de carga ficou constatado o bom aproveitamento dos mesmos. No caso dos equipamentos de carga conseguiu-se reduzir a quantidade desses, bem como utilizá-los próximos de suas capacidades máximas de produção. Já no caso dos veículos de transporte, houve um melhor aproveitamento desses, indicado pelas taxas de utilização próximas à meta. Esses resultados comprovam, portanto, a eficiência do método heurístico proposto para a otimização do planejamento operacional de lavra. Destaca-se, finalmente, que o algoritmo ILS é flexível, no sentido de que outras restrições podem ser facilmente incorporadas ao algoritmo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, processo CEX APQ-2991-6.01/07, e ao CNPq, processo 474831/2007-8, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, G. B. (1997). *Despacho ótimo de caminhões numa mineração de ferro utilizando algoritmo genético com processamento paralelo*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CHANDA, E. K. C.; DAGDELEN, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 9, p. 203-208.
- COSTA, F. P. (2005). *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavras em mina a céu aberto*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 141 p.
- COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. (2004). Um modelo de alocação dinâmica de caminhões, *Revista Brasil Mineral*, v. 231, p. 26-31.

- COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. (2005). Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade, *Revista da Escola de Minas*, v. 58, p. 77-81.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- MERSCHMANN, L. H. C. (2002). *Desenvolvimento de um Sistema de Otimização e Simulação para Cenários de Produção em Minas a Céu Aberto*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MLADENOVIC, N. & HANSEN, P. (1997). A Variable Neighborhood Search. *Computers and Operations Research*, v. 24, p. 1097-1100.
- PINTO, L.R.; MERSCHMANN, L. H. C. (2001). Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos. *Revista Escola de Minas*, v. 54, n. 3, p. 211-214.
- PINTO, L. R.; BIAJOLI, F. L. e MINE, O. M. (2003). *Uso de otimizador em planilhas eletrônicas para auxílio ao planejamento de lavra*. Relatório técnico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.
- SOUZA, M. J. F. (2007). Notas de aula da disciplina Inteligência Computacional para Otimização. Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, disponível em [http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/disciplinas/Inteligência Computacional/ Inteligência Computacional.pdf](http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf). Acesso em 30/04/2008.

Francisco César Rodrigues de Araújo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral
Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Universitário
35.400-000 Ouro Preto (MG) – Brasil
E-mail: fcesaraujo@yahoo.com.br

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.