

Projeto de um Algoritmo Genético Híbrido para Planejamento Operacional de curto prazo de minerações a céu aberto

ROBERT FABRICIO SUBTIL¹
GUILHERME BASTOS ALVARENGA¹

UFLA - Universidade Federal de Lavras
DCC - Departamento de Ciência da Computação
Cx Postal 37 - CEP 37200-000 Lavras (MG)
¹(rsubtil, bastos)@comp.ufla.br

Resumo. O presente trabalho apresenta um modelo de otimização para o problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Um algoritmo genético híbrido é proposto para solução do problema. O modelo contempla o desenvolvimento da mina, determinado pelo ritmo de lavra a ser implementado em cada frente considerando as especificações de qualidade do minério a ser extraído, ritmo de produção esperada, características e disponibilidade dos equipamentos de carga e transporte e outras situações pertinentes à operação da mina. O objetivo é a redução de custos de produção através da minimização dos deslocamentos dos equipamentos de carga e a minimização do custo de transporte sem violar as condições impostas, como a qualidade físico-química esperada nos destinos.

Palavras-Chave: algoritmos genéticos, otimização combinatória e planejamento operacional de minerações.

1 Introdução

Durante muitos anos, as teorias e métodos desenvolvidos por matemáticos e cientistas foram arquivados em livros e periódicos especializados e muito pouco foi absorvido pelo setor empresarial. Felizmente, contudo, essa situação vem se alterando. É cada vez maior o número de companhias que adotam modelos de otimização no seu dia-a-dia, diminuindo seus custos e, por conseguinte, aumentando os lucros e sua competitividade no mercado global.

Uma importante abordagem neste contexto é o problema de alocação de recursos ou tarefas, onde existem grandes margens de ganho para as empresas e corresponde a um grande desafio para os pesquisadores.

Na bibliografia, para diferentes problemas em otimização combinatória, podem ser encontrados tanto métodos exatos, que garantem a obtenção da melhor solução para o dado problema, como heurísticas, que se aproximam da solução ótima.

Atualmente, a solução por métodos exatos do problema de alocação de tarefas tem se limitado a instâncias de tamanho reduzido. Em muitos casos reais é mais adequado o uso de heurísticas.

Neste contexto, os algoritmos genéticos como proposta de meta-heurística, tem se tornado conhecido por ser capaz de encontrar soluções de qualidade em quanti-

dade razoável de tempo. Estes algoritmos são uma família de modelos computacionais inspirados nas idéias de evolução natural proposta por Charles Darwin, aliadas às idéias sobre genética propostas por Mendel.

Contudo, foi desenvolvido um projeto de algoritmo genético híbrido como proposta de solução ao planejamento operacional de curto prazo de minerações a céu aberto, sendo este um problema de otimização combinatorial considerado NP-Difícil, por possuir um número vasto de soluções possíveis, tornando a avaliação dessas soluções uma tarefa impossível de ser realizada em tempo aceitável.

Tal problema, consiste em encontrar uma programação para produção de minério, de forma que, a meta de qualidade do mesmo, a produção esperada, as características dos equipamentos de carga e transporte, bem como situações pertinentes à operação da mina, são considerados para a obtenção de uma solução que contempla situações mais reais das mineradoras.

2 Planejamento Operacional de curto prazo de minerações a céu aberto

Para a total compreensão a respeito do planejamento operacional de curto prazo, é necessária uma breve revisão a respeito dos processos de lavra.

2.1 Processos de lavra

O fluxo operacional de mineração de ferro, a qual foi estudada neste trabalho, inicia-se com a especificação do cliente (manual de qualidade). Na especificação é dito: quantidade, qualidades físicas (granulometrias) e químicas, para cada um dos seus produtos. Também é estipulado um prazo para entrega, ou cronograma de atendimento.

Para operacionalizar a extração, atendendo ao cliente, as minerações têm seus planejamentos, geralmente agrupados em níveis temporais, que embora varie entre uma mineração e outra, têm a seguinte divisão básica [3]:

- O primeiro nível é chamado de planejamento de longo prazo. Neste planejamento objetiva-se definir um grande bloco, geralmente em formato que lembra um cone, que será totalmente extraído em um longo período de atividade. Este planejamento normalmente é reavaliado, a medida que se avança na exploração da jazida, uma vez que adquiriu-se novos conhecimentos advindos deste avanço e também porque durante o processo de lavra há alterações no mercado e nas especificações dos clientes.

- Os planejamentos de médio e curto prazos se referem a quantidades e porções bem menores, com localização e quantidades completamente definidas.

As escavadeiras/carregadeiras são posicionadas nas frentes de lavra determinadas na programação de curto prazo. O número de frentes de lavra varia de acordo com as necessidades determinadas nos planos para desenvolvimento da lavra, dimensionamento da frota de equipamentos e qualidade esperada.

2.2 O Planejamento Operacional de curto prazo

De posse do plano de curto prazo, os supervisores de cada turno conhecem apenas informações referentes às frentes de lavra que devem ser produzidas, qualidade desejada, bem como a massa total de cada área para o plano, sendo portanto de responsabilidade desses supervisores programar quais escavadeiras/carregadeiras que serão alocadas em cada frente, de forma a alcançar os objetivos traçados pelo plano.

O problema abordado, consiste em construir a partir do plano de curto prazo, a programação para as atividades de produção, de maneira que tal programação é dada em precisão de turnos e até mesmo em intervalos de minutos, onde tais intervalos são parametrizados. Desta forma, as alocações das máquinas nas frentes de lavra, são definidas antes mesmo de iniciar a execução do plano, garantindo que a qualidade e produtividade sejam cumpridas uniformemente durante todo o processo de lavra.

De fato, o que se espera de uma programação de extração de minério não resume-se somente nas metas de qualidade e produtividade. Ainda no contexto do problema, são inseridas algumas situações pertinentes à realidade das mineradoras, como:

- Uniformidade na produtividade dos equipamentos de carga, de forma que uma ou outra máquina não fique ociosa e consequentemente sobrecarregue as demais.
- Programação de parada preventiva para os equipamentos de carga, visto que é de estratégia das mineradoras.
- Custo da extração, no que se refere à produção das escavadeiras/carregadeiras nas diversas áreas do plano, deslocamento destas máquinas de uma área para outra, além do custo de transportar a produção das frentes de lavra até o destino.

3 Modelagem do Algoritmo Genético Híbrido

3.1 Modelo geral

Considerando fatores relevantes ao plano operacional de curto prazo, desenvolveu-se um modelo para uma abordagem melhor do problema em questão.

3.1.1 Dimensões

$a \triangleq$ Áreas ($a = 1...ma$)

$i \triangleq$ Turnos ($i = 1...mi$)

$j \triangleq$ Escavadeiras ($j = 1...mj$)

3.1.2 Parâmetros

- Duração do Plano;
- Tamanho dos turnos;
- *Slots*: pelo fato de que na mina, um equipamento pode deslocar-se de uma área para outra a qualquer instante, adotou-se uma forma de tratar tal deslocamento, tornando-o menos flexível. Assim, *Slots* são subdivisões internas nos turnos, que representam intervalos de tempo fixos, utilizados para a alocação dos equipamentos de carga nas áreas.
- Permanência mínima da máquina numa área;
- Massa Total do plano;
- Meta de qualidade para o plano;
- Produção média dos equipamentos de transporte por área, no ciclo entre a própria área e o destino;
- Disponibilidade média dos equipamentos de carga;
- Última alocação dos equipamentos de carga;
- Produtividade das escavadeiras/carregadeiras;
- Qualidade das áreas;
- Quantidade de massa nas áreas;
- Custos de deslocamentos das máquinas;
- Custos de produção das máquinas;
- Custos de transporte: custo referente ao tamanho da

frota de caminhões requerida para transportar a produção.

- Prioridades na minimização dos custos: diz respeito aos níveis de prioridades na minimização de cada custo.
- Prioridades das áreas: diz respeito à prioridade de produção nas áreas do plano.

3.1.3 Variáveis de decisão

$Aloc_{jai}$: equipamento j produz na área a no turno i ;

$Massa_{ai}$: quantidade de massa lavrada da área a no turno i .

3.1.4 Objetivo

Fazer uma programação de produção de minério, a qual minimize custos de produção e deslocamentos dos equipamentos de carga, bem como os custos de transportar a produção aos destinos.

3.1.5 Restrições

- atender à meta de qualidade em cada turno, implicando no atendimento da meta para o plano;
- atender à meta de quantidade de massa total do plano, sendo que deve ser atendida uniformemente em cada turno;
- atender aos limites de massa a ser lavrada por área nos turnos;
- atender aos limites de quantidades mínima e máxima de áreas permitidas por turno;
- respeitar a quantidade de massa presente em cada área;
- respeitar as capacidades de produção dos equipamentos de carga disponíveis para produção;
- respeitar o tempo mínimo de permanência das máquinas nas áreas.

3.2 Representação da solução

Como representação da solução para o problema abordado, cada gene representa um *Slot*, sendo o cromossomo uma matriz tridimensional (Turno X [Equipamento X Área]) conforme mostrado na figura 1.

3.3 Geração da População Inicial

Para geração da população inicial foi proposto um modelo de programação inteira mista o qual é responsável por distribuir de forma viável, as áreas do plano nos diversos turnos, obedecendo uma série de restrições referentes à meta de qualidade e quantidade, bem como algumas condições impostas pela operação da mina.

Depois de encontrada tal solução, é executada uma heurística para alocação dos equipamentos de carga nas áreas estabelecidas pelo modelo matemático.

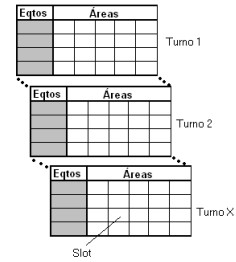


Figura 1: Representação da solução

Segue a modelagem proposta para a primeira fase da geração da população inicial:

3.3.1 Dimensões

$a \triangleq$ Áreas ($a = 1...ma$)

$f \triangleq$ Faixas ($f = 1...mf$)

$i \triangleq$ Turnos ($i = 1...mi$)

$j \triangleq$ Escavadeiras ($j = 1...mj$)

$q \triangleq$ Elementos químicos ($q = 1...mq$)

3.3.2 Parâmetros

- MX_a : quantidade de massa total disponível na área a
- M_{min} : quantidade mínima de massa a ser lavrada na área por turno
- M_{max} : quantidade máxima de massa a ser lavrada na área por turno
- X_{min} : quantidade mínima de áreas a serem lavradas por turno
- X_{max} : quantidade máxima de áreas a serem lavradas por turno
- F_a : fator da função objetivo para área a , representa a prioridade de produção nesta área
- $LSElem_q$: limite superior para o teor do elemento q
- $LIElem_q$: limite inferior para o teor do elemento q
- $Elem_{qa}$: teor do elemento químico q presente na área a
- $LSElem_{qf}$: limite superior para o teor do elemento q na faixa f
- $LIElem_{qf}$: limite inferior para o teor do elemento q na faixa f
- $Elem_{qfa}$: teor do elemento químico q na faixa f presente na área a
- EX_{ji} : capacidade máxima de produção da escavadeira j no turno i medida em toneladas/turno
- $ProdTurno$: Produção esperada por turno

3.3.3 Variáveis de decisão

- $QTMassa_{ai}$: quantidade de massa retirada da área a no turno i ;
- X_{ai} : variável inteira binária referente a produção na área a durante o turno i ;

3.3.4 Modelo matemático

maximize

$$\sum_{i=1}^{mi} \sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{ai} \times F_a$$

sujeito a

$$\frac{QTMassa_{ai}}{M_{min}} \geq X_{ai} \quad (1)$$

$$\frac{QTMassa_{ai}}{M_{max}} \leq X_{ai} \quad (2)$$

$$X_{min} \leq \sum_{a=1}^{ma} X_{ai} \leq X_{max} \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{mi} QTMassa_{ai} \leq MX_a \quad \forall a \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{mj} EX_{ji} \geq \sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{ai} \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{ai} \leq ProdTurno \quad \forall i \quad (6)$$

$$LIElem_q \leq \sum_{a=1}^{ma} \frac{QTMassa_{ai} \times Elem_{qa}}{\sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{ai}} \leq \quad (7)$$

$$LSElem_q \quad \forall i, \forall q$$

$$LIElem_{qf} \leq \sum_{a=1}^{ma} \frac{QTMassa_{ai} \times Elem_{qfa}}{\sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{ai}} \leq \quad (8)$$

$$LSElem_{qf} \quad \forall i, \forall q, \forall f$$

onde,

$$X_{ai} = \begin{cases} 1 & \text{se a área } a \text{ será lavrada no turno } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- (1) - quantidade mínima de massa permitida por área em cada turno
- (2) - quantidade máxima de massa permitida para área em cada turno
- (3) - quantidade de áreas que devem ser lavradas por turno.
- (4) - respeita a quantidade de massa das areas no final do plano

- (5) - respeita a capacidade de produção das escavadeiras por turno
- (6) - garante a uniformidade de produção por turno, afim de alcançar o produção total no final do plano.
- (7) - qualidade em cada turno com base nos teores globais dos elementos químicos
- (8) - qualidade em cada turno com base nos teores por faixa dos elementos químicos

O modelo proposto é classificado como modelo de programação inteira mista, uma vez que, tanto a função objetivo quanto as restrições são inequações lineares e o resultado para as variáveis X_{ai} admitem somente valores inteiros, e as variáveis $QTMassa_{ai}$ aceitam valores contínuos [2].

3.3.5 Distribuição das escavadeiras/carregadeiras nas áreas

A heurística é bem simples e consiste em disponibilizar os equipamentos nas áreas de forma aleatória, porém seguindo alguns passos:

- 1- Calcula-se as quotas de produção de cada equipamento para o turno corrente.
- 2- Sorteia-se uma área a qual está definida para ser lavrada no turno atual, e um equipamento.
- 3- De posse da quantidade de massa a ser lavrada da área e da produção do equipamento para o turno, aloca-se uma quantidade de *Slots* necessária até que seja alcançada uma das duas quantidades.
- 4- Caso ocorra uma das situações citadas no passo 3, o processo é reinicializado no passo 2, mantendo os valores atualizados.
- 5- Com as sobras das áreas, os *Slots* restantes de cada equipamento são preenchidos com a última área que foi alocada para o mesmo. Após é aplicado um reajuste nos percentuais de produção dos equipamentos de forma que seja alcançado o fechamento exato da produção.

3.4 Avaliação dos Indivíduos

A avaliação é feita com o foco voltado aos custos presentes no multiobjetivo do problema.

- Custo de deslocamento dos equipamentos de carga : é contabilizado a cada momento que o equipamento deixa de produzir numa área para começar produzir em outra.
- Custo de produção dos equipamentos de carga: é contabilizado por *Slot*, com o valor de produção na área atual.
- Aderência de Carga X Transporte : calculado o custo de aderência de cada turno, basta adicionar todos estes custos para obter a aderência do indivíduo.

4 Seleção dos Indivíduos

A proposta apresentada neste trabalho consiste basicamente no operador de Seleção por Torneio[1], sendo que os melhores indivíduos são selecionados a partir de disputas diretas dentro de grupos. No operador proposto, a seleção dentro dos grupos é feita por níveis de prioridades, ou seja, é informado ao algoritmo a ordem de importância de cada característica avaliada, e então a seleção segue tal ordem. Desta forma, se as aptidões dos indivíduos são equivalentes para uma característica, é analisada a próxima até que seja possível definir o melhor entre eles.

5 Cruzamento

Para operador de cruzamento, é proposto uma variação para o problema clássico de otimização o qual aborda a cobertura de conjuntos (*Set Covering Problem*). Tal problema consiste em selecionar um subconjunto de colunas tal que todas as linhas sejam cobertas. A entrada deste problema pode ser uma matriz A binária [$m \times n$], cujos elementos a_{ij} são 0 ou 1. Uma linha i é coberta por uma coluna j quando $a_{ij} = 1$. Geralmente este subconjunto deve ser selecionado de tal forma que o custo total seja mínimo assumindo-se um custo c_j para cada coluna da matriz.

Portanto, adaptado ao contexto descrito, tem-se um conjunto de turnos que precisam ser combinados de forma a gerar um novo indivíduo, onde as quantidades de massa a ser lavrada de cada área sejam respeitadas no fim do plano.

Para tanto, foi desenvolvido um Modelo de Programação Linear Inteira para formalizar o operador de cruzamento proposto neste trabalho. Segue o modelo:

5.0.1 Dimensões

$a \triangleq$ Áreas ($a = 1...ma$)

$c \triangleq$ Indivíduos ($c = 1...2$)

$i \triangleq$ Turnos ($i = 1...mi$)

5.0.2 Parâmetros

- $QTTurnos$: quantidade de turnos do plano;

- $QTMassa_{aic}$: quantidade de massa retirada da área a no turno i do indivíduo c ;

- $MassaTotal_a$: quantidade de massa total a ser retirada da área a no plano.

- $Fsup$: fator que representa margem superior para limite de diferença na quantidade de massa encontrada na combinação dos turnos;

- $Finf$: fator que representa margem inferior para limite de diferença na quantidade de massa encontrada

na combinação dos turnos;

- F_{ic} : fator da função objetivo para o turno i do indivíduo c . Tal fator é composto da seguinte forma:

$$SomaFatPrioridade = \sum_{a=1}^{ma} QTMassa_{aic} \times F_a$$

onde F_a representa o fator de prioridade na produção da área a dentro do plano.

$FatorRand_{ic}$ = fator que será atribuído de forma aleatória aos turnos dos indivíduos

então,

$$F_{ic} = SomaFatPrioridade + FatorRand_{ic}$$

5.0.3 Variável de decisão

$Turno_{ic}$: variável inteira binária, que representa o turno i do indivíduo c .

5.0.4 Modelo matemático

maximize

$$\sum_{c=1}^2 \sum_{i=1}^{mi} F_{ic} \times Turno_{ic}$$

sujeito a

$$\sum_{a=1}^{ma} MassaTotal_a \times Finf \leq \quad (9)$$

$$\sum_{c=1}^2 \sum_{i=1}^{mi} \sum_{a=1}^{ma} Turno_{ic} \times QTMassa_{aic} \leq$$

$$\sum_{a=1}^{ma} MassaTotal_a \times Fsup$$

$$MassaTotal_a \times Finf \leq \quad (10)$$

$$\sum_{c=1}^2 \sum_{i=1}^{mi} Turno_{ic} \times QTMassa_{aic} \leq$$

$$MassaTotal_a \times Fsup$$

$$\sum_{c=1}^2 \sum_{i=1}^{mi} Turno_{ic} = QTTurnos \quad (11)$$

onde,

$$Turno_{ic} = \begin{cases} 1 & \text{se utiliza o turno} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

(9) - garante a quantidade de massa total que deve ser lavrada no Plano

(10) - garante a quantidade de massa total da área a que deve ser lavrada no Plano.

(11) - garante a quantidade de turnos do plano

5.1 Mutação

A proposta consiste numa mutação a qual busca respeitar todas as restrições impostas ao problema de uma forma similar à geração da população inicial.

A princípio é feita uma escolha aleatória de dois pontos do indivíduo, sendo que tais pontos devem representar um intervalo entre turnos distintos. Observe que neste momento existe um novo conjunto de parâmetros, que serve como entrada para o modelo de programação inteira mista, proposto na geração da população inicial, de forma que tais parâmetros representam as quantidades presentes entre os turnos selecionados.

Após executado o modelo matemático para a redistribuição das áreas entre os turnos selecionados, é refeita a alocação dos equipamentos seguindo os mesmos passos presentes na geração da população inicial, porém num intervalo reduzido de turnos.

6 Elitismo

O Elitismo adotado para o modelo apresentado é simples e consiste em copiar sempre para próxima geração, o melhor indivíduo que surge, ou seja, aparecendo um indivíduo bom, ele é copiado. Depois de uma geração, se não surgiu um indivíduo melhor que ele, o que se faz é inseri-lo novamente na população.

7 Verificação do critério de sobrevivência

Neste trabalho são propostas duas formas para substituição da população:

- 1 - sempre substituir os ancestrais pelos descendentes
- 2 - substituir os ancestrais pelos descendentes somente se a média dos descendentes for maior ou igual a média dos ancestrais.

8 Critério de parada

O critério para finalizar o algoritmo genético proposto neste trabalho é o de número de gerações.

9 Resultados e Discussões

Foi implementada a geração da população inicial e os testes foram realizados baseando-se em um problema real. Trata-se do plano semanal de uma mineradora que opera na extração do minério de ferro. Tal plano corresponde ao de curto prazo abordado neste artigo.

Todas as informações necessárias à fase da geração da população inicial foram dadas.

Cabe dizer que para os testes, foram utilizados 2 equipamentos do modelo PC400(480 ton/h) e 1 do modelo L1100 (900 ton/h).

O tempo médio gasto pelo algoritmo para gerar uma população de 30 indivíduos, foi de 5 minutos e 50 segundos. Sendo que tal atividade inclui 30 execuções do modelo de programação inteira mista, além de fazer todas as alocações dos equipamentos de carga nas áreas do plano.

Tendo em vista que não foram encontrados estudos com a mesma abordagem sobre o tema deste trabalho, não é possível fazer um comparativo de tempo gasto.

Todos os indivíduos gerados foram dotados de soluções viáveis ao problema, visto que já são melhores que as existentes atualmente nas mineradoras, pois essas não consideram a frota.

Além de garantir o cumprimento das restrições, é importante dizer que as produções dos equipamentos foram equivalentes, ou seja, todos eles apresentaram percentuais de produção bem próximos, em torno de 45%. Mas vale lembrar que tais percentuais não correspondem às produções reais das máquinas, visto que as capacidades de carregamento das mesmas não incluem o tempo de espera por caminhões, sendo que este não é possível ser estimado, devido às diversas situações pertinentes à operação da mina, dentre elas podemos citar as filas em balanças, basculamentos e outros fatores.

10 Considerações Finais

Apesar de não serem abordadas todas as características possíveis de um planejamento operacional de curto prazo, mesmo porque estas podem variar entre mineradoras distintas, acredita-se que o modelo apresentado nesse artigo seja um ponto de partida para futuras discussões em torno do tema, buscando de uma forma bem explícita, resolver com precisão tal complexidade envolvida nesta atividade de alto grau de importância para qualquer mineradora.

Referências

- [1] GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning* Addison-Wesley, 1989.
- [2] PRADO, Darci, Programação Linear(Série Pesquisa Operacional, vol. 1),Belo Horizonte,Desenvolvimento Gerencial, 1999.
- [3] ALVARENGA, Guilherme B. Despacho ótimo de caminhões numa Mineração de Ferro Utilizando Algoritmo Genético com Processamento Paralelo. Dissertação de mestrado, Belo Horizonte, UFMG, 1997.