

INVESTIGAÇÃO E PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE MINAS A CÉU ABERTO COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS

Autores: DIEGO LEAL MAIA, JOAO BATISTA MENDES, VICTOR DE FREITAS ARRUDA

Introdução

É largamente conhecido que os investimentos em máquinas de carregamento (por exemplo pás carregadeiras), e transporte (por exemplo caminhões fora da estrada), equipamentos de processamento (britadores) são bastante significativos. Ercelebi e Bascetin (2009) afirmam que gastos com a área de minas que operam a céu aberto podem representar entre 50% a 60% do custo operacional total da mina.

Para otimização do problema de Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica de Veículos (POLAD), o presente trabalho pesquisa os vários trabalhos presentes na literatura e procura aplicar técnicas evolutivas. O trabalho foi organizado de forma que inicialmente são apresentados alguns trabalhos que abordam o problema em questão, dando uma maior atenção na identificação das características trabalhadas pelos modelos matemáticos pesquisados. Na sequência são detalhadas as ferramentas e estratégias utilizadas para resolução do problema, bem como o algoritmo proposto para o problema com a adaptação do *Particle Swarm Optimization* (PSO). Por fim, os resultados obtidos até o momento em experimentos computacionais e a conclusão do trabalho.

Material e métodos

A. O POLAD

Costa (2005) traz uma explicação do problema e descreve o planejamento operacional de lavra em uma mina a céu aberto como um planejamento de curto prazo, que tem como principal objetivo determinar qual o ritmo de lavra em cada frente, contribuindo com uma alimentação adequada à usina. As frentes de lavra apresentam características e qualidades diferentes, como o teor de determinado elemento químico ou a porcentagem de minério em determinada granulometria. Desta forma para que o produto final esteja em conformidade com as exigências do cliente, cada frente contribui com uma quantidade apropriada de minério.

Num ambiente real de mina a céu aberto, há diversas restrições inerentes ao POLAD, porém esse trabalho, preocupou-se com a identificação das que são comumente encontradas na literatura. É importante considerar que as restrições estão geralmente relacionadas a realidade operacional da mina. A compatibilidade operacional entre caminhões e equipamentos de carga, número finito de equipamentos de carga, caminhões, frentes de minério e estéril, a produção dos equipamentos de carga, tempo de ciclo e qualidade da mistura são estas as mais consideradas na literatura.

O modelo matemático utilizado neste trabalho é a mesmo de Coelho et al. (2008), em que se considera a função de avaliação mono-objetivo dada pela Equação 1. Nessa equação o objetivo é minimizar os desvios positivos (d_j^+) e negativos (d_j^-) das metas de cada parâmetro de controle j da mistura, bem como minimizar os desvios positivos e negativos das metas de produção de minério e estéril, representados pelas variáveis de decisão P_m^- , P_m^+ , P_e^- e P_e^+ , respectivamente. Nessa função também considera-se a minimização do número de veículos utilizados, representado pela variável binária U_l , que vale 1 se o veículo l for utilizado e 0, caso contrário. As constantes λ_j^- , λ_j^+ , α^- , α^+ , β^- , β^+ , ω_l são pesos que refletem a importância de cada componente da função objetivo.

$$\min f^{pm}(s) = \sum_{j \in T} \lambda_j^- d_j^- + \sum_{j \in T} \lambda_j^+ d_j^+ + \alpha^- P_m^- + \alpha^+ P_m^+ + \beta^- P_e^- + \beta^+ P_e^+ + \sum_{l \in T} \omega_l U_l \quad (1)$$

Nos trabalhos pesquisados, foram observadas diversas estratégias para resolução do POLAD. Uma delas é o método proposto por Chanda e Dagdelen (1995), baseado em programação linear por metas, que foi aplicado com sucesso na resolução deste problema considerando as metas de qualidade e produção. Outros exemplos são os trabalhos de Souza et al. (2010) que propuseram uma versão do *Variable Neighborhood* (VNS), chamada de *General VNS* (GVNS) e o de Costa et al. (2005) que propôs um algoritmo heurístico baseado em *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP).

B. O PSO

Introduzido por Kennedy e Eberhart(1995), o PSO surgiu de experiências com algoritmos modelados a partir da observação do comportamento social de determinadas espécies de pássaros. O algoritmo manipula um conjunto de partículas (enxame ou cardume) onde cada partícula se comporta como um pássaro à procura de alimento ou do local de seu ninho, utilizando aprendizado próprio (*Pbest*) e o aprendizado do bando (*Gbest*). Cada partícula do enxame é representada por um par de vetores que definem a sua velocidade atual e sua posição. Ambos os vetores (velocidade e posição) da partícula são atualizados em cada iteração do algoritmo segundo sua velocidade (posição) atual, seu aprendizado pessoal e o aprendizado adquirido pelo bando (SICILIANO, 2007). A analogia com os pássaros está fato que cada pássaro é representado por uma partícula que é uma possível solução, o conjunto corresponde ao espaço de busca e a comida ou ninho é a solução ótima. A evolução do algoritmo está associada a trajetória percorrida e ao tempo gasto para encontrar a solução ótima. A adaptação do PSO para o problema é introduzida na próxima secção.

Resultados e discussão

Após todo embasamento teórico, observando algumas particularidades do problema e procurando entender os modelos matemáticos e as estratégias apresentadas na literatura. Foi continuada a implementação do algoritmo já iniciado em projetos anteriores, propondo uma adaptação do algoritmo evolutivo PSO para resolução do problema de planejamento operacional de lavra em mina a céu aberto. A linguagem de programação adotada foi Python, uma linguagem de programação interpretada, orientada a objetos e de alto nível com semântica dinâmica. No texto a seguir é descrito algumas estratégias adotadas.

Utilizou-se uma de base de dados virtual para simular um cenário de uma mina a céu aberto. Este cenário contempla as frentes de lavra (minério e estéril), equipamentos de carga e transporte disponíveis. O modelo contempla também o tempo de ciclo, massa e concentração de variáveis químicas em cada frente de minério, produção de minério e estéril, capacidade de cada caminhão e as taxas de produção das pás carregadeiras. Essas informações são armazenadas em objetos.

Para geração da primeira solução, foi escolhido o trabalho de Souza et al.(2009) como referência, esse sugere que seja feita em duas etapas. Na primeira, as carregadeiras são alocadas nas frentes de estéril e acontece a distribuição das viagens dos caminhões entre as várias frentes. Na segunda frente, o processo se repete com as frentes de minério. Essa é uma estratégia adotada observando que nas frentes de estéril é necessário atender apenas a produção e não a qualidade. A primeira estratégia nessa etapa foi distribuir todos equipamentos em frentes aleatórias para geração inicial, porém no algoritmo proposto. Porém, mudou-se a estratégia distribuindo apenas equipamentos necessários até atingir um dos seguintes critérios de parada: produção máxima ou qualidade de pelo menos um dos parâmetros atingido.

A adaptação com o PSO foi iniciada da seguinte forma, os desvios das metas de qualidade e a quantidade de caminhões utilizados determinam a qualidade da solução. Esses valores são repassados ao PSO, e adicionados a um vetor (*V*) que associam esses valores a um par de valores aleatórios para indicar a velocidade e a posição, como indica a linha 3 do pseudocódigo na Figura 1. Na sequência é identificado o *Pbest* da linha e o *Gbest* do grupo. Até então essa é a primeira adaptação no algoritmo proposto com ao algoritmo evolutivo PSO.

Com os resultados ainda preliminares as soluções encontradas não são as melhores para o problema, falta de atualizações na população e a incompleta adaptação do PSO são as causas desse problema. Mas a adoção de um critério de parada, já minimizou o número de equipamentos utilizados.

Considerações finais

A alteração na forma como é gerada a população inicial, alterando a estratégia anterior e adotando a produção e a qualidade atingida de pelo menos um parâmetro como critério de parada, apresentou um ganho na redução de equipamentos utilizados. A proposta de utilizar o algoritmo genético PSO, foi definida pela sua aplicabilidade na resolução de problemas que envolvem soluções não lineares.

Como trabalhos futuros, deseja-se melhorar as soluções com a completa adaptação do PSO para o POLAD com alocação de veículos e inserção total do método proposto por Souza et. al(2009) para explorar o espaço de soluções.

Agradecimentos

Ao orientador deste trabalho que nos deu a oportunidade de participar deste projeto de Iniciação Científica Voluntária e aos demais professores pelo conhecimento e atenção. Aos colegas que compõem esta equipe, por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuem para esse trabalho

Referências bibliográficas

- SICILIANO, A. V. **Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization e suas aplicações problemas de Guerra Eletrônica**. In: SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA do ITA, 9., 2007, São José dos Campos. Anais eletrônicos. São José dos Campos: ITA 2007. Disponível em: <http://www.sigge.ita.br/anais/IXSIGGE/Artigos/GE_56.pdf> . Acesso em: 10 set. 2017.
- COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), PPGEM – UFOP, Ouro Preto, MG: 2005.
- CHANDA, E. K. C., DAGDELEN, KADRI. 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, 1995.
- COELHO, I. M.; RIBAS, S. e SOUZA, M. J. F. **Um algoritmo baseado em grasp, vnd e iterated local search para a resolução do planejamento operacional de lavra**. In XV Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru/SP, 2008.
- EBERHART, R. and KENNEDY, J. (1995). **A new optimizer using particle swarm theory**. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pages 39–43.
- ERCELEBI, S. G. and A. BASCETIN. 2009. "Optimization of shovel-truck system for surface mining." *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 109:433-439.
- COELHO, V. N.; SOUZA, M. J. F.; COELHO, I. M. e RIBAS, S. **Busca geral em vizinhança variável com reconexão por caminhos para o planejamento operacional de lavra**. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p.1606- 1617, Bento Gonçalves/RS, 2010.

Algorithm 1 Pseudocódigo do algoritmo de metaheurística PSO

```
1: Atribui parâmetros
2: for  $i = 0$  até  $tamanhoEnxame$  do
3:   Inicia  $\vec{X}^i$  com uma solução aleatória para o problema
4:   Inicia  $\vec{V}^i$  com uma velocidade aleatória  $< V_{MAX}$ 
5:    $\vec{P}_{best}^i \leftarrow \vec{L}_{best}^i \leftarrow \vec{X}^i$ 
6: end for
7: while Não atingir condição de parada do
8:   for  $i = 0$  até  $tamanhoEnxame$  do
9:     atualiza  $\vec{V}^i$ 
10:     $\vec{X}^i = \vec{X}^i + \vec{V}^i$ 
11:     $\vec{P}_{best}^i \leftarrow$  melhor entre  $\vec{X}^i$  e  $\vec{P}_{best}^i$ 
12:     $\vec{L}_{best}^i \leftarrow$  melhor entre  $\vec{P}_{best}^i$  e  $\vec{L}_{best}^i$ 
13:   end for
14: end while
15: return melhor  $\vec{L}_{best}$ 
```

Figura 1. Pseudocódigo do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO).