

# MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES PELA META-HEURÍSTICA DE COLÔNIA DE FORMIGAS

Victor de Freitas Arruda (UNIMONTES) victorf.arruda@outlook.com  
Diego Leal Maia (UNIMONTES) E-mail diegolmaia.eng@gmail.com

## Resumo

Esse trabalho aborda o problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões no contexto de minas a céu aberto (POLAD). Na modelagem do problema foram retratadas as principais restrições identificadas na literatura especializada bem como foi proposta uma adaptação no algoritmo de colônia de formigas para resolução do POLAD.

**Palavras-Chaves:** Pesquisa Operacional, Ant Algorithms, Planejamento Operacional de Minas a céu aberto.

## 1. Introdução

Segundo Rodrigues (2006), decisões que são relacionadas ao processo de mineração a céu aberto devem ser tomadas com base em critérios científicos bem definidos. Afinal, a produção contempla diversas atividades complexas e um alto investimento de máquinas e pessoal. Assim é importante fazer o planejamento das atividades a serem executadas na mina ao longo do tempo. Nesse plano deve conter informações acerca da alocação dos diversos equipamentos (equipamentos de carga e caminhões), produção de cada equipamento, previsões acerca da produção e atendimento dos requisitos de qualidade. Além de outros fatores o plano deve obedecer a critérios inerentes ao cenário da mina e garantir condições de segurança e manutenção da vida útil da mina (AMARAL, 2008).

A busca por aumento de produtividade e redução de custos sempre impulsionou pesquisas em mineração e, dado as crises que o Brasil vem atravessando nos últimos anos, a otimização de processos operacionais como o da produção em minas a céu aberto se tornaram cada vez mais necessários para a manutenção do empreendimento no mercado (BERNARDI, 2015).

Visando a melhoria no processo de produção, desde 1965 técnicas de pesquisa operacional são utilizadas no contexto da mineração, quando pesquisadores publicaram o algoritmo de programação dinâmica de Lerchs-Grossmann para obtenção da cava final ótima (HUSTRULID; KUCHTA, 1995). Em comum com o POLAD, esses problemas apresentam

grande escala quando se consideram instâncias reais e são considerados NP-difíceis, o que dificulta a sua solução por métodos exatos (AMARAL; PINTO, 2010).

Diversas técnicas foram propostas para resolver esta classe de problema, sendo que a abordagem mais utilizada é baseada em métodos heurísticos. Este trabalho tem o objetivo de solucionar o POLAD utilizando-se de conceitos que são baseados na meta-heurística de colônia de formigas.

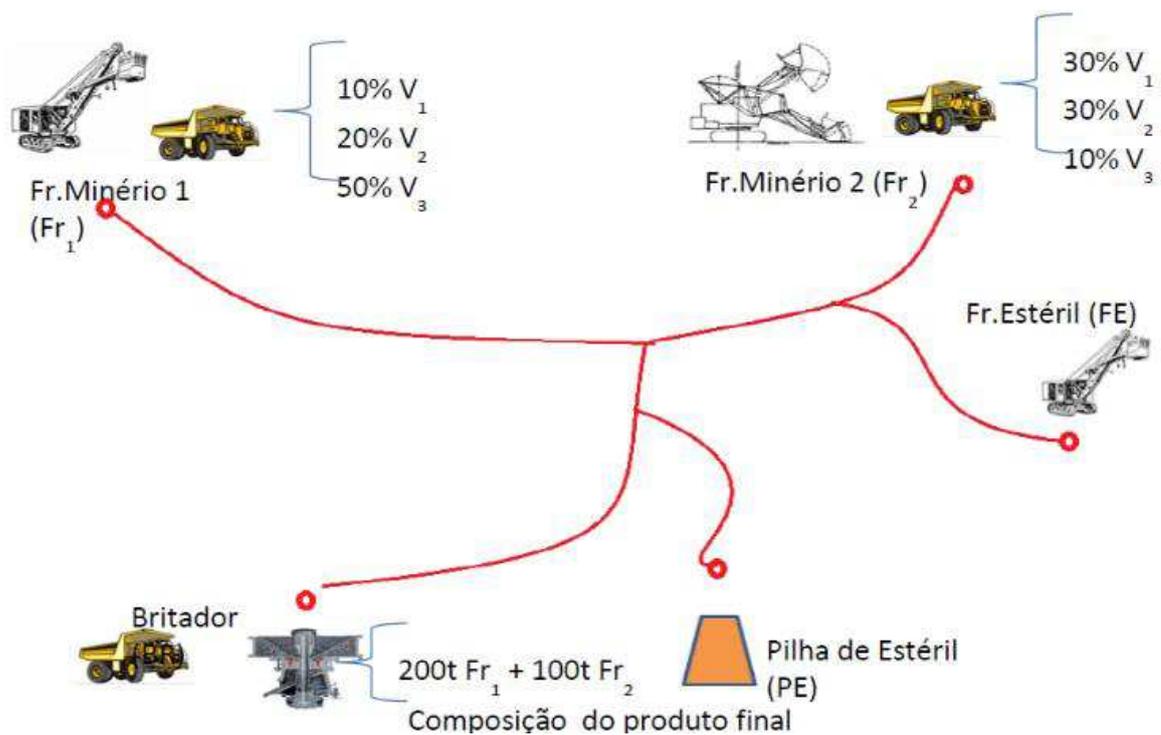
O restante desse trabalho está estruturado como segue. A seção 2 descreve a fundamentação teórica, onde são abordados o POLAD e a meta-heurística de colônia de formigas. A metodologia utilizada para tratar o problema é apresentada na seção 3. Na seção 4 são apresentados os resultados e os cenários utilizados. Por fim são apresentadas as conclusões.

## **2. Referencial teórico**

### **2.1. O problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de veículos**

As mineradoras realizam suas atividades em minas subterrâneas ou a céu aberto. Nas minas a céu aberto, as atividades de carregamento e transporte ocorrem da seguinte maneira: os caminhões se deslocam até as frentes de lavra (locais de extração de minério ou estéril numa mina) onde opera um equipamento de carga que é compatível com o veículo. Os caminhões são carregados pelos equipamentos de carga e em seguida se deslocam para os pontos de descarga, onde depositam o material extraído. Os pontos de descarga de material se classificam em: Pilhas de estéril onde fica depositado o estéril retirado das frentes; Britador para onde é destinado o minério retirado das frentes de minério (RODRIGUES, 2006).

A figura 1 ilustra uma mina a céu aberto onde pode-se observar 3(três) frentes de lavra, sendo 2(duas) frentes de minério de 1(uma) de estéril, 1(um) ponto de descarregamento de minério (britador) e outro onde é descarregado o estéril (pilha de estéril).



Fonte: Mendes (2013)

Coelho *et al.* (2011) relata que no POLAD o que se deseja encontrar é a associação entre os equipamentos de carga e frentes de lavra (minério e estéril), para determinar a taxa de extração de material em cada uma das frentes de lavra, além de associar caminhões de forma que as metas de produção e qualidade sejam satisfeitas.

Segundo Coelho (2012) ao fazer a associação entre os equipamentos de carga e caminhões é necessário verificar a compatibilidade entre os equipamentos, alocar dinamicamente os caminhões e determinar o número de viagens a serem realizadas por cada veículo em cada frente de lavra.

Para resolução do POLAD é comum otimização de uma função mono ou multiobjetivo nas quais os objetivos principais, encontrados na literatura são:

- Tamanho da frota de caminhões empregados na operação;
- Qualidade do minério produzido;
- Produção dos diversos equipamentos;
- Produção de minério.

Este trabalho considera a alocação dinâmica de caminhões, ou seja, ao final de cada viagem o caminhão pode ser deslocar para uma frente qualquer onde opera um equipamento de carga que

seja compatível com o mesmo. Segundo Costa (2005) essa estratégia contribui para o aumento da produtividade da frota ou a redução do número de equipamentos necessários para manter o mesmo nível de produção.

Para o modelo matemático do problema, que é apresentado das equações 1 a 22, temos os seguintes dados de entrada:

- O*: Conjunto de frentes de minério;
  - W*: Conjunto de frentes de estéril;
  - P*: Conjunto de frentes formado por *O* U *W*;
  - Par*: Conjunto dos parâmetros de qualidade analisados no minério;
  - S*: Conjunto de equipamentos de carga;
  - V*: Conjunto de equipamentos de transporte;
  - Pr*: Ritmo de lavra recomendado (t/h);
  - Pl*: Ritmo de lavra mínimo (t/h);
  - Pu*: Ritmo de lavra máximo (t/h);
  - $\beta^-$ : Penalidade por desvio negativo da produção;
  - $\beta^+$ : Penalidade por desvio positivo da produção;
  - $t_{ij}$ : 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 (%);
  - $\alpha_j^-$ : Penalidade por desvio negativo para o parâmetro *j* na mistura;
  - $\alpha_j^+$ : Penalidade por desvio positivo para o parâmetro *j* na mistura;
  - $Ql_i$ : Ritmo de lavra mínimo para a frente *i* (t/h);
  - $Qu_i$ : Ritmo de lavra máximo para a frente *i* (t/h);
  - rem*: Relação estéril/minério requerida;
  - $Cl_k$ : Produção mínima do equipamento de carga *k* (t/h);
  - $Cu_k$ : Produção máxima do equipamento de carga *k* (t/h);
  - cap<sub>l</sub>*: Capacidade do caminhão *l* (t);
  - $T_{il}$ : Tempo total de ciclo do caminhão *l* na frente *i* (min);
  - $g_{lk} = \begin{cases} 1 & \text{se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- E as seguintes variáveis de decisão:
- $x_i$ : Ritmo de lavra da frente *i* (t/h);
  - $y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o equipamento de carga } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$
  - $n_{il}$ : 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 em relação ao recomendado (t/h);
  - $P^+$ : Desvio positivo do ritmo de lavra em relação ao recomendado (t/h).

$$\min \sum_{j \in Par} \alpha_j^- \beta_j^- + \sum_{j \in Par} \alpha_j^+ \beta_j^+ + \beta^- P^- + \beta^+ P^+ \quad (1)$$

Sujeito às restrições:

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

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

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

$$\sum_{i \in O} x_i - Pu \leq 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in O} x_i - Pl \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in O} x_i - Pr + P^- - P^+ = 0 \quad (7)$$

$$x_i - Qu_i \leq 0 \quad \forall i \in P \quad (8)$$

$$x_i - Ql_i \geq 0 \quad \forall i \in P \quad (9)$$

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

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

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

$$\sum_{i \in W} x_i - rem \sum_{i \in O} x_i \geq 0 \quad (13)$$

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

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

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in P, k \in S \quad (16)$$

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

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

$$n_{il} T_{il} - 60 \sum_{k \in S} y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in P, l \in V, gl_k \neq 0 \quad (19)$$

$$\sum_{i \in P} n_{il} T_{il} - 60 \leq 0 \quad \forall l \in V \quad (20)$$

$$x_i - \sum_{k \in V} n_{ik} cap_k = 0 \quad \forall i \in P \quad (21)$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in P, l \in V \quad (22)$$

A função objetivo, na Equação (1), tem por finalidade minimizar os desvios da qualidade e produção do minério requeridos pelo cliente, assim como minimizar o número de equipamentos utilizados na produção. As Equações (2) à (22) são referentes as restrições do problema. As Equações (2) á (4) impedem que soluções inviáveis com respeito aos limites de especificação dos parâmetros de controle sejam aceitas. Para assegurar os limites de produção de minério têm-se as Equações (5) e (6). A restrição (7) é sobre atendimentos das metas de produção de minério e estéril. A respeito dos limites de ritmo de lavra temos as Equações (8) e (9). Equações (10) à (12) define que as variáveis em questão são não-negativas. A Equação (13) e sobre o atendimento da relação estéril/minério mínima requerida. O que define um equipamento por frente e vice-versa são as restrições (14) e (15). A restrição (16) define se equipamento de carga deve ou não ser alocado a uma determinada frente. Equações (17) e (18) determinas os limites do ritmo de lavra. A restrição entre a capacidade do caminhão e do equipamento de carga é verificada na Equação (19) e na (20) a restrição de tempo de utilização do caminhão. A Equação (21) faz com que o ritmo de lavra de uma frente seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados. A restrição (22) força que seja inteiro positivo o número de viagens que um caminhão faz a uma frente.

## 2.2. Meta-heurística de otimização por colônia de formigas

O *Ant Algorithm* foi proposto como uma abordagem alternativa para problemas de otimização combinatória, como o caixeiro viajante e o problema de alocação quadrática. (DORIGO; CARO; GAMBARDILLA., 1999).

Ele tem inspiração no comportamento de algumas espécies de formigas em sua busca por alimento que utilizam da estigmergia para comunicação (DORIGO *et al.*, 2000). No caso das formigas, a estigmergia ocorre quando concentrações de feromônio são depositados nos trechos percorridos pelas formigas, criando assim trilhas entre a colônia e o alimento (DORIGO *et al.*, 1996). A concentração de feromônio numa trilha pode aumentar (outras formigas percorrem a trilha) ou diminuir (a trilha não é usada por outras formigas) (DORIGO; STÜZLE, 2004).

Segundo Dorigo & Socha (2006) na meta-heurística *Ant Colony Optimization* (ACO – Otimização por Colônia de Formigas), cujo pseudocódigo é apresentado no Algoritmo 1. as formigas artificiais constroem soluções para um problema de otimização e trocam informações sobre a qualidade dessas soluções simulando a comunicação adotada por formigas reais.

Em cada iteração do laço repetitivo do ACO tem-se a execução dos procedimentos seguintes:

- i. Geração de novas soluções e verificação da qualidade;
- ii. Implementação de mecanismo de busca local (opcional);
- iii. Atualização do feromônio.

Algoritmo 1 – Pseudocódigo da Meta-heurística de Colônia de Formigas

---

```
1: IniciarParametros( $\tau, \eta, \alpha, \beta, \rho$ )
2: para cada iteracao faça
3:   para cada formiga faça
4:     ConstruirSolucao( )
5:   fim para
6:   BuscaLocal( ) {Opcional}
7:   AtualizarFeromonio( )
8: fim para
```

---

Fonte: Dorigo; Socha, 2007

### 3. O ACO-POLAD

Para uma grande quantidade de problemas de elevada dimensão (classificados como NP-Completo) como o POLAD, encontrar uma solução ótima global pode ser bastante trabalhoso quando não impossível. Diante dessa limitação e dificuldade, foi proposta uma variante do algoritmo colônia de formigas, o ACO-POLAD, cujo pseudocódigo é apresentado no algoritmo 2. O ACO-POLAD implementa um conjunto de funcionalidades que são detalhadas nas subseções seguintes deste trabalho.

Algoritmo 2 – Pseudocódigo do algoritmo ACO-POLAD para resolução do POLAD

---

Algoritmo ACO\_POLAD

```

1:  IniciarParametros( $\tau, \eta, \alpha, \beta, \rho$ )      (Detalhes na subseção 3.2)
2:  para cada iteracao faça
3:      para cada formiga faça
4:          ConstruirSolucao( )      (Detalhes na subseção 3.3)
5:      fim para
6:      AtualizarFeromonio( )      (Detalhes na subseção 3.4)
7:  fim para
fim ACO_POLAD

```

### 3.1. Matriz de feromônio ( $\tau$ ) e matriz de informação heurística ( $\eta$ )

Neste contexto, a matriz de feromônio ( $\tau$ ) é representada como um grafo bipartido, onde todos os equipamentos de carga estão conectados a todas as frentes de lavra através de uma aresta. A aresta, por sua vez, armazena um valor que representa o quão desejável é a alocação entre o equipamento de carga  $j$  e a frente de lavra  $i$ , ou seja, quão bom aquele arranjo tem sido nas ultimas iterações. Inicialmente todas as células da matriz de feromônio ( $\tau$ ) recebem valor 1 (um), esse valor corresponde quantidade de feromônio e é atualizado ao final de cada iteração.

A matriz de feromônio ( $\tau$ ), ilustrada pela Tabela 1, é representada através de uma matriz  $N \times M$ , sendo que  $N$  e  $M$  correspondem, respectivamente, aos equipamentos de carga e frentes de lavra da mina.

Tabela 1 - Ilustração de uma matriz de feromônio  $N \times M$

	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	...	Frente M
Eq. Carga 1	1	1	1	1	1	1	1
Eq. Carga 2	1	1	1	1	1	1	1
Eq. Carga 3	1	1	1	1	1	1	1
Eq. Carga 4	1	1	1	1	1	1	1
...	1	1	1	1	1	1	1
Eq. Carga N	1	1	1	1	1	1	1

A matriz de informação heurística ( $\eta$ ) é uma matriz de números reais no intervalo  $[0, 1]$  que se destina a determinar a normalização da média do somatório dos desvios de qualidade de cada frente de lavra em relação ao pedido do cliente e é determinada pela Equação (23):

$$\frac{k - \sum_{i \in O} (t_{ij} - tr_j) x_i}{k} \quad (23)$$

Sendo  $t_{ij}$  a quantidade do parâmetro de controle  $j$  na frente de minério  $i$  (%),  $tr_j$  o valor requerido do parâmetro de controle  $j$  no produto final (%),  $x_i$  é a quantidade de minério a ser extraído da frente  $i$  e  $k$  é a quantidade de parâmetros avaliados.

Como neste trabalho o objetivo é minimizar o desvio dos parâmetros, foi feita a normalização dos valores antes da totalização para determinar o valor final da solução. Assim o menor desvio fica com o valor 1 (um) e os outros ficam com valores entre 0 e 1, sendo que quanto maior for o desvio, menor será a atração da formiga por ele (frente de lavra).

### 3.2. Iniciar parâmetros

Esta rotina do ACO-POLAD é responsável por inicializar os parâmetros principais da implementação, além dos parâmetros que caracterizam o cenário de mina a céu aberto. Ou seja, criam-se os objetos do cenário da mina (equipamentos de carga, frentes de lavra e veículos), a matriz de informação heurística ( $\eta$ ) e também a matriz de feromônio ( $\tau$ ). Também são definidos outros parâmetros do algoritmo como, por exemplo: número de iterações, total de formigas geradas em cada iteração, parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\rho$  usados na geração de novas soluções (formigas) a partir de modificações realizadas nas soluções correntes.

### 3.3. Construir Solução

Esta rotina do consiste na execução ordenada dos seguintes passos:

- Associar: criação de tuplas do tipo <frente, equipamento de carga> onde cada equipamento de carga disponível no cenário de mina é associado a uma frente de lavra;
- Determinar a quantidade de viagens para as frentes de estéril e de minério;
- Alocar a frota de caminhões às tuplas geradas anteriormente.

Algoritmo 3 – Pseudocódigo da geração de novas soluções

---

```
1: função CONSTRUIRSOLUCAO
2:   Associar( $\tau, \eta, \alpha, \beta$ )
3:   DefinirViagensEsteril( )
4:   DefinirViagensMinerio( )
5:   AlocarCaminhoes( )
6: fim função
```

---

### 3.4. Atualização de feromônio

A atualização (evaporação e depósito) do feromônio, descrita na Equação (25), acontece ao final de cada iteração no feromônio associado ao par frente e equipamento de carga. No depósito de feromônio é depositada uma certa quantidade de feromônio em cada  $\tau_{ij}$  segundo à qualidade da solução em relação às demais. Para determinar o valor de feromônio a ser depositado por cada formiga, utiliza-se sempre a melhor e a pior solução encontrada até o momento como base

para um cálculo, apresentado na Equação (24), que tem como resultado uma taxa que será multiplicada por um valor fixo que chamamos de  $\gamma$ . Em outras palavras, para cada iteração, cada formiga acrescenta uma quantidade  $\gamma * \text{taxa}_{\text{formiga}}$  a cada uma das tuplas selecionadas por ela.

$$\text{taxa}_{\text{formiga}} = 1 - \frac{\text{formiga}_{\text{avaliacao}} - \text{min}_{\text{avaliacao}}}{\text{max}_{\text{avaliacao}} - \text{min}_{\text{avaliacao}}} \quad (24)$$

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^{(k)} \quad (25)$$

Sendo:

- $0 \leq \rho \leq 1$  - Taxa de atualização do feromônio.
- A expressão  $(1 - \rho) \tau_{ij}$  a evaporação do feromônio;
- $\tau_{ij}$  - Quantidade de feromônio associado a alocação <frente  $i$ , equipamento de carga  $j$ > e  $\eta_i$  é a informação heurística associada à frente  $i$ .

Ao construir a solução, a probabilidade de uma formiga selecionar de uma tupla de par <frente, equipamento de carga> é calculado usando a equação 26, executado até o final da alocação de todos os equipamentos de carga.

$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_i^{\beta}}{\sum_{l \in N_{kj}} \tau_{ij}^{\alpha} \eta_i^{\beta}} \quad (26)$$

Onde:  $p_{ij}^k$  corresponde à probabilidade da formiga  $k$  selecionar a alocação  $(i,j) = \langle \text{frente } i, \text{ equipamento de carga } j \rangle$ .  $\tau_{ij}$  é a quantidade de feromônio associado a alocação <frente  $i$ , equipamento de carga  $j$ > e  $\eta_i$  é a informação heurística associada à frente  $i$ . Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são indicadores que servem para priorizar o feromônio ou a informação heurística sendo que  $\alpha + \beta = 1$  (um). A expressão presente no denominador da fórmula é utilizada para normalização do resultado.

A qualidade de uma solução é determinada através de uma função objetivo, onde a avaliação é realizada somando-se os desvios absolutos normalizados em relação ao recomendado de produção e qualidade do minério, além da porcentagem de utilização dos equipamentos de transporte.

#### 4. Resultados

As simulações do algoritmo proposto foram realizadas em um equipamento com processador i7-8550U, 1.8GHz, com 16GB de RAM, rodando o sistema operacional Linux Ubuntu 18.04.

O ACO-POLAD foi codificado em Python 2.7 utilizando o compilador GCC 5.4.0. Em todas as simulações foi considerado 100 iterações, 8 formigas, (preferência por feromônio)  $\alpha = 0.4$ , (preferência por informação heurística)  $\beta = 0.6$ , (taxa de evaporação)  $\rho = 0.35$  e (valor fixo de multiplicação)  $\gamma = 0.2$  todos esses valores foram definidos após vários testes computacionais.

Utilizaram-se oito cenários de minas a céu aberto, retiradas do trabalho de SOUZA *et al.* (2010) e detalhados na Quadro 1, para validação do ACO-POLAD. Essa base de dados foi organizada da seguinte forma: cada equipamento de carga tem uma produção mínima e máxima que deve ser atendida. Além disso, cada caminhão pode efetuar operações de carregamento de material onde opera um equipamento de carga que seja compatível com o mesmo. Cada frente de lavra contém informações sobre: tempo de ciclo, quantidade de material para carregamento, parâmetros de qualidade associados à frente (quando se tratar de uma frente de minério).

Também são especificados (valores máximo, mínimo e desejados) para cada cenário: os parâmetros de controle de qualidade exigidos para produção, a quantidade de minério e de estéril desejados. Vale ressaltar ainda que os valores dos parâmetros de controle são diferentes em cada frente de minério, sendo assim, mesmo dispondo do mesmo conjunto de equipamentos soluções diferentes são encontradas em cada lavra.

Quadro 1 - Caracterização dos cenários de minas a céu aberto analisados neste trabalho.

Instância	Frente	Equipamentos de Carga		Parâmetros	Caminhões	
		quantidade	produção (ton/h)		quantidade	produção (ton)
mina1	17	8	(4, 900t), (2, 1000t), (2, 1100t)	10	30	(15,50t), (15,80t)
mina2	17	8	(4, 900t), (2, 1000t), (2, 1100t)	10	30	(15,50t), (15,80t)
mina3	32	7	(2, 400t), (2, 500t), (1, 600t), (1, 800t), (1, 900t)	10	30	(30,50t)
mina4	32	7	(2, 400t), (2, 500t), (1, 600t), (1, 800t), (1, 900t)	10	30	(30,50t)
mina5	17	8	(4, 900t), (2, 1000t), (2, 1100t)	5	30	(15,50t), (15,80t)
mina6	17	8	(4, 900t), (2, 1000t), (2, 1100t)	5	30	(15,50t), (15,80t)
mina7	32	7	(2, 400t), (2, 500t), (1, 600t), (1, 800t), (1, 900t)	5	30	(30,50t)
mina8	32	7	(2, 400t), (2, 500t), (1, 600t), (1, 800t), (1, 900t)	5	30	(30,50t)

As soluções encontradas que não eram soluções viáveis foram afetadas por penalidades que fizeram com que a solução piorasse em 1000(mil) vezes, as melhores soluções deram valores satisfatórios para os cenários. No Quadro 2 é possível observar os resultados, este quadro apresenta a média e o desvio padrão da avaliação da solução ao longo das 100 execuções do algoritmo em cada um dos cenários. É possível observar também que as avaliações das soluções geradas em cada cenário convergiram para valores próximos, visto o valor do desvio padrão.

Quadro 2 – Resultados encontrados

Cenário	Desvio Padrão	Média
Mina 1	0,0185335264	0,8372748870

<b>Mina 2</b>	0,0488053020	2,2569947502
<b>Mina 3</b>	0,0474172438	0,5752588314
<b>Mina 4</b>	0,0300279531	0,6105485721
<b>Mina 5</b>	0,0151282796	0,7601564153
<b>Mina 6</b>	0,1004430387	1,2188942572
<b>Mina 7</b>	0,0006490366	0,4686368575
<b>Mina 8</b>	0,0006615639	0,4693233442

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A proposta deste trabalho foi de contribuir com a literatura desenvolvendo uma variante da meta-heurística de colônia de formigas para resolução do problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. No POLAD o que se pretende é alocar os equipamentos de carga disponíveis na mina nas frentes de lavra selecionadas e determinar o número de viagens de cada caminhão a cada uma das frentes de lavra para atender ao pedido do cliente e também viabilizar obras de infraestrutura da mina.

Foi previsto que a meta-heurística conseguiria encontrar soluções viáveis para o problema, além de convergir para uma solução ótima. Esta abordagem pareceu uma boa opção para resolução do problema, visto que através do baixo desvio padrão vimos que a maioria das soluções encontradas tem uma avaliação próxima entre si, mostrando que o algoritmo convergiu para um valor bem próximo em todas as execuções.

Nas versões futuras do algoritmo pretendemos introduzi novas funcionalidades, além de testar novos cenários nas versões posteriores, como destacado a seguir:

- Desenvolver uma versão multiobjetivo do algoritmo que trabalhe e/ou manipula com os objetivos separadamente (sem ponderação dos mesmos);
- Desenvolver métodos de busca local para melhoramento das soluções encontradas;
- Comparar os resultados do ACO-POLAD com os de outras heurísticas encontradas na literatura.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, M. **Modelos Matemáticos e Heurísticos para o Auxílio ao Planejamento de Operações de Lavra em Minas a Céu Aberto**. 2008. 108p. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção)–Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

AMARAL, M. d; PINTO, Luiz Ricardo. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e de transporte. **Anais XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Bento Gonçalves (RS), p. 1177-1188, 2010.

BERNARDI, H.A. **Dimensionamento de Equipamentos para as operações unitárias de Lavra de Mina a Céu Aberto**. 2015. 83p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2015.

COELHO, V.N. **Uma Abordagem Multiobjetivo para o Problema de Planejamento Operacional de Lavra**. Relatório Final PROBIC/FAPEMIG, 2012, Ouro Preto, MG, Brasil.

COELHO, V.N. et al. PGGVNS: Um Algoritmo Paralelo para o Problema de Planejamento Operacional de Lavra. **Anais XVIII Simpósio De Engenharia De Produção-SIMPEP**, Bauru, SP, Brasil, p.1-14,2011.

COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.

DORIGO, M.; CARO, Gianni Di; GAMBARDELLA, Luca M. Ant Algorithms for Discrete Optimization. **Artificial Life**, v.5, p137-172, 1999.

DORIGO, M.; BIRATTARI M.; STÜTZLE, T.; Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique. **IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle**. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium. 2006.

DORIGO M.; BONABEAU E.; THERAULAZ G.; Ant algorithms and stigmergy. **IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle**. Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium; EuroBios, Paris, France; Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 2000.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A.; The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B**, v.26, p.1-13, 1996.

DORIGO, M.; SOCHA, K. An Introduction to Ant Colony Optimization. **IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle**. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium. 2006.

DORIGO, M., SOCHA, K., 2007. An introduction to ant colony optimization. In: Gonzalez, T.F. (Ed.), *Handbook Approximation Algorithms and Metaheuristics*. Chapman and Hall/CRC Press.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. Ant Colony Optimization. Massachusetts: MIT Press, 2004. 321p.

HUSTRULID, W., KUCHTA, M. **Open pit mine planning & design**, Irradiação Sul Ltda, Porto Alegre, Vol. 1: Fundamentals, 1995.

MENDES, J. B. **Uma Abordagem Multiobjetivo para o Problema de Despacho de Caminhões em Minas a Céu Aberto**. 2013. 133 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RODRIGUES, L.F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. 2006. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.