57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Um algoritmo baseado em *Iterated Local Search* para o problema de alocação e localização de repetidoras e roteadores em minas a céu aberto

Jéssica Cristina Teixeira da Costa[1], Tatianna Aparecida Pereira Beneteli[2], Luciano Perdigão Cota[2]

[1]Programa de Pós-Graduação em Inst., Controle e Automação de Processos de Mineração
Instituto Tecnológico Vale e Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil

[2]Instituto Tecnológico Vale
Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil

jessica.costa@aluno.itv.org, tatianna.beneteli@pq.itv.org, luciano.p.cota@itv.org

RESUMO

Este estudo propõe um algoritmo baseado na meta-heurística *Iterated Local Search* especializado para o problema de alocação e localização de repetidoras e roteadores em minas a céu aberto. O objetivo é minimizar o número de equipamentos de rede instalados e as distâncias entre esses equipamentos e os pontos de operação. O algoritmo foi validado em 12 instâncias, variando o número de pontos de operação e locais candidatos à instalação de equipamentos de rede. Os resultados obtidos foram comparados aos de um resolvedor matemático com uma formulação MILP do problema, demonstrando a eficácia do algoritmo em encontrar boas soluções com baixos tempos computacionais. Para todos as instâncias que o resolvedor conseguiu encontrar a solução ótima, o algoritmo proposto também convergiu para esta solução. Ao contrário do resolvedor, o algoritmo proposto obteve êxito em encontrar soluções viáveis inclusive para as maiores instâncias analisadas, assegurando uma cobertura eficiente da área operacional.

PALAVRAS CHAVE. Iterated Local Search, Problema de alocação e localização, Roteadores e Repetidores, Minas a céu aberto, PO na Mineração.

Tópicos: POI – PO na Indústria, OA – Outras Aplicações em PO

ABSTRACT

This study proposes an algorithm based on the Iterated Local Search metaheuristic specialized for the location-allocation problem of repeaters and routers in open-pit mines. The objective is to minimize the number of installed network equipment and the distances between this equipment and the operating points. The algorithm was validated in 12 instances, varying the number of operating points and candidate locations for the installation of network equipment. The results were compared to those of a mathematical solver with an MILP formulation of the problem, demonstrating the algorithm's effectiveness in finding good solutions with reduced computational time. For all the instances in which the solver found the optimal solution, the proposed algorithm also converged to this solution. Unlike the solver, the proposed algorithm succeeded in finding good solutions even for the largest instances analyzed, ensuring efficient coverage of the operational area.

KEYWORDS. Iterated Local Search, Location-allocation problem, Routers and Repeaters, Open-pit mines, OR in mining industry.

Paper topics: ORI - OR in Industry, OA - Other OR Applications

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

1. Introdução

A infraestrutura de comunicação e os sistemas de rede são essenciais em minas a céu aberto. A troca de dados em tempo real entre dispositivos móveis, sistemas de controle e equipamentos de monitoramento é crucial para a eficiência e segurança das operações. As operações em ambientes de mineração a céu aberto dependem de redes estáveis para garantir o funcionamento de equipamentos como perfuratrizes, escavadeiras e caminhões. A ausência dessa infraestrutura compromete a continuidade, aumenta a incidência de falhas e os riscos à segurança. Além disso, a comunicação constante entre equipes é vital para a coordenação das tarefas e resposta rápida a emergências. A definição da localização de equipamentos de rede é desafiadora devido à dinâmica das operações, à vasta extensão territorial e à presença de barreiras físicas. Essas decisões costumam ser tomadas empiricamente, com testes em campo. Apesar de funcional, essa abordagem é lenta, ineficiente e pouco adaptável a mudanças operacionais, comprometendo a cobertura e o desempenho da rede.

Embora problemas de localização sejam amplamente estudados, há uma lacuna relevante em aplicações voltadas à mineração, especialmente em minas a céu aberto, onde poucos trabalhos tratam da localização de roteadores. Em Mandarino et al. [2024], os autores propuseram uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (MILP, das iniciais do termo em inglês *Mixed-Integer Linear Programming*) para o problema de localização de roteadores (RLP, das iniciais do termo em inglês *Router location-allocation problem*). Nesse trabalho apenas roteadores são utilizados na implementação da rede de comunicação. Em grandes minas a céu aberto, a cobertura de rede exige o uso de roteadores e repetidoras em conjunto, o que aumenta a complexidade do problema e requer abordagens específicas. Recentemente, em Costa et al. [2025] foi apresentada uma formulação MILP, baseada no problema p-mediana, para o problema de alocação de roteadores e repetidoras (RRLP, das iniciais do termo em inglês *Repeaters and routers location-allocation problem*). O objetivo no RRLP é minimizar o número de dispositivos e as distâncias entre pontos de operação e os dispositivos de rede, assegurando cobertura eficiente em minas a céu aberto. Contudo, ainda não foram explorados algoritmos heurísticos para RLP e o RRLP.

Neste trabalho, em continuidade aos estudos anteriores, propõe-se um algoritmo baseado no *Iterated Local Search* (ILS) [Lourenço et al., 2001] especializado para o RRLP. A solução inicial do ILS é construída por um algoritmo construtivo aleatório que garante a construção de uma solução que respeite o número máximo de roteadores e repetidores disponíveis e não instale mais de um equipamento (roteador ou repetidor) no mesmo ponto de instalação. Para explorar o espaço de soluções foram propostas quatro estruturas de vizinhança específicas para o RRLP. Além disso, para evitar que o ILS fique preso em ótimos locais foi proposto um algoritmo de perturbação baseado em um movimento aleatório de troca de posicionamento de roteadores e repetidoras. Para avaliar o algoritmo proposto foram utilizadas as nove instâncias da literatura de Costa et al. [2025], acrescidas de três instâncias grandes desenvolvidas neste estudo. Os resultados do algoritmo foram comparados aos de um resolvedor matemático com a formulação MILP de Costa et al. [2025].

2. Revisão bibliográfica

Problemas de localização são fundamentais em áreas como serviços, transporte e infraestrutura, onde decisões sobre a alocação de recursos impactam diretamente na eficiência operacional. Esses problemas buscam definir pontos estratégicos para instalação de facilidades, atendendo à demanda de forma otimizada. Uma das abordagens mais utilizadas é o problema p-mediana, que determina a localização de p facilidades, minimizando as distâncias aos pontos de demanda [Chappidi e Singh, 2023]. Este problema clássico de localização é NP-difícil [Liotta et al., 2005] e tem sido aplicado em diversos contextos [Akdogan et al., 2023; Jia et al., 2023].

No campo das redes de comunicação, problemas de localização-alocação têm ganhado relevância devido à crescente demanda por infraestrutura eficiente. Na mineração, a localização de

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

equipamentos de rede é crucial devido às características desafiadoras desses ambientes. Em Mandarino et al. [2024], foi proposto um modelo MILP para a localização de roteadores em minas a céu aberto, aplicado à mina Fábrica Nova em Mariana-MG. O problema p-mediana foi utilizado para minimizar o número de roteadores instalados, reduzindo custos e assegurando a cobertura necessária. Embora vários estudos abordem a localização de instalações em diversos contextos, são raros os que tratam simultaneamente da localização de repetidoras e roteadores em mineração a céu aberto. A inclusão de repetidoras é essencial em grandes minas, onde são necessárias em conjunto com roteadores para garantir a cobertura de rede em todo o território. Recentemente, em Costa et al. [2025], foi apresentada uma formulação MILP para o problema de localização-alocação de repetidoras e roteadores em minas a céu aberto. Dando continuidade a esse estudo, nossa proposta introduz um algoritmo baseado em meta-heurística para minimizar ambas as facilidades simultaneamente, visando boas soluções para instâncias de grande porte.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das principais características da nossa proposta em relação aos estudos revisados. Os trabalhos estão listados cronologicamente, da publicação mais antiga para a mais recente. As colunas 2 a 7 mostram as funções objetivo de cada estudo. A coluna 8 indica o setor de aplicação e a coluna 9 especifica o tipo de facilidade. As três últimas colunas detalham os métodos de solução, classificados como exatos, heurísticos ou híbridos.

Tabela 1: Resumo das principais características da nossa proposta em comparação com os estudos revisados

Trabalhos	Funções objetivo						Aplicação	Facilidade	Método de solução		
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]			Exato	Heurístico	Hibrido
Sayad et al. [2020]				✓	✓		-	roteadores		✓	
Raithatha et al. [2021]	✓						-	gateway	✓	✓	
Yang et al. [2021]		✓					parques eólicos	roteadores		✓	
Mekhmoukh Taleb et al. [2022]				✓	✓		-	roteadores		✓	
Bollapragada et al. [2023]						✓	zona urbana	hub	✓	✓	
Jansang et al. [2023]						✓	zona rural	roteadores	✓		
Nouri et al. [2023]				✓	✓		-	roteadores		✓	
Rabet et al. [2023]						✓	mineração a céu aberto	antena de rede 5G		✓	
Mandarino et al. [2024]	✓	✓					mineração a céu aberto	roteadores	✓		
Mohammed e Othman [2024]		✓				✓	zona urbana	gateway		✓	
Ussipov et al. [2024]				✓	✓		-	roteadores		✓	
Costa et al. [2025]	✓		✓				mineração a céu aberto	roteadores e repetidoras	✓		
Nossa Proposta	✓		✓				mineração a céu aberto	roteadores e repetidoras	✓	✓	

Legenda: [1]: Minimizar distância; **[2]:** Minimizar uma facilidade; **[3]:** Minimize duas facilidades; **[4]:** Maximizar conectividade da rede; **[5]:** Maximizar cobertura do cliente; **[6]:** Outros.

3. Formulação MILP

Esta seção apresenta a formulação MILP para o RRLP, proposta em Costa et al. [2025]. A seguir, são descritos os conjuntos, índices, parâmetros e variáveis de decisão utilizados.

- Conjuntos:

  $\mathcal{J}$: conjunto de pontos de operação a serem atendidos;

  $\mathcal{I}$: conjunto de locais candidatos à instalação dos equipamentos de rede;

  $\mathcal{R}$: conjunto de roteadores;

  $\mathcal{T}$: conjunto de repetidoras;

  $\mathcal{E}$: conjunto de equipamentos de rede ($\mathcal{E} = \mathcal{R} \cup \mathcal{T}$).

- Índices:

  j : índice para um elemento de $\mathcal{J}$;

  i, k, a : índice para um elemento de $\mathcal{I}$.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

- Parâmetros:

D_{ij} : distância do ponto de operação j ao local candidato i;
DE_{ka} : distância entre os locais candidatos k e a;
PR_{max} : número máximo de roteadores que podem ser instalados;
PT_{max} : número máximo de repetidoras que podem ser instaladas;
RR : raio de cobertura de cada roteador;
RT : raio de cobertura de cada repetidora.

- Variáveis de decisão:

pr : número de roteadores instalados;
pt : número de repetidoras instaladas;
x_{ij} : $\begin{cases} 1, & \text{se o ponto de operação } j \text{ é atendido por um equipamento de rede instalado em } i; \\ 0, & \text{caso contrario;} \end{cases}$
yr_i : $\begin{cases} 1, & \text{se o roteador é instalado no local } i; \\ 0, & \text{caso contrario;} \end{cases}$
yt_i : $\begin{cases} 1, & \text{se a repetidora é instalada no local } i; \\ 0, & \text{caso contrario;} \end{cases}$

O objetivo é instalar repetidoras $t \in \mathcal{T}$ e roteadores $r \in \mathcal{R}$ para atender todos os pontos de operação $j \in \mathcal{J}$, minimizando o número de equipamentos de rede instalados e a soma das distâncias entre os pontos de operação e os equipamentos.

A função objetivo da formulação proposta possui duas parcelas: a primeira minimiza o número de equipamentos de rede instalados; a segunda, a soma das distâncias entre os pontos de operação e os equipamentos instalados. As equações (1) a (3) representam essa função.

$$min\ \alpha \left(\sigma \frac{pr}{|\mathcal{R}|} + \phi \frac{pt}{|\mathcal{T}|} \right) + \beta \left(\frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij}}{|\mathcal{J}| \max(RR, RT)} \right) \tag{1}$$

$$\alpha + \beta = 1 \tag{2}$$

$$\sigma + \phi = 1 \tag{3}$$

onde α e β são os pesos da primeira e segunda parcelas da função objetivo, respectivamente. Os parâmetros σ e ϕ representam os pesos atribuídos à instalação de roteadores e repetidoras.

A restrição (4) assegura que todos os pontos de operação estejam dentro do raio de cobertura dos equipamentos de rede instalados. A restrição (5) exige que cada ponto de operação seja atendido por ao menos um equipamento, permitindo redundância e maior confiabilidade. A restrição (6) garante que um ponto só seja atendido se houver uma repetidora ($yt_i = 1$) ou um roteador ($yr_i = 1$) instalado no local. Já a restrição (7) limita a instalação a, no máximo, um equipamento por local.

$$D_{ij}\, x_{ij} \leq RR\, yr_i + RT\, yt_i \qquad \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \tag{4}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} x_{ij} \geq 1 \qquad \forall j \in \mathcal{J} \tag{5}$$

$$x_{ij} \leq yr_i + yt_i \qquad \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \tag{6}$$

$$yr_i + yt_i \leq 1 \qquad \forall i \in \mathcal{I} \tag{7}$$

A restrição (8) define o número de roteadores instalados. A restrição (9) limita essa quantia ao número de roteadores disponíveis PR_{max}, enquanto a restrição (10) garante a instalação de ao menos um roteador. De forma análoga, a restrição (11) define o número de repetidoras instaladas e a equação (12) limita esse valor a PT_{max}.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

$$\sum_{a \in \mathcal{I}} yr_a = pr \tag{8}$$

$$pr \leq PR_{max} \tag{9}$$

$$pr \geq 1 \tag{10}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} yt_k = pt \tag{11}$$

$$pt \leq PT_{max} \tag{12}$$

A restrição (13) garante que a repetidora instalada em k esteja dentro do raio de cobertura de um roteador em a. O termo $(M \times (1 - yr_a))$ ativa o Big M apenas quando não há roteador em a, assegurando o cumprimento da equação.

$$DE_{ka}\ yt_k \leq RRyr_a + (M \times (1 - yr_a)) \qquad \forall k, a \in \mathcal{I} \tag{13}$$

Por fim, as restrições (14), (15) e (16) definem o domínio das variáveis de decisão.

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \tag{14}$$

$$yr_i \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in \mathcal{I} \tag{15}$$

$$yt_i \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in \mathcal{I} \tag{16}$$

4. Algoritmo proposto

Esta seção apresenta um algoritmo meta-heurístico especializado baseado em ILS para o RRLP, capaz de lidar com instâncias de grande porte. A Subseção 4.1 descreve a representação da solução e a Subseção 4.2 detalha o algoritmo de avaliação. A Subseção 4.3 descreve a construção da solução inicial, enquanto a Subseção 4.4 define as estruturas de vizinhança. Por fim, as Subseções 4.5, 4.6 e 4.7 abordam os algoritmos de busca local, ILS e de perturbação.

4.1. Representação de uma solução

Uma solução s é representada pela concatenação de dois vetores binários, s_a e s_b, ambos com $|\mathcal{I}|$ posições, onde $\mathcal{I}$ é o conjunto de possíveis locais de instalação de equipamentos de rede. O vetor s_a indica os locais de instalação das repetidoras (T), enquanto s_b especifica os locais de instalação dos roteadores (R). Cada ponto de instalação pode ser ocupado por no máximo um equipamento, seja repetidora ou roteador. A Figura 1 ilustra uma solução s para um problema com cinco possíveis locais de instalação ($|\mathcal{I}| = 5$). A solução s indica a instalação de duas repetidoras nos pontos 2 e 4 de s_a (posições 2 e 4 de s) e um roteador no ponto 1 de s_b (posição 6 de s).

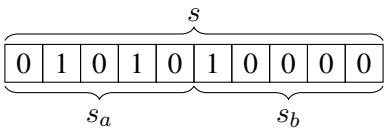


Figura 1: Representação da solução.

4.2. Avaliação de uma solução

O Algoritmo 1 apresenta a avaliação da solução para o RRLP. A função de avaliação é composta por duas etapas: o cálculo da função objetivo e as funções de penalização, que verificam a viabilidade na solução vigente.

A função objetivo é calculada entre as linhas 5 e 11, considerando o número de equipamentos instalados e a soma das distâncias entre os pontos de operação e os equipamentos. Essas

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Algorithm 1: Função de Avaliação (f)

input : s
output: custo
1 Seja $\mathcal{I}$ o conjunto de locais candidatos à instalação de equipamentos e $\mathcal{J}$ o conjunto de pontos de operação a serem atendidos
2 Seja s_a o vetor formado pelas primeiras $|I|$ posições de s e s_b aquele formado pelas últimas $|I|$ posições
3 $custo \leftarrow 0$
4 $D_{ij} \leftarrow$ calculaDistancia()
5 $custo \leftarrow custo + \alpha \left(\sigma \frac{pr}{PR_{max}} + \phi \frac{pt}{PT_{max}} \right)$
6 $somaDist \leftarrow 0$
7 **foreach** $j \in \mathcal{J}$ **do**
8 $\quad i \leftarrow equipMaisProximo(s, j)$
9 $\quad somaDist \leftarrow somaDist + D_{ij}$
10 **end**
11 $custo \leftarrow custo + \beta \frac{somaDist}{|\mathcal{J}| \max(RR, RT)}$
12 **foreach** $j \in \mathcal{J}$ **do**
13 $\quad$ **if** *semCobertura(s, j)* **then**
14 $\quad\quad i \leftarrow equipMaisProximo(s, j)$
15 $\quad\quad custo \leftarrow custo + penalidadeCliente \times (D_{ij} - raio(i))$
16 $\quad$ **end**
17 **end**
18 **foreach** $t \in s_a$ **do**
19 $\quad$ **if** *semCoberturaRoteador*(t, s_b) **then**
20 $\quad\quad i \leftarrow roteadorMaisProximo(s, t)$
21 $\quad\quad custo \leftarrow custo + penalidadeRoteador \times (D_{ij} - RR)$
22 $\quad$ **end**
23 **end**
return: $custo$

distâncias são calculadas entre as linhas 6 a 10, identificando o equipamento mais próximo de cada ponto de operação. As funções de penalização incluem duas restrições. A primeira, entre as linhas 12 e 17, verifica se cada ponto de operação j está no raio de cobertura de ao menos um equipamento de rede instalado. Caso contrário, aplica-se uma penalidade proporcional à diferença entre D_{ij} e o raio de cobertura do equipamento mais próximo. A segunda, entre as linhas 18 a 23, avalia se cada repetidora t está no raio de cobertura de algum roteador r. Caso contrário, aplica-se uma penalidade proporcional à diferença entre D_{ij} e o raio de cobertura do roteador mais próximo.

4.3. Construção da solução inicial

O Algoritmo 2 implementa um método construtivo aleatório para gerar uma solução inicial para o RRLP. São selecionados aleatoriamente PT_{max} e PR_{max} locais para instalação de equipamentos de rede, atribuindo-se 1 para indicar instalação e 0 para ausência. Esse procedimento respeita os limites máximos de equipamentos permitidos. A construção de uma solução exige a instalação de ao menos um roteador, garantida na primeira iteração (linhas 14 a 16). Além disso, cada local candidato só pode ser selecionado uma única vez, garantindo a alocação de um único equipamento (linhas 5 a 7 e 11 a 13).

4.4. Estruturas de vizinhança

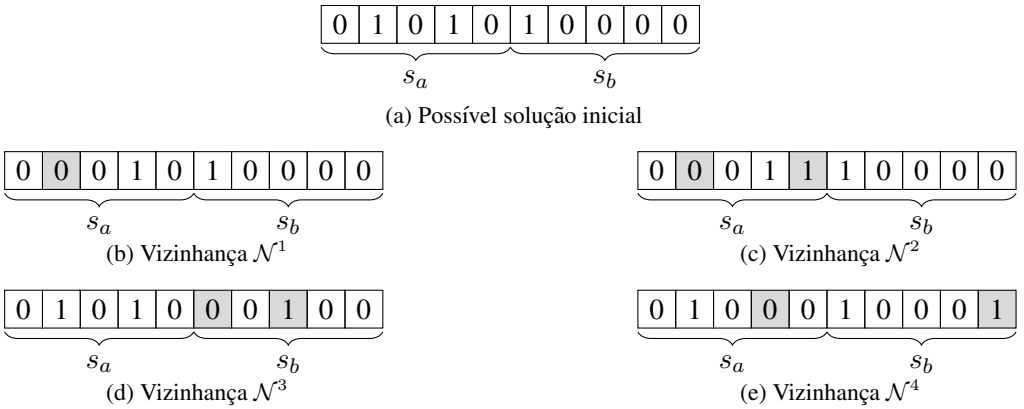
Uma vizinhança é o conjunto de soluções que podem ser alcançadas por meio de um determinado movimento. A Figura 2 exemplifica os quatro movimentos definidos para explorar o espaço de soluções do problema. A solução inicial (Figura 2a) apresenta duas repetidoras (posições 2 e 4 de s_a) e um roteador (posição 1 de s_b).

$\mathcal{N}^1$: Insere ou remove um equipamento de rede em uma posição i. A Figura 2b ilustra o movimento $\mathcal{N}^1$ ao remover a repetidora instalada na posição $i = 2$ de s_a, resultando em uma nova solução com uma repetidora e um roteador instalados.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Algorithm 2: Construtivo Aleatório

Input : PT_{max}, PR_{max}
Output: s
Seja $\mathcal{I}$ o conjunto de locais candidatos à instalação de equipamentos de rede
Seja s_a o vetor formado pelas primeiras $|I|$ posições de s e s_b aquele formado pelas últimas $|I|$ posições
$s \leftarrow \emptyset$
foreach $t \in [1, PT_{max}]$ **do**
  do
    $i \leftarrow Random(1, |\mathcal{I}|)$
  while $s_a[i] = 1$;
  $s_a[i] \leftarrow Random(0, 1)$
end
foreach $r \in [1, PR_{max}]$ **do**
  do
    $i \leftarrow Random(1, |\mathcal{I}|)$
  while $s_a[i] = 1$ ***or*** $s_b[i] = 1$;
  if $r = 1$ **then**
    $s_b[i] \leftarrow 1$
  end
  else
    $s_b[i] \leftarrow Random(0, 1)$
  end
end
Return: s



(a) Possível solução inicial
(b) Vizinhança $\mathcal{N}^1$
(c) Vizinhança $\mathcal{N}^2$
(d) Vizinhança $\mathcal{N}^3$
(e) Vizinhança $\mathcal{N}^4$

Figura 2: Exemplo dos quatro movimentos definidos para explorar o espaço de solução.

$\mathcal{N}^2$: Move uma repetidora instalada na posição i_1 para uma nova posição i_2 em s_a. A Figura 2c ilustra o movimento $\mathcal{N}^2$ no qual o local de instalação de uma repetidora é modificado de $i_1 = 2$ de s_a para $i_2 = 5$ de s_a.

$\mathcal{N}^3$: Move um roteador instalado na posição i_1 para uma nova posição i_2 em s_b. A Figura 2d ilustra o movimento $\mathcal{N}^3$ no qual o local de instalação de um roteador é modificado de $i_1 = 1$ de s_b para $i_2 = 3$ de s_b.

$\mathcal{N}^4$: Move um equipamento de rede instalado na posição i_1 para uma nova posição i_2, podendo mudar seu tipo. A Figura 2e ilustra o movimento $\mathcal{N}^4$ no qual é feita a mudança de um equipamento de rede de $i_1 = 4$ de s_a para $i_2 = 5$ de s_b, ou seja, foi feita a troca da instalação de uma repetidora para um roteador.

4.5. Busca Local

A busca local proposta utiliza as quatro estruturas de vizinhança da Subseção 4.4, com a estratégia *First Improvement*. A escolha das vizinhanças segue a heurística *Random Variable*

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Neighborhood Descent (RVND) [Souza et al., 2010; Subramanian et al., 2010]. O RVND percorre uma lista aleatória de vizinhanças $\mathcal{N}$. O algoritmo percorre todas as vizinhanças e a cada iteração, gera-se uma solução s'. Se s' melhora a função objetivo de s, s é atualizada e o processo reinicia a partir da primeira vizinhança da lista. Caso contrário, a próxima vizinhança é explorada. A busca termina quando todas as vizinhanças são exploradas sem que melhorias sejam identificadas, retornando a melhor solução encontrada.

4.6. Algoritmo ILS

O Algoritmo 3 implementa a meta-heurística ILS para o problema RRLP. Os parâmetros de entrada são o número máximo de tentativas ($tentativas_{max}$) e o limite máximo de iterações sem melhora (ILS_{max}). A saída do algoritmo é a melhor solução encontrada s, indicando a localização dos roteadores e repetidoras instalados.

Algorithm 3: Iterated Local Search (ILS)

```
   Input  : ILS_max, tentativas_max
   Output: s
1  s_0 ← ConstrutivoAleatorio(PT_max, PR_max)
2  iter ← 1;
3  nivel ← 1
4  while (iter ≤ ILS_max) do
5      s' ← Perturbação(s, nivel, tentativas_max)
6      s' ← RVND(s')
7      if (f(s') < f(s)) then
8          s ← s'
9          iter ← 1
10         nivel ← 1
11     end
12     else
13         nivel ← nivel + 1
14         iter ← iter + 1
15     end
16 end
   Return: s
```

Na linha 1, uma solução inicial s_0 é gerada por uma heurística construtiva aleatória. As variáveis $iter$ e $nivel$ são inicializadas nas linhas 2 e 3 e armazenam a última iteração em que houve melhoria na solução e o nível de perturbação aplicado. O processo iterativo (linhas 4 a 16) só é interrompido quando não há melhorias por ILS_{max} iterações. Em cada iteração, a solução s é perturbada, gerando uma nova solução s' (linha 5), que passa por uma busca local com o algoritmo RVND (linha 6). Se s' for melhor que s ($f(s') < f(s)$), a solução corrente é atualizada (linha 8) e as variáveis $iter$ e $nivel$ são atualizadas (linhas 9 e 10). Caso contrário, os valores de $iter$ e $nivel$ são incrementados, aumentando o nível de perturbação (linhas 13 e 14). Ao final, o algoritmo retorna a melhor solução encontrada.

4.7. Perturbação

O Algoritmo 4 aplica perturbações à solução por meio de trocas aleatórias de posições de instalação de equipamentos de rede, controladas pelo nível de perturbação ($nivel$) e pelo número máximo de tentativas ($tentativas_{max}$).

Na linha 2, define-se a solução s' como uma cópia de s. O procedimento de perturbação ocorre entre as linhas 3 e 18, repetindo-se até atingir o nível máximo de perturbação especificado por $nivel$. Em cada iteração, duas posições aleatórias i_1 e i_2 são escolhidas, desde que s_{i_1} seja diferente de s_{i_2} (linha 7). Entre as linhas 8 e 10, os valores são trocados. Se a nova solução satisfizer as restrições, a perturbação é considerada válida e o processo de perturbação é finalizado, definindo p como verdadeiro e encerrando o laço iniciado na linha 6. Caso contrário, novas trocas

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Algorithm 4: Perturbação

```
   Input  : s, nivel, tentativas_max
   Output: s'
1  Seja s_a o vetor formado pelas primeiras |I| posições de s e s_b aquele formado pelas últimas |I| posições
2  s' ← s
3  foreach i = 0 até nivel do
4      p ← false
5      iter ← 1
6      while p == false ou iter ≤ tentativas_max do
7          Selecione aleatoriamente duas posições i_1 e i_2 de s', devendo ser s_{i_1} ≠ s_{i_2}
8          a ← s'_{i_1}
9          s'_{i_1} ← s'_{i_2}
10         s'_{i_2} ← a
11         if s' respeita as restrições pr ≥ 1, pr ≤ PR_max, pt ≤ PT_max e s_a[i] + s_b[i] ≤ 1 then
12             p ← true
13         else
14             Desfaça o movimento entre s_{i_1} e s_{i_2}
15             iter ← iter + 1
16         end
17     end
18 end
   Return: s'
```

são realizadas até que uma seja válida ou que o número máximo de tentativas ($tentativas_{max}$) seja alcançado. Esse procedimento se repete até atingir o número de perturbações determinado por $nivel$ (linha 3). Ao final, retorna-se a solução perturbada s'.

5. Experimentos computacionais

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos computacionais que validam o algoritmo proposto para o RRLP. A implementação foi feita em C++ e executada em um computador com processador AMD Ryzen 5 4600H com Radeon Graphics, operando a 3,00 GHz, 8,00 GB de RAM e sistema operacional Windows 11 Home. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos pela formulação MILP implementada no Lingo 10.0 (versão 4.01.100). Foram avaliadas 12 instâncias da literatura de Costa et al. [2025].

5.1. Instâncias

A Tabela 2 apresenta as 12 instâncias utilizadas para validar o algoritmo. A primeira coluna indica o número da instância. A segunda e a terceira coluna exibem o número de locais candidatos e de pontos de operação. As colunas quatro e cinco especificam a quantidade máxima de repetidoras e roteadores disponíveis. Em todos os cenários, o número de roteadores foi limitado a um, devido ao seu alto custo. Portanto, o uso de repetidoras é essencial para ampliar a cobertura, especialmente em grandes minas, onde um único roteador é insuficiente. Em todos os experimentos, adotou-se um raio de cobertura de 120 metros para repetidoras e 140 metros para roteadores.

5.2. Calibração de parâmetros

Para a calibração dos parâmetros do RRLP, utilizou-se o software IRACE [López-Ibáñez et al., 2016]. Dois parâmetros foram calibrados: ILS_{max}, que define o número máximo de iterações sem melhoria, e $tentativas_{max}$, que determina o número máximo de tentativas de perturbação. Três instâncias representativas do conjunto de dados foram selecionadas para a calibração: instâncias 1, 5 e 9. A Tabela 3 apresenta os parâmetros, seus respectivos intervalos de calibração e os valores retornados pelo IRACE. Com isso, definiu-se $tentativas_{max} = 4$ e $ILS_{max} = 20$.

5.3. Resultados

O algoritmo proposto foi executado cinco vezes por instância, sendo considerados o melhor valor e a média das execuções. Os pesos da função objetivo foram: $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\sigma = 0.1$

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Tabela 2: Características das instâncias.

Instâncias	#Pontos de Instalação	#Pontos de Operação	#Max Repetidoras	#Max Roteadores
1	150	20	10	1
2	300	20	10	1
3	450	20	10	1
4	150	35	10	1
5	300	35	10	1
6	450	35	10	1
7	150	50	10	1
8	300	50	10	1
9	450	50	10	1
10	1000	20	10	1
11	2000	20	10	1
12	3000	20	10	1

Tabela 3: Parâmetros calibrados pelo IRACE

Parâmetro	Descrição	Possíveis valores	Valor retornado
$\#tentativas_{max}$	número máximo de tentativas de perturbação	{1, 2, 3, 4, 5}	4
$\#ILS_{max}$	número máximo de iterações sem melhoria	{10, 20, 30, 40, 50}	20

e $\phi = 0.9$. O desvio percentual relativo ($RPD^{\star}$), definido na Equação 17, foi calculado com base no valor médio da solução (S) encontrada pelo algoritmo e no limite inferior (LB) obtido pelo resolvedor matemático.

$$RPD^{\star} = \frac{S - LB}{S} \times 100 \tag{17}$$

A Tabela 4 resume os resultados do Lingo e da meta-heurística ILS. A primeira coluna indica o ID da instância. As colunas dois e três indicam o número de pontos de operação e pontos de instalação de cada instância. As colunas quatro a seis mostram o melhor valor e o limite inferior fornecido pelo solver, seguidos do tempo de execução em segundos. As colunas sete e oito apresentam o melhor valor e a média das soluções do ILS. A nona coluna exibe o $RPD^{\star}$, enquanto a décima coluna apresenta o tempo médio de execução do ILS.

Tabela 4: Resultados obtidos para cada instância

Instâncias			Lingo			ILS			
ID	#Pontos de Operação	#Pontos de Instalação	Best Bound	LB	Tempo Execução (s)	Best	Avg	$RPD^{\star}$	Tempo Execução (s)
1	20	150	0,31047	0,31047	2	0,31047	0,31047	0,00%	3
2	20	300	0,31008	0,31008	17	0,31008	0,31029	0,06%	12
3	20	450	0,31008	0,31008	58	0,31008	0,31021	0,04%	33
4	35	150	0,41486	0,41486	18	0,41486	0,41486	0,00%	27
5	35	300	0,41486	0,41486	163	0,41486	0,41486	0,00%	51
6	35	450	0,41345	0,41345	506	0,41345	0,41597	0,60%	150
7	50	150	0,46351	0,46351	13	0,46351	0,46351	0,00%	16
8	50	300	0,46351	0,46351	109	0,46351	33,81709	98,63%	67
9	50	450	0,46291	0,46391	437	0,46291	2,13678	78,33%	270
10	20	1000	0,31008	0,31008	485	0,31008	0,31025	0,05%	155
11	20	2000	-	-	-	0,30723	0,30762	-	987
12	20	3000	-	-	-	0,30437	0,30644	-	2504

O resolvedor matemático não foi capaz de encontrar uma solução para as instâncias de grande porte 11 e 12. Por isso, as colunas referentes aos resultados do Lingo (colunas 3 a 6) não foram preenchidas para essas instâncias. Da mesma forma, a coluna 9 não foi preenchida, uma vez que traz o RPD do valor médio encontrado pelo algoritmo em relação ao limite inferior obtido pelo resolvedor matemático. Para todas as instâncias, o algoritmo proposto ILS encontrou boas soluções

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

em baixo tempo computacional. Além disso, o ILS encontrou todas as soluções ótimas que o Lingo foi capaz de resolver. Para as instâncias de grande porte 11 e 12, o resolvedor matemático não foi capaz de encontrar uma solução viável, demonstrando a inviabilidade do seu uso em instâncias de grande porte. Portanto, o algoritmo proposto mostrou-se uma alternativa adequada para tratá-las.

6. Conclusões

Este estudo explora uma variante do problema p-mediana, denominada problema de alocação e localização de repetidoras e roteadores em minas a céu aberto. Para resolvê-lo, foi desenvolvida uma abordagem baseada na meta-heurística ILS, utilizando uma heurística construtiva aleatória, refinamento por busca local com RVND e estratégia *First Improvement*. O objetivo é minimizar o número de equipamentos de rede instalados e suas distâncias entre os pontos de operação. O algoritmo foi avaliado em 12 instâncias, encontrando boas soluções com baixo tempo computacional quando comparado ao resolvedor matemático. Para todas as instâncias em que o resolvedor matemático encontrou a solução ótima, o algoritmo proposto também foi capaz de obter esta solução. Apenas o algoritmo proposto conseguiu tratar todas as instâncias de grande porte. Isso confirma seu potencial como ferramenta de apoio à decisão, promovendo uma infraestrutura de rede eficiente para grandes minas a céu aberto. O algoritmo também apresenta aplicabilidade em outros setores industriais. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliá-lo em contextos como portos e ferrovias, além de incorporar objetivos adicionais. Além disso, objetiva-se também incorporar restrições para tratar a existência de barreiras físicas e interferências, assim como avaliar a qualidade do sinal fornecido pelos roteadores e repetidoras.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES, Finance Code 001) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, grant 302629/2023-8), do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

Akdogan, M. A., Bayındır, Z. P., e Iyigun, C. (2023). An analysis of ambulance location problem from an equity perspective. *Socio-Economic Planning Sciences*, 90:101737.

Bollapragada, R., Rao, U. S., e Wu, J. (2023). Hub location–allocation for combined fixed-wireless and wireline broadband access networks. *Decision*, 50(1):115–128.

Chappidi, E. e Singh, A. (2023). A hyper-heuristic based approach with naive bayes classifier for the reliability p-median problem. *Applied Intelligence*, 53(22).

Costa, J., Pereira, A., Milanês, H., Beneteli, T., e Cota, L. (2025). A mixed-integer linear programming model for repeaters and routers location-allocation problem in open-pit mines. In *Proceedings of the 27th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 1: ICEIS*, p. 724–731. INSTICC, SciTePress. ISBN 978-989-758-749-8.

Jansang, A., Simasathien, C., e Phonphoem, A. (2023). Energy-aware wireless mesh network deployment using optimization mechanism. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(1):26–40.

Jia, W., Lin, Y., Ding, J., Qin, G., Shao, S., e Tian, Y. (2023). Optimization of large-scale distribution center location selection in fresh produce transportation. In *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*, p. 256–270. Springer.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447

Liotta, A., Ragusa, C., e Pavlou, G. (2005). Near-optimal service facility location in dynamic communication networks. *IEEE Communications Letters*, 9(9):862–864.

Lourenço, H. R., Martin, O., e Stützle, T. (2001). A beginner's introduction to iterated local search. In *Proceeding of the 4th Metaheuristics International Conference (MIC)*, volume 2, p. 1–6.

López-Ibáñez, M., Dubois-Lacoste, J., Pérez Cáceres, L., Stützle, T., e Birattari, M. (2016). The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, 3:43–58.

Mandarino, M. F., Beneteli, T. A. P., e Cota, L. P. (2024). A decision support system based on a mixed-integer linear programming model for location of routers in open-pit mines. In *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems*, volume 1, p. 620–627, Angers.

Mekhmoukh Taleb, S., Meraihi, Y., Gabis, A. B., Mirjalili, S., Zaguia, A., e Ramdane-Cherif, A. (2022). Solving the mesh router nodes placement in wireless mesh networks using coyote optimization algorithm. *IEEE Access*, 10:52744–52759.

Mohammed, N. A. e Othman, M. (2024). A load-balanced algorithm for internet gateway placement in backbone wireless mesh networks. *Future Generation Computer Systems*, 150:144–159.

Nouri, N. A., Aliouat, Z., Naouri, A., e Hassak, S. A. (2023). Accelerated pso algorithm applied to clients coverage and routers connectivity in wireless mesh networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(1):207–221.

Rabet, I., Fotouhi, H., Alves, M., Vahabi, M., e Björkman, M. (2023). On the deployment of private broadband networks in surface mines. In *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, volume 28, p. 1–8, Sinaia.

Raithatha, M., Chaudhry, A. U., Hafez, R. H. M., e Chinneck, J. W. (2021). A fast heuristic for gateway location in wireless backhaul of 5g ultra-dense networks. *IEEE Access*.

Sayad, L., Bouallouche-Medjkoune, L., e Aissani, D. (2020). A chemical reaction algorithm to solve the router node placement in wireless mesh networks. *Mobile networks and applications*, 25:1915–1928.

Souza, M., Coelho, I., Ribas, S., Santos, H., e Merschmann, L. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2):1041–1051.

Subramanian, A., Drummond, L., Bentes, C., Ochi, L., e Farias, R. (2010). A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 37(11):1899–1911.

Ussipov, N., Akhtanov, S., Turlykozhayeva, D., Temesheva, S., Akhmetali, A., Zaidyn, M., Namazbayev, T., Bolysbay, A., Akniyazova, A., e Tang, X. (2024). Mega: Maximum-entropy genetic algorithm for router nodes placement in wireless mesh networks. *Sensors*, 24(20).

Yang, Y., Liu, A., Xin, H., Wang, J., Yu, X., e Zhang, W. (2021). Deployment optimization of wireless mesh networks in wind turbine condition monitoring system. *Wireless Networks*, 27: 1459–1476.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212447
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/212447