



UTILIZAÇÃO DO MÉTODO MULTI-START PARA RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE ORDENS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE LONGO PRAZO

JORDANA VERÍSSIMO SILVA – jordana.v@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV - RIO PARANAÍBA

BRUNA C. NAVES SANTOS – bruna.naves@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV - RIO PARANAÍBA

HELEN VITALINE DE CASTRO SANTOS – helen.castro@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV - RIO PARANAÍBA

LAÍS GONÇALVES VIANA – lais.viana@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV - RIO PARANAÍBA

THIAGO HENRIQUE NOGUEIRA – thiagoh.nogueira@ufv.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV - RIO PARANAÍBA

ÁREA: 3. PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1 – MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

RESUMO: COM O AVANÇO DA TECNOLOGIA E O AUMENTO DA POPULAÇÃO, AS INDÚSTRIAS ENFRENTAM ALTAS DEMANDAS E UTILIZAM SUA CAPACIDADE PRODUTIVA AO MÁXIMO, O QUE PODE CAUSAR DEGRADAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E FALHAS. PARA EVITAR ESSES PROBLEMAS, O SETOR DE MANUTENÇÃO É ESTRATÉGICO, POIS O PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO A LONGO PRAZO É MAIS ECONÔMICO DO QUE AS MANUTENÇÕES CORRETIVAS IMEDIATAS. A MANUTENÇÃO PREVENTIVA VISA MANTER OS EQUIPAMENTOS EM UM ESTADO SATISFATÓRIO PARA A PRODUÇÃO, AUMENTANDO SUA VIDA ÚTIL E REDUZINDO QUEBRAS. ESTE ESTUDO PROPÕE O USO DE UMA HEURÍSTICA GULOSA, REFINADA PELO RANDOM VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT (RVND) E OTIMIZADA PELA META-HEURÍSTICA MULTI-START (MS), PARA OBTER UMA SOLUÇÃO VIÁVEL QUE REDUZA AS MANUTENÇÕES NÃO REALIZADAS E O CUSTO COM EQUIPES EM UM PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO DE LONGO PRAZO (PPOMPLP), CARACTERIZADO COMO NP-HARD, EM UMA UNIDADE DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO.

PALAVRAS-CHAVES: PPOMPLP; RVND; MULTI-START.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas industriais estão sujeitos à degradação devido à grande utilização, o que pode causar falhas no sistema e resultar em problemas de segurança, danos aos equipamentos, deixando-os indisponíveis (DE ANDRADE, 2022). Ainda segundo o autor, as organizações têm percebido que podem melhorar a sua eficiência através de um planejamento eficaz das manutenções preventivas. Essa prática é fortemente adotada, já que o custo de executar manutenções corretivas é mais custoso (AQUINO, 2018). O setor de manutenção tende a ser considerado estratégico para os resultados das empresas, visto que através da gestão da manutenção é possível antecipar e evitar falhas que certamente causarão prejuízos à empresa, sendo assim planejar paradas na produção em uma situação mais apropriada para realizar manutenção, é mais barato, mais seguro e mais rápido (SANTOS, 2019).

Diante disso, a Manutenção Preventiva tem como objetivo manter o equipamento em um estado satisfatório para a produção, aumentando sua vida produtiva, reduzindo quebras, otimizando, minimizando as perdas de produção e promovendo a segurança dos trabalhadores (SULLIVAN et. al, 2004). Porém, essa prática pode gerar problemas para as empresas, tais como falhas nos procedimentos, falhas humanas, danos durante a partida e paradas, além de ser um processo caro e que necessita de uma grande quantidade de mão de obra (KARDEC, 2009). Logo, o Planejamento de Ordens de Manutenção Preventiva de Longo Prazo (PPOMPLP) realiza a atribuição das ordens de manutenção para as equipes de manutenção, minimiza o número de equipes ativas e o somatório das penalidades das ordens de manutenção não executadas, minimizando assim o custo para a empresa (ALMEIDA et. al, 2023).

Com base nisso, o presente trabalho buscará uma solução viável para reduzir as manutenções não realizadas e o custo com equipes em um PPOMPLP de uma unidade de beneficiamento de minério de ferro, por meio de heurísticas e metaheurísticas. Segundo Fuchigami (2005), um método heurístico é um processo de solução de problema apoiado em critérios racionais ou computacionais para escolher um caminho entre vários possíveis, sem percorrer todas as possibilidades, encontrando uma solução viável ou próxima da ótima. Já uma metaheurística se caracteriza como um procedimento que orienta o processo de busca para evitar a retenção do resultado em máximos ou mínimos locais e seu objetivo é explorar eficientemente o espaço de busca para encontrar soluções ótimas ou próximas das ótimas (BLUM; ROLI, 2003).

Vale ressaltar que esse tipo de problema é classificado como *NP-Hard*, uma vez que essa classe de complexidade reúne problemas que não têm uma fórmula geral de solução. Logo, para resolução do mesmo, será utilizada uma heurística gulosa para geração de uma solução inicial que resolve problemas de otimização procurando, a cada iteração, o elemento constituinte da solução que mais reduz o custo total naquele momento, de forma rápida e eficiente (BECCENERI, [s.d.]). Em seguida, a busca local será realizada pelo método *Random Variable Neighborhood Descent* (RVND), que realiza uma escolha aleatória das estruturas de vizinhança durante o processamento da busca (SOUZA, et. al 2010) e otimizada pelo *Multi-Start* (MS), que consiste em uma metaheurística que realiza uma diversificação no espaço de busca, possibilitando não ficar preso em ótimos locais (SOUZA, 2022).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A manutenção consiste nas atividades que visam obter disponibilidade e confiabilidade do sistema e de seus componentes, incluindo as atividades relacionadas ao controle das peças de reposição, recursos humanos e gestão de riscos em todas as decisões e em todos os níveis da organização (KARDEC, 2001). E, segundo Tavares (2005), tem como objetivo conservar os equipamentos e instalações em condições satisfatórias para a operação. Ainda segundo o autor, a manutenção pode ser classificada em duas categorias: corretiva e preventiva, no caso da corretiva, a manutenção ocorre quando o equipamento não desempenha a função para a qual foi projetado, e no caso da preventiva, a manutenção ocorre antes do equipamento apresentar algum tipo de problema (BRANCO FILHO 2006).

Logo, para a empresa evitar manutenções corretivas, é necessário manter um plano de manutenção, que de acordo com Chiquito e Veloso (2018), pode tornar os equipamentos e máquinas de uma empresa disponíveis por maiores períodos, aumentando as chances da produção de elementos conformes, diminuindo os tempos ociosos e contribuindo para o faturamento da empresa. Apoiado a isso, tem-se o Problema de Planejamento de Ordens de Manutenção Preventiva de Longo Prazo (PPOMPLP), que realiza um mapa temporal com o planejamento de todas as ordens de manutenção preventivas necessárias para a empresa, através da atribuição das ordens de manutenção para as equipes de manutenção (ALMEIDA et. al, 2023). Além disso, minimiza o número de equipes ativas e o somatório das penalidades das ordens de manutenção não executadas, minimizando assim as perdas financeiras da empresa (SOUZA, 2022).

Conforme citado anteriormente, para resolver o problema do tipo PPOMPLP, serão utilizados métodos heurísticos e metaheurísticos. Assim sendo, a solução inicial será

construída pelo método guloso, vizinho mais próximo e a busca local será realizada pelo método *Random Variable Neighborhood Descent* (RVND), que realiza uma escolha aleatória das estruturas de vizinhança durante o processamento da busca (SOUZA, et. al 2010) e é uma variante do *Variable Neighborhood Descent* (VND) clássico, método de refinamento, proposto por Mladenovic e Hansen (1997), que explora o espaço de soluções através de movimento (de trocas) utilizando as estruturas de vizinhanças (SOUZA, 2022). Esse método foi escolhido tendo em vista que a utilização aleatória das estruturas de vizinhança pode ser mais eficiente na diversificação da busca (SOUZA, 2008).

O método de *First Improvement* (FI) será aplicado para explorar a vizinhança utilizando os movimentos de busca local. Esse algoritmo é interrompido quando o vizinho gerado é melhor que a solução corrente (em análise da busca local), e é considerado pouco custoso do ponto de vista computacional (SOUZA, 2022). Tal fato justifica sua utilização no presente trabalho. Por fim, o método *Multi-Start* (MS) irá otimizar os resultados obtidos, através de amostragens do espaço de soluções. O *Multi-start* foi escolhido, pois é considerado uma das metaheurísticas mais simples, devido a sua fácil implementação e melhores resultados gerados (MARTÍ, 2013). O MS pode ser dividido em duas etapas, sendo elas a Construção da Solução, gerada por meio de heurísticas aleatórias na maioria dos casos e a Busca Local (SOUZA, 2022).

Como trabalhos semelhantes, tem-se estudo de Yao et al. (2004), que tratou o problema de manutenção em uma indústria de semicondutores. O trabalho enfocou a resolução do problema de gerenciamento de projetos de curto prazo, através de um modelo de programação inteira mista (*Mixed Integer Programming* - MIP), para a programação de 29 ordens de manutenção a serem executadas em 11 ferramentas diferentes, em uma janela de tempo pré-determinada. Comparando os resultados obtidos com um modelo já utilizado pela empresa estudada, foi possível observar que das 11 ferramentas, 10 não tiveram um resultado estatisticamente diferente. Na ferramenta que se destacou, o modelo obteve um resultado 13,9% melhor. Além disso, houve uma melhora média observada de aproximadamente 1,6%, o que representou um ganho financeiro de U\$39 milhões por ano para a empresa estudada.

Outro trabalho semelhante que se destacou foi o de Saraiva et al. (2011), onde os autores também utilizaram um modelo MIP, porém, com uma abordagem baseada na metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para a programação de ordens de manutenção de geradores térmicos. Levando em consideração que trata-se de um problema complexo, os autores escolheram o SA visto que o mesmo é capaz de resolver problemas combinatórios e possui fácil implementação. O estudo envolveu 29 geradores e 29 ordens de manutenção,

sendo uma para cada gerador, onde cada ordem de manutenção tem uma janela de tempo pré determinada. Além disso, teve como objetivo minimizar as perdas financeiras relacionadas às paradas dos geradores. Como resultado, o SA apresentou bom desempenho e foi capaz de produzir bons cronogramas de manutenção com tempos de computação curtos, atingindo o objetivo proposto pelos autores.

Sendo assim, no trabalho em questão será realizada uma busca local mais recente com o RVND, que segundo Souza (2010), mostrou que a utilização aleatória das estruturas de vizinhança podem diversificar a busca tendo uma eficiência maior, associado ao *Multi-start*, um método simples e que pode se mostrar mais eficiente que os métodos utilizados pelos trabalhos supracitados, como a MIP e o SA, que são considerados complexos e de difícil aplicação. Para comparar os resultados, será utilizado como base o trabalho de Santos et. al. (2022) que utilizou o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Iterated Local Search* (ILS) e *Simulated Annealing* (SA) para e reduzir as manutenções não realizadas e o custo com equipes em um PPOMPLP.

3. METODOLOGIA

3.1 O PPOMPLP

Conforme citado anteriormente, o presente estudo procurou obter uma solução viável para reduzir as manutenções não realizadas e o custo com equipes de manutenção através de métodos heurísticos e metaheurísticos. Para tanto, foi utilizado como base o Problema de Planejamento de Ordens de Manutenção Preventiva de Longo Prazo (PPOMPLP) que pode ser descrito como:

- $T = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de n manutenções a serem realizadas por um conjunto;
- $W = \{1, 2, \dots, m\}$ de m equipes de trabalho

A cada manutenção $i \in T$ é associado um conjunto $W_i \subseteq W$ de equipes de trabalho capazes de realizá-la. Além disso, a cada manutenção $i \in T$, associa-se um tempo p_i necessário para executá-la; um equipamento A_i no qual a manutenção deve ser prestada; e uma janela de tempo $[e_i, l_i]$, que especifica o intervalo de tempo em que a manutenção i pode ser realizada. A penalidade por não realizar a manutenção $i \in T$ é dada por w_i . O valor da penalidade foi definido como o tempo de processamento p_i vezes um valor correspondente à prioridade da ordem de manutenção. Cada equipe de trabalho $k \in W$ tem disponibilidade de

prestar h_k horas de mão de obra. O conjunto $T_k \subseteq T$ indica as manutenções que podem ser realizadas pela equipe de trabalho $k \in W$, ou seja, T_k indica as manutenções que a equipe de trabalho k tem habilidade para executar.

3.3 Modelo matemático

Foram definidos cinco conjuntos de variáveis de decisão com o objetivo de modelar matematicamente o problema. Tais conjuntos foram detalhados abaixo:

- $x^{kij} = 1$, se a manutenção i precede imediatamente a manutenção j executada pela equipe de trabalho k ; 0, caso contrário.
- $y_{ik} = 1$, se a manutenção i será executada pela equipe de trabalho k ; 0, caso contrário.
- $z_k = 1$, se a equipe de trabalho k é utilizada; 0, caso contrário.
- $c_{ik} \geq 0$, tempo de conclusão da manutenção i pela equipe de trabalho k .
- $r_{ij} = 1$, se a manutenção i precede imediatamente a manutenção j para o caso em que ambas as manutenções referem-se ao mesmo equipamento ($A_i = A_j$) e que ambas são executadas por equipes diferentes; 0, caso contrário.

A partir das variáveis acima, foi possível descrever uma formulação de otimização linear inteira mista, que buscou reduzir a quantidade de mão de obra necessária para realizar o maior número possível de manutenções. O balanceamento entre os dois termos da função objetivo abaixo é realizado com base em uma penalidade w_i por não execução de cada manutenção.

$$\min \sum_{k \in W} z_k + \sum_{i \in T} w_i \left(1 - \sum_{k \in W} y_{ik} \right)$$

O primeiro conjunto de restrições (1) garante que cada manutenção será executada por no máximo uma equipe de trabalho e, o segundo conjunto de restrições (2), garante que toda manutenção executada terá uma mão de obra alocada.

$$\sum_{k \in W} y_{ik} \leq 1, \forall i \in T \quad (1)$$

$$\sum_{i \in T \cup \{0\} \setminus \{j\}} x_{ij}^k = y_{jk}, \forall j \in T, k \in W \quad (2)$$

A terceira restrição (3) garante que uma determinada equipe de trabalho só será alocada se for utilizada para execução de alguma manutenção e a quarta restrição (4), garante o sequenciamento das ordens de manutenção executadas por cada equipe de trabalho.

$$\sum_{j \in T_k} x_{0j}^k = z_k, \forall k \in W \quad (3)$$

$$\sum_{i \in T_k \cup \{0\} \setminus \{l\}} x_{il}^k = \sum_{j \in T_k \cup \{0\} \setminus \{l\}} x_{ij}^k, \forall k \in W, l \in T_k \quad (4)$$

O conjunto de restrições 5 impõe que o tempo de conclusão de uma manutenção fictícia, criada para facilitar a modelagem, é nulo para todas as equipes de trabalho. As restrições 6, 9 e 10 garantem que a equipe de trabalho não pode executar mais de uma ordem de manutenção simultaneamente e cada equipamento não pode ter mais de uma ordem de manutenção sendo executada simultaneamente. Mais especificamente, as restrições 6 são ativadas apenas quando a manutenção j for realizada imediatamente após a manutenção i pela equipe k . Por sua vez, as restrições 9 são ativadas quando a manutenção j precede imediatamente a manutenção i para o caso em que ambas as manutenções referem-se ao mesmo equipamento ($A_i = A_j$) e executadas por equipes diferentes. As restrições 10, similares à 9, são ativadas quando a manutenção i precede imediatamente a manutenção j . Para ativar ou desativar essas restrições, as constantes M'_{ij} e M''_{ij} devem assumir valores maiores ou iguais à $l_i + p_j$ e $l_j + p_i$ respectivamente. As restrições 7 e 8 garantem que cada manutenção será executada dentro de sua janela de tempo, enquanto as restrições 11 garantem que o número de horas alocadas para uma equipe de trabalho seja menor ou igual ao número de horas disponíveis.

$$c_{0k} = 0, \forall k \in W \quad (5)$$

$$c_{jk} \geq c_{ik} + p_j - M'_{ij} \cdot (1 - x_{ij}^k), \forall k \in W, i \in T_k \cup \{0\}, j \in T_k \quad (6)$$

$$c_{ik} \geq (e_i + p_i) \cdot y_{ik}, \forall k \in W, i \in T_k \quad (7)$$

$$c_{ik} \geq l_i, \forall k \in W, i \in T_k \quad (8)$$

$$c_{jk}' \leq c_{ik} - p_i + M''_{ij} \cdot r_{ij},$$

$$\forall k' \in W, i \in T_k, j \in T_k, |k \neq k', i < j, A_i = A_j \quad (9)$$

$$c_{jk}' \geq c_{ik} + p_j - M'_{ij} (1 - r_{ij}), \forall k \in W, k' \in W, i \in T_k, j \in T_k, |k \neq k', i < j, A_i = A_j \quad (10)$$

$$c_{ik} \leq h_k, \forall k \in W, i \in T_k, \quad (11)$$

Por fim, às restrições abaixo (12-16) indicam o domínio e escopo das variáveis de decisão.

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall k \in W, i \in T_k \cup \{0\}, j \in T_k \cup \{0\} \quad (12)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \forall k \in W, i \in T_k \cup \{0\} \quad (13)$$

$$z_k \in \{0,1\}, \forall k \in W \quad (14)$$

$$c_{ik} \geq 0, \forall k \in W, i \in T_k \quad (15)$$

$$r_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in T, j \in T | i < j, A_i = A_j \quad (16)$$

3.3 Métodos utilizados para resolução do problema

3.3.1 RANDOM VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT (RVND)

O *Random Variable Neighborhood Descent* (RVND) é um algoritmo de busca local usado para resolver problemas de otimização e pertence à família de algoritmos de busca baseados em vizinhança, nos quais uma solução inicial é iterativamente melhorada explorando diferentes vizinhanças em busca de soluções melhores [SOUZA, 2022]. Ainda de acordo com o autor, o RVND foi proposto como uma variação do algoritmo *Variable Neighborhood Descent* (VND), porém enquanto o VND explora uma sequência fixa de vizinhanças, o RVND seleciona aleatoriamente a próxima vizinhança a ser explorada a cada iteração, oferecendo uma abordagem flexível que permite explorar diferentes vizinhanças de forma aleatória, o que pode ser vantajoso para escapar de mínimos locais e encontrar soluções de melhor qualidade. A seguir, encontra-se o pseudocódigo do RVND.

Procedimento **RVND**($f(\cdot), N(\cdot), r, s$)

- 1 **Início**
- 2 Seja **LV**
- 3 Enquanto **LV** $\neq 0$ faça
- 4 Selecione uma EV $N^n \in LV$ aleatoriamente
- 5 Encontre o vizinho $s' \in N^n(s)$;
- 6 Se ($f(s) < f(s')$) então
- 7 $s \leftarrow s'$;
- 8 Reinicializa **LV**
- 9 **Fim**
- 10 **Senão**
- 11 Remove N^n de **LV**

12 **Fim**
13 **Fim**
14 Retorne s ;
15 **Fim RVND**

Dentro do RVND, foi utilizada a estrutura de vizinhança *SHIFT*. As estruturas de vizinhança são estratégias utilizadas para realização de movimentos de melhora da solução obtida pela heurística construtiva (CAMPOS, 2018). A estrutura *SHIFT* envolve mover um elemento da solução atual para uma nova posição. Logo, o *SHIFT* irá remover do vetor solução uma tarefa e adicioná-la em outra posição. Para realizar as trocas simétricas do *SHIFT*, utilizou-se do critério de escolha *Best Improvement* (BI), que analisa todas as possíveis soluções vizinhas de uma determinada solução, até encontrar aquela que apresenta a maior melhoria em relação à solução atual (NOGUEIRA, 2011).

3.3.2 MÉTODO *MULTI-START*

O método *Multi-start* (MS), é considerado uma das metaheurísticas com maior simplicidade de implementação (MARTÍ, 2013) e pode ser dividido em duas etapas, a de Construção da Solução (linha 3), gerada por meio de heurísticas aleatórias na maioria dos casos e a Busca Local (linha 4) (SOUZA, 2022). A seguir, encontra-se o pseudocódigo completo do MS.

Procedimento *MultiStart*($f(\cdot)$, $N(\cdot)$, *CriterioParada*, s)

```

1   $f^* \leftarrow \infty$ ;           {Valor associado a  $s^*$ }
2  Enquanto (Critério de parada não atendido) faça
3       $s \leftarrow ConstruaSolução()$ ; {Gere uma solução  $s$  do espaço de soluções}
4       $s \leftarrow RVND(f(\cdot), N(\cdot), s)$ ;
5      se ( $f(s) < f(s)^*$ ) então
6           $s^* \leftarrow s$ ;
7           $f^* \leftarrow f(s)$ ;
8  Fim-se;
9  Fim-enquanto;
10  $s \leftarrow s^*$ ;
11 Retorne  $s$ ;
```

Fim MultiStart;

O MS executa o algoritmo de busca local várias vezes, a partir de diferentes soluções iniciais, com o objetivo de explorar diferentes regiões do espaço de soluções e encontrar uma solução de melhor qualidade e seu critério de parada, segundo Souza (2022), pode ser definido com um número máximo de iterações. Então, enquanto o *IterMax* não for atingido, o algoritmo irá criar uma solução, aplicar a busca local e verificar o valor da função objetivo. Assim que o critério de parada for atendido, a melhor solução será retornada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os métodos apresentados anteriormente foram implementados no programa *Code:blocks* através da linguagem de programação C++ e, para desenvolvimento, utilizou-se de instâncias referentes a uma multinacional de beneficiamento de minério de ferro, localizada no Estado de Minas Gerais, que realiza o planejamento de todas as ordens de manutenção para o período de um ano. Para tanto, foram escolhidas 25 instâncias, considerando ordens de produção a serem executadas (20, 30, 40, 60 e 80), as equipes disponíveis e os equipamentos que necessitam de manutenção. As instâncias foram escolhidas tendo em vista que, quanto maior o número de ordens de produção, maior é o tempo computacional. Além disso, como foi utilizado o critério de escolha *BI*, que realiza todas as comparações entre as soluções para escolher a melhor, o tempo computacional para executar todas as instâncias seria muito grande.

Os resultados obtidos através do MS não foram satisfatórios para o PPOMPLP, uma vez que trata-se de um problema de minimização que buscou reduzir a quantidade de mão de obra necessária para realizar o maior número possível de manutenções. Com isso, foi proposta uma nova função objetivo (FO) referente a literatura, onde cada ordem de manutenção possui um determinado tempo de duração para ser executada durante a janela de tempo. Essa janela de tempo existe para determinar o intervalo que a tarefa pode ser executada, porém, ela não precisa ser obrigatoriamente executada durante toda a janela, ou seja, a tarefa pode ser finalizada antes. Exemplificando: dada ordem de manutenção *i*, com início de janela de tempo em 32.0t., fim em 80.0t. e duração de 24.0t., a ordem possui o intervalo de 48.0t para ser executada com uma duração de 24.0t. Entende-se *t* como unidade de tempo. Os resultados podem ser comparados na tabela 1, abaixo.

TABELA 1: Comparativo entre os resultados das funções objetivo

Ordens de produção	FO antiga	FO nova
20	1732	652
20	870	222
20	440	222
20	225	222
20	225	222
30	3460	1732
30	2166	1302
30	1736	1302
30	1306	1302
30	1306	1302
40	5188	1084
40	3462	654
40	2600	654
40	2170	654
40	2170	654
60	6484	1516
60	4110	1086
60	3248	1086
60	2356	1086
60	1096	1086
80	8644	652
80	5406	222
80	4544	222
80	3466	222
80	232	222

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Ao analisar os resultados, verificou-se que a nova FO influenciou diretamente nos resultados e os melhorou em 100% dos casos (destacados em negrito na tabela acima). Na tabela 2, abaixo, encontram-se os resultados das FO's, o desvio entre as melhores soluções obtidas no algoritmo e as soluções ótimas (GAP) de cada FO. Além disso, nela é possível visualizar a coluna “time” que registra o tempo de execução para cada iteração do algoritmo de cada FO. Os dados utilizados referem-se às 25 instâncias (ID), às ordens de produção (n) a serem executadas (20, 30, 40, 60 e 80), as equipes disponíveis (m) e os equipamentos que necessitam de manutenção (q). Em resumo, a tabela abaixo organizou as informações relevantes referentes ao problema, possibilitando comparar os resultados entre as FO's.

TABELA 2: Informações detalhadas dos resultados

Dados utilizados				Multi-Start da FO antiga			Multi-Start da FO nova		
ID	n	m	q	FO	GAP (%)	t (s)	FO	GAP (%)	t (s)
1	20	2	2	1732	404,96	0,63	652	-62,36	0,17
2	20	3	2	870	297,26	0,79	222	-74,48	0,16
3	20	4	2	440	100,91	0,49	222	-49,55	0,14
4	20	5	2	225	2,74	0,36	222	-1,33	0,19
5	20	10	2	225	2,74	0,58	222	-1,33	0,42
6	30	2	2	3460	697,24	1,29	1732	-49,94	0,57
7	30	3	2	2166	889,04	2,42	1302	-39,89	0,55
8	30	4	2	1736	692,69	1,91	1302	-25,00	0,65
9	30	5	2	1306	496,35	2,5	1302	-0,31	0,63
10	30	10	2	1306	496,35	2,6	1302	-0,31	0,58
11	40	2	2	5188	1095,39	4,88	1084	-79,11	1,26
12	40	3	2	3462	1480,82	6,25	654	-81,11	1,26
13	40	4	2	2600	1087,21	9,02	654	-74,85	1,44
14	40	5	2	2170	890,87	12,64	654	-69,86	1,49
15	40	10	2	2170	890,87	7,26	654	-69,86	1,63
16	60	2	2	6484	1394,01	55,3	1516	-76,62	5,32

17	60	3	2	4110	1776,71	38,77	1086	-73,58	5,27
18	60	4	2	3248	1383,11	40,03	1086	-66,56	6,06
19	60	5	2	2356	975,80	52,64	1086	-53,90	6,25
20	60	10	2	1096	400,46	21,55	1086	-0,91	7,47
21	80	2	2	8644	898,15	258,43	652	-92,46	15,71
22	80	3	2	5406	2368,49	279,56	222	-95,89	16,79
23	80	4	2	4544	1974,89	179,87	222	-95,11	18,28
24	80	5	2	3466	1482,65	254,61	222	-93,59	17,04
25	80	10	2	232	5,94	56,94	222	-4,31	20,27

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Analisando a tabela, observou-se que os GAP's da FO nova foram negativos. Isso se justifica pelo fato de que a tarefa não precisar ser executada durante toda a janela de tempo, o que reduz o tempo necessário para ordenar todas as tarefas, possibilitando aplicá-las de forma mais eficiente. Notou-se também que a reformulação da FO reduziu significativamente o tempo de execução do algoritmo em cada instância.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo abordou o problema do tipo PPOMPLP, no intuito de obter uma solução viável para reduzir as manutenções não realizadas e o custo com equipes de manutenção através de métodos heurísticos e metaheurísticos. Para tanto, utilizou-se do método Multi-Start aplicado a instâncias referentes a uma multinacional de beneficiamento de minério de ferro, localizada no Estado de Minas Gerais, que realiza o planejamento de todas as ordens de manutenção para o período de um ano. Foram escolhidas apenas 25 instâncias, considerando as ordens de produção a serem executadas, as equipes disponíveis e os equipamentos que necessitam de manutenção. Os resultados obtidos através do MS não foram satisfatórios para o PPOMPLP, com isso, foi proposta uma nova função objetivo, onde cada ordem de manutenção possui um determinado tempo de duração para ser executada durante a janela de tempo. Com a nova FO, verificou-se que os resultados melhoraram em 100% dos casos.

Além disso, os GAP's da nova FO foram negativos, isso se justifica pelo fato de que a tarefa não precisar ser executada durante toda a janela de tempo, o que reduz o tempo

necessário para ordenar todas as tarefas, possibilitando aplicá-las de forma mais eficiente. Notou-se também que a reformulação da FO reduziu significativamente o tempo de execução do algoritmo em cada instância. Apesar das dificuldades encontradas na elaboração, desenvolvimento e programação, o objetivo do trabalho foi atingido. Como limitações do estudo tem-se o tempo reduzido para executar todas as instâncias do problema, uma vez que o mesmo conta com um número elevado de ordens de execução de manutenção que exigem muito tempo computacional.

REFERENCIAS

BECCENERI, J. C. Meta-heurísticas e Otimização Combinatória: Aplicações em Problemas Ambientais, [s.d.].

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, ACM, New York, NY, USA, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.

BRANCO FILHO, G. Indicadores e Índices de Manutenção. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2006.

CAMPOS, A. A. O problema de roteamento de veículos para coleta de lixo com janelas de tempo: abordagem heurística. Viçosa, MG, 2018.

CHIQUEITO, A.; VELOSO, A.M.A. Elaboração de um plano de manutenção utilizando conceitos de manutenção produtiva total. 2018 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial), Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

DE ANDRADE, J. Um algoritmo GRASP eficiente para um problema de planejamento de ordens de manutenção de longo prazo. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 9, n. 1, 2022.

FUCHIGAMI, H.Y. (2005). Métodos heurísticos construtivos para o problema de programação da produção em sistemas flow shop híbridos com tempos de preparação das máquinas assimétricas e dependentes da sequência. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção Função Estratégica. Rio de Janeiro: Ed. QualityMark, 2001.

MARTÍ, R; MAURÍCIO, G.G. RESENDE, RIBEIRO, C. CELSO. Multi-start methods for combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research*, 226(1):1-8, 2013.

MLADENOFI, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. 2018.

SANTOS, A. A.; MARTINS, A. X.; SOUZA, M. J. F.. Modelos heurísticos e meta-heurísticos para a resolução de um problema de sequenciamento de ordens de manutenção preventiva de longo prazo. In: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2022, Juiz de Fora. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível

em: <<https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2022/trabalhos/modelos-heuristicos-e-meta-heuristicos-para-a-resolucao-de-um-problema-de-sequen?lang=pt-br>> Acesso em: 08 abr. 2023.

SANTOS, M. C. Desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva e preditiva para a melhoria da confiabilidade de um processo industrial automatizado, 2019.

SARAIVA, J. T.; PEREIRA, M. L.; MENDES, V. T.; SOUSA, J. C. (2011). A simulated annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem. *Electric Power Systems Research*, 81(7):1283–1291.

SOUZA, M. J. F. Inteligência Computacional para Otimização: metaheurísticas. Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2022. Disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>.

SOUZA, M. J.; et. al (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2):1041--1051, 2010.

SULLIVAN, G. P. PUGH, R. MELENDEZ, A. P. HUNT, W. D. Operations & Maintenance Best Practices A Guide to Achieving Operational Efficiency. Pacific Northwest National Laboratory for the Federal Energy Management Program, 2004.

YAO, X.; FERNÁNDEZ-GAUCHERAND, E.; FU, M. C.; MARCUS, S. I. (2004). Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17(3):345–356.